REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Comportement physico-mécanique d'un nouveau éco-matériau de construction à base de déchets inertes

---

Présenté par

M^{elle}. Gaci Maroua

Mr. Boudoudou Mohamed

Proposé et Dirigé par

Dr. GUENDOUZ MOHAMED

Mr. HADJADJ MOUSSA

Promotion Juin 2024

Remerciements

Tout d'abord, Nous tiens à remercier ALLAH, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de prés nou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et nous passons les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile. Nous tiens à remercier :

Notre encadreur Mr. ***GUENDOUZ Mohamed*** *et* ***Mr. HADJADJ Moussa,*** *d'avoir accepté de nous encadrer, et pour ses conseils précieux pendant la réalisation de ce travail. Pour l'honneur qu'il m'a fait d'encadrer ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour ce travail qu'il a guidé par de judicieux conseils, qui a bien su me communiquer pour mener au mieux cette étude.*

*Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall technologique (****LOUBNA****,* ***KAWTHER****,* ***SOUMIA****).*

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

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A mes chères sœur **« ILHEM » « LOUBNA »** et mon frère **« MOHAMED AYMEN ».**

A toute ma famille et toutes mes amies.

Un grand merci à **Mr. HADJADJ Moussa**, d'avoir accepté de nous Co-encadrer pour et son aide pratique et son soutien moral et ses encouragement.

Gaci Maroua

Dédicaces

Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur
qu'on dédie du fond
du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en
exprimant la gratitude et la
reconnaissance durant toute notre existence.
Je dédie ce modeste travail :
A la plus belle étoile qui puisse exister dans mon univers
ma Chère mère ;
A mon meilleur ami: mon père, le meilleur de tous les
pères ;
Aux piliers qui me soutiennent, mes chers frères ;
A Toute ma grande famille sans exception ;
A tous mes amis ;
A toutes les personnes qui m'ont soutenu et cru en moi
lors de mon parcours et à
tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Boudoudou Mohamed

ملخص

تتمتع الجزائر بإمكانيات ملحوظة في المواد الطبيعية البوزولانية ,ولا سيما بيرلايت حمام بوغرارة في مغنية (تلمسان). ومع ذلك, فإنها لا تزال غير مستغلة حتى الآن.البيرلايت عبارة عن زجاج بركاني يحتوي على نسبة عالية من السيليكا والالومينا في تركيبته الكيميائية.خصائصه تمنحه امتيازا لاستخدامه كمادة مضافة معدنية نشطة في إنتاج الاسمنت.

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين ورسكلة النفايات الصناعية (الغرانيت ,الرخام), والنفايات الخاملة (البيرلايت) ودمجها بشكل حجمي في كتلة الخرسانة الرملية المائعة بنسب مختلفة , مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة (الجريان ومعدل التدفق) وفي الحالة الصلبة (مقاومة الضغط, الكثافة, الامتصاص ,السرعة بالموجات فوق الصوتية , توصيل حراري.....) ومقارنتها مع خرسانة رملية مائعة عادية.

وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الخصائص الميكانيكية للخرسانة تتحسن بشكل ملحوظ , ومن الممكن استعمال هذا النوع من الخرسانة في مختلف مجالات البناء وفي جميع العناصر الإنشائية.

الكلمات المفتاحية- خرسانة رملية مائعة, النفايات الصناعية, البيرلايت, الخصائص الميكانيكية.

Résume

L’objectif principal de ce projet est de contribuer à la valorisation et au recyclage des déchets industriels (granite, marbre), et les déchets inertes (perlite) dans la formulation de béton de sable fluide avec déférents pourcentages. Les caractéristiques de béton à l’état frais (étalement, taux d’écoulement « V-Funnel ») et à l’état durci (la résistance a la compression, la densité apparent, la vitesse ultrasonique, la porosité, la conductivité thermique et perte au feu……).

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques mécaniques de béton sable fluide sont améliorées avec l’augmentation de substitution de déchets industriels et inerte, donc il est possible d’utiliser ce type de béton dans le domaine de la construction.

Mots clé- Béton de sable fluide, Déchets industriels, Perlite, Propriétés mécanique.

Abstract

The main objective of this project is to contribute to the valorisation and recycling of industrial waste (granite, marble) and inert waste (perlite) in the formulation of flowable sand concrete with different percentages. The characteristics of concrete in the fresh state (flowablity, flow rate « V-Funnel ») and in the hardened state (compressive strength, apparent

density, ultrasonic velocity, porosity, thermal conductivity and fire loss) we study and compare with reference concretes.

The obtained results show that the mechanical characteristics of flowable sand concrete are improved with the increase in substitution of industrial and inert waste, so it is possible to use this type of concrete in the field of construction.

Keywords-Flowable sand concrete, Industry waste, Perlite, Mechanical properties.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumés

Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Notation et abréviation

Introduction général

Chapitre I:Synthés bibliographiques

I.1.Valorisation et recyclage des déchets 5

I.1.1. Introduction 5

I.1.2. Définition de déchets 6

I.1.3. définition de la valorisation 6

I.1.4. Les différents modes de la valorisation et traitement des déchets 6

I.1.5. Les type des déchets 8

I.1.6. Différents déchets utilisés en génie civil 9

I.2. Perlite et déchets de perlite 13

I.2.1. Introduction 13

I.2.2. La Perlite naturelle 13

I.2.2.1. Définition 13

I.2.3. Origine de perlite 14

I.2.4. Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la perlite 16

I.2.4.1. Caractéristiques physiques de la perlite 17

I.2.4.2. Caractéristiques chimiques de la perlite 17

I.2.4.3. L'activité pouzzolanique de la perlite 22

I.2.5. Production de la perlite dans le monde 22

I.2.6. Production de la perlite en Algérie 22

I.2.6.1. Volcanisme de la région de Hammam Boughrara 24
I.2.6.2. La composition chimique de la perlite broyée 26
I.2.7. Traitement et méthodes d'exploitation de perlites 29
I.3.Granite et déchets de granite 30
I.3.1. Introduction 30
I.3.2.Définition 31
I.3.3. Les déférents types de granites 31
I.3.4. Domaine d'utilisation de granite 32
I.3.5. Origine, composition et densité du granite 33
I.3.6. Les propriétés du granite 33
I.3.7. Influence des déchets de granite sur les propriétés des matériaux cimentaires 36
I.3.7. 1.Influence à l'état frais 36
I.3.7. 2.Influence à l'état durci 38
I.4.Marbre et déchets de marbre 42
I.4.1.Définition 42
I.4.2.Composition de marbre 42
I.4.3. Déférent type de marbres 43
I.4.4. Les déférentes propriétés de marbres 43
I.5. Le béton de sable 44
I.5.1. Introduction 44
I.5.2. Origines de béton de sable 44
I.5.3. Définition 45
I.5.4 Techniques particulières 46
I.5.5. Béton de sable projeté 46
I.5.6.Bétons de sable fluide 47

I.5.7. Les composants du béton de sable 48

I.5.8. Formulation du béton de sable 50

I.5.8.1 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable 50

1.5.8.2 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable 60

I.6 Conclusion 65

Chapitre II : Matériaux et technique d'expériences

II.1 Introduction 66

II .2 Caractérisation des matériaux utilisés 66

II.2.1 Granulats utilisé 67

II .2.1.1.Sable 68

II .2.2. Le Ciment 68

II .2.2.1.Caractéristiques chimiques et minéralogiques 68

II .2.2.2.Caractéristiques physico-mécaniques 70

II.2.3. Filler de marbre blanche 70

II.2.4. Poudre de déchet de perlite 72

II.2.5. Déchets de granite 74

II.2.6.Eau de gâchage 76

II.2.7.Super plastifiant 76

II.3 .Formulation du béton 76

II.4. Séquence de malaxage du béton 78

II.5 .Les essais sur le béton (BSF) 79

II.5.1 Etat frais 79

A. Essais d'étalement au mini-cône 79

B. Essai d'écoulement à l'entonnoiren (V-funnel) 80

II.5.2 Démoulage et conservation des éprouvettes 80

II.5.3 Etat durci 81

A. Essai de la résistance à la compression 81

B. Essai de la résistance à la traction par flexion 82

C. Essai de la vitesse ultrasonique 82

D .Module d'élasticité 83

E. Conductivité thermique 84

II.5.4.Des essais de la durabilité 84
A. Porosité accessible à l'eau 84
B. Absorption d'eau par capillarité 85
C. Perte au feu 86
D. Résistance à l'abrasion 87
II.6 .Variable étudié 89
II.7.Conclusion 90

Chapitre III : Résultats et interprétation

III.1 Introduction 91
III.2. Comportent de béton sable fluide (BSF) à l'état frais 91
III.2.1. Effets de la poudre de perlite et le sable de granite sur l'étalement de BSF 91
III.2.2.Taux d'écoulement (V-Funnel) 92
III.3. Comportent de béton sable fluide (BSF) à l'état durci 94
III.3.1.Résistance à la compression 94
III.3.2.Résistance à la flexion 96
III.3.3.Vitesse d'auscultation sonique 99
III.3.4.Module d'élasticité 102
III.3.5.Conductivité thermique 104
III.3.6.Résistance à l'abrasion 106
III.4. Durabilité 107
III.4.1.La Porositéaccessible à l'eau 107
III.4.2.Absorption d'eau 108
III.4.3.Résistance à haute température 109
III.5.Conclusion 113
Conclusions générales et recommandations 114
Références 118
Annexe 124
Annexe A.1 124
Annexe A.2 125

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Compositions chimiques d'une sélection de perlites typiques commercialisées 16

Tableau I.2 : Propriétés physiques de la perlite brute 17

Tableau I.3: La composition chimique typique de la perlite brute 17

Tableau I.4: Conformité de la perlite selon la norme ASTM C618 21

Tableau I.5: Réserves et productions mondiales de la perlite (mille tonne) [USGC, 2018] 22

Tableau I.6: Les principaux gisements de la perlite en Algérie 23

Tableau I.7 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara (%) 26

Tableau I. 8: Conformité de PR selon la norme ASTM C618 27

Tableau I.9. Caractéristiques physiques de perlite 28

Tableau II.1 : Propriétés physiques d'identification de sable utilisés 67

Tableau II. 2 : Composition chimique élémentaire du ciment CRS-CEM I 42,5 (%) 69

Tableau II.3 : Composition minéralogique du clinker (%) 69

Tableau II.4 : Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment 69

Tableau II. 5 : Caractéristiques physiques du ciment CRS 70

Tableau II .6 : Propriétés physiques de marbre 71

Tableau II .7 : Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle 73

Tableau II .8 : Caractéristiques physiques de la perlite naturelle 74

Tableau II .9 : Propriétés physiques de SGR 75

Tableau II .10 : Composition des BSF formulés pour $1M^3$ 77

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Déches industriels 5
Figure I.2 : Déchets industriel dangereux 9
Figure I.3 : Déchets inertes 10
Figure I.4 : Déchets toxiques 10
Figure I.5 : Poudre de laitier (a), de granite (b) et de marbre (c) 11
Figure I.6 : Déchets ménager 12
Figure I.7 : Déchets industriels banals (D.I.B.) 12
Figure I.8 : Déchet de perlite 14
Figure I.9 : Origine de la perlite 15
Figure I.10 : ATD des mortiers à 7 jours 1-Témoin 2-Perlite 3- Cendre volante 19
Figure I.11 : Localisation des ajouts pouzzolanique selon le graphe de Frattini 20
Figure I.12 : Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen) 23
Figure I.13 : Localisation du gisement de Hammem Boughrara (TLEMCEN) 24
Figure I.14 : Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c) 25
Figure I.15 : L'analyse aux rayons X de la perlite 25
Figure I.16 : Superposition des DRX de la perlite, pouzzolane et fumée de silice 26
Figure I.17 : Photo MEB et EDS de perlite brute 28
Figure I.18 : Photo MEB de perlite broyée 29
Figure I.19 : Déchets de granite 31
Figure I.20 : La maniabilité de béton à base de déchets de granite 36
Figure I.21 : L'affaissement au cône d'Abrams en fonction de pourcentage de substitution de granite 37
Figure I.22 : Variation de la densité en fonction du taux de substitution à poudre de granite 37
Figure I.23: La résistance à la compression de béton à base de déchets de granite avec (a) 7 jours, (b) 28 jours 39
Figure I.24: Influence du pourcentage sue la résistance en compression 40
Figure I.25: Résistances en compression de béton avec ajout de poudre de granite 41
Figure I.26 : Capacités d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de granite 41
Figure I.27 : Déchets de Marbre 42

Liste des figures

Figure I.28 : Port Saïd 42

Figure I.29 : Béton projeté 46

Figure I.30 : Béton de sable fluide 48

Figure I.31 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines 53

Figure I.32 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D_{max} du sable 54

Figure I.33 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage(e+v) d'une matrice pour une mise en Œuvre donnée 55

Figure I.34 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) 57

Figure I.35 : Organigramme de la méthode théorique 59

Figure I.36 : Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition 63

Figure I.37 : Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition 64

Figure II.1 : Sable moyenne d'Oued sauf 67

Figure II.2 : Courbe granulométrique des sables utilisées 68

Figure II.3: Poudre de marbre 70

Figure II.4 : Protocole de concassage des déchets de marbre sous forme sable 0/3 71

Figure II.5 : (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage 72

Figure II.6 : Protocole de concassage des déchets de perlite 72

Figure II.7 : Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle 73

Figure II.8 : Déchets de granite 74

Figure II.9 : Protocole de concassage des déchets de granite sous forme sable 0/3 75

Figure II.10 : Super plastifiant utilisé TOMPO-10 76

Figure II.11 : Séquence de malaxage du béton de sable fluide 78

Figure II.12 : Procédure du malaxage 79

Figure II.13 : Développement de l'essai d'étalement 79

Figure II.14 : Essai d'écoulement à l'entonnoir en V 80

Figure II.15 : Conservation des éprouvettes fabriquées 81

Figure II.16 : Essai de compression sur éprouvette béton 81

Figure II.17 : Essai de traction par flexion sur béton 82

Figure II.18 : Etalonnage et mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores 83

Figure II.19 : Le CT-mètre et ses composants 84

Liste des figures

Figure II.20 : Essai de porosité accessible à l'eau 85

Figure II.21 : Essai de l'absorption d'eau par capillarité 85

Figure II.22 : Echauffement des échantillons dans un four à moufle 86

Figure II.23 : Courbes temps-température pour différentes températures 87

Figure II.24 : Diapositif de l'essai de la résistance à l'abrasion 88

Figure II.25: Variable étudier 89

Figure III.1 : Etalement des différents mélanges de BSF. 91

Figure III.2 : Taux d'écoulement des différents mélanges de BSF. 93

Figure III.3 : Corrélation entre l'étalement et le temps d'écoulement des déférents mélanges de BSF 94

Figure III.4 : Résistance à la compression des différents BSF 96

Figure III.5 : Résistance à la flexion des différents BSF 98

Figure III.6 : VAS des différents BSF 100

Figure III.7 : Module d'élasticité des différents BSF. 103

Figure III.8 : Evaluation de la conductivité thermique des différents BSF. 104

Figure III.9. Chaleur spécifique de déférents BSF. 105

Figure III.10 : Evolution de la variation de la résistance à l'abrasion des différents BSF. 107

Figure III.11: Porosité des différents BSF. 108

Figure III.12 : Évolution de l'absorption pour les différents BSF. 109

Figure III.13 : RCR pour les différents BSF. 110

Figure III.14 : Perte de masse pour les différents BSF avant et après le feu. 112

Figure A.1 : Fiche technique du ciment 124

Figure A.2 : Fiche technique d'adjuvant utilisé 126

Notations et Abréviations

Notations et Abréviations

BSF Béton de sable fluide

BSFT Béton de sable fluide témoin

CPA Ciment Portland Artificiel

CRS Ciment résistant aux sulfates

E/C Rapport eau sur ciment

R Résistance

Rc Résistance à la compression

SR Sable recyclé

SP Super plastifiant

NA Norme Algérienne

NE Norme Européenne

NF Norme française

Mf Module de finesse

E Quantité d'eau

M Moment de flexion

L Liante

F Filaire

DG Déchets de granite

SG Sable de granite

PP Poudre de perlite

PM Poudre de marbre

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans l'industrie cimentaire, la recherche d'un liant moins coûteux et écologique en utilisant des ajouts industriels et des ressources naturelles est devenue une préoccupation majeure pour les technologues du domaine. Le ciment est un ingrédient crucial du mortier, néanmoins son processus particulièrement polluant est doublement émetteur de CO2. D'une part, il recourt à des énergies fossiles pour faire fonctionner ses fourneaux. D'autre part, le chauffage du calcaire et de l'argile à très haute température pour créer le "clinker"**,** liant de base du ciment, libère lui-même du CO2 par réaction chimique.Dans le cadre de la problématique de la réduction des gaz à effet de serre, les producteurs de ciment utilisent de plus en plus d'ajouts minéraux. Cette approche permet de diminuer le contenu en ciment et par conséquent les émissions totales de CO2 associées à la fabrication du ciment et du béton. Dans ce contexte, il est important de mieux comprendre l'influence des ajouts minéraux sur le comportement des matériaux cimentaires.

Les ajouts cimentaires actifs à caractère pouzzolaniques font actuellement partie des développements les plus récents dans la production du ciment, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux cimentaires (mortier). D'autre part leur utilisation a pour objectif de réduire la consommation de clinker (ciment), en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement.

L'Algérie est l'un des pays qui possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniquesd'origine volcanique, qui s'étend de façon sporadique le long de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran. Leur utilisation dans la fabrication des ciments est limitée malgré la présence des matériaux pouzzolaniques en quantité massive. Notre pays possède un gisement important de perlite près de Hammam Boughrara (Tlemcen), il est très intéressant d'étudier cette roche comme une addition minérale.

De nombreux travaux de recherches précédents ont montré des améliorations sur le plan des caractéristiques mécaniques et thermiques des mortiers contenant cette addition. L'ensemble des résultats obtenus permettent ainsi de conclure que l'utilisation de la perlite

améliore les performances des mortiers et conduit à l'obtention d'un nouveau matériau de construction économique et écologique.De par, l'ensemble de ses propriétés, l'étude des mortiers à base de perlite est un domaine de recherche à fort potentiel de développement. Cependant, malgré l'intérêt croissant des chercheurs pour ce matériau (la perlite), les mortiers à base de perlite ne sont pas encore acceptés comme matériau de construction et leur utilisation reste encore limitée. Il présente des propriétés intéressantes à l'état frais et à l'état durci, il est par conséquent important pour un tel mortier qu'il soit employé dans l'industrie du bâtiment.

Notre objectif est d'étudier la possibilité d'utiliser la perlite comme substituant partiel au ciment dans le mortier, et évaluer son effet sur les résistances mécaniques et les propriétés thermiques.

Ce travail est présenté en trois parties : une partie bibliographique, une partie expérimentale et une partie pour les résultats.

Dans le premier chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique qui combine lesgénéralités du béton de sable liquide, l'activité de recyclage et de recyclage des déchets deconstruction et les déchets granite, marbre, perlite et l'effet des déchets sur les propriétés des matériaux dans la construction.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les propriétés des matériaux de base, la formulation de béton sableux liquide et les techniques expérimentales utilisées pendant cette étude pour évaluer la durabilité:

- Etat frais (La densité apparent, étalement).
- Etat durci (La résistance à la compression, la porosité accessible, absorption d'eau parcapillarité, la vitesse ultrasonique, la conductivité thermique, la densité apparent).

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats et leurs interprétations. Les différentes résultats sont analysés indépendamment les uns des autres. Finalement, on terminera ce travail par une conclusion générale et des recommandations pour le future afin de bien contourner et compléter cette modeste étude, par l'initiation à la recherche.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

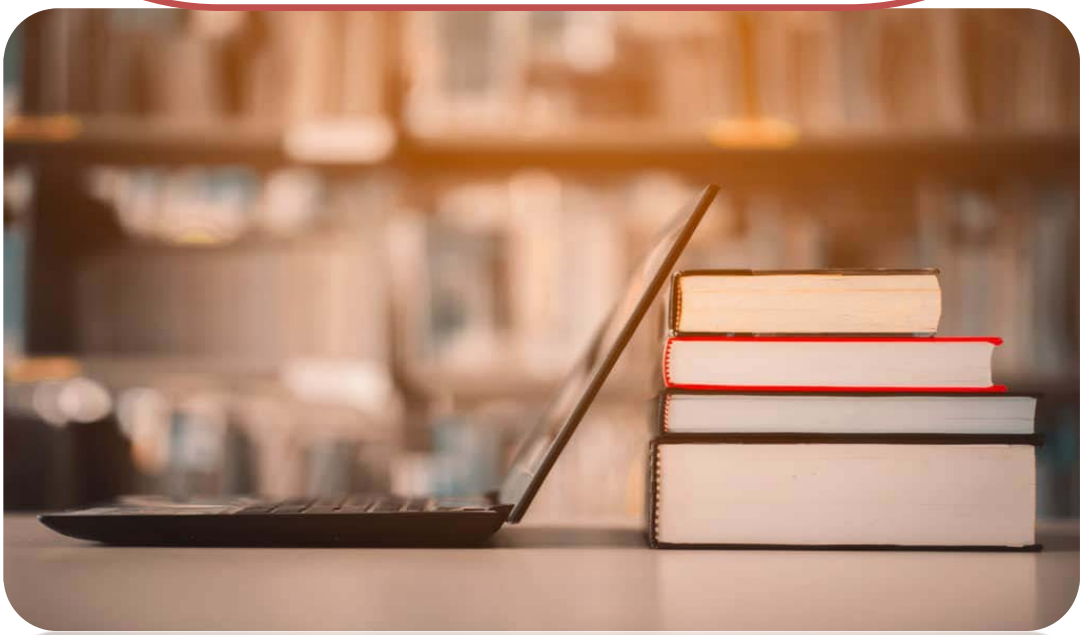
L’objectif de ce travail est triple :

Economique : la perlite de Maghnia, à l’instar des additions naturelles, peut constituer un composant du mortier substituable partiellement au ciment. Comme liant, la perlite peut assurer une économie dans la consommation du ciment dont le prix ne cesse d'augmenter et une réduction de sa fabrication portant préjudice à la qualité de l'air.

Ecologique :l’utilisation de la perlite en tant que substitut partiel contribue à freiner la cadence de la production du ciment et par conséquent à la diminution des quantités de gaz à effet de serre générées par sa la fabrication. Par ailleurs, de par les caractéristiques thermo-physiques des mortiers à base de perlite, ils peuvent contribuer à l’isolation thermique. Ceci permet de réduire les pertes d’énergie et ainsi préserver l’environnement et offrir un confort thermique.

Technologique : Une optimisation du pourcentage de substitution du ciment par la perlite naturelle de Hammam Boughrara (Maghnia), pour trouver un compromis entre les avantages et les inconvénients de cette substitution partielle, pour l’élaboration d’un mortier incorporant 10 et 20% de perlite, à performances proches ou égales à celles du mortier témoin.

Chapitre I
Synthèse Bibliographique



I.1.Valorisation et recyclage des déchets

I.1.1. Introduction

Depuis le regroupement des sociétés humaines dans des villes et des villages, les activités quotidiennes ont été sources de rejets de déchets. Qu'il s'agisse des excréments produits par tout être humain ou par les animaux d'élevages, de restes d'aliments non consommés, de sous-produits de l'artisanat puis de l'industrie, de biens de consommation généralisés par l'évolution socioéconomique des dernières décennies, la ville a toujours cherché à gérer sa production de déchets solides et liquides **[1]** .

La notion de déchet recouvre aujourd'hui une réalité de plus en plus présente. Toujours plus nombreux en quantité, toujours plus importante et toujours plus difficile à faire disparaître, les déchets s'imposent parmi les réflexions politiques incontournables. La nature ou l'origine des résidus permettent de distinguer les catégories de déchets dont l'élimination sera encadrée par des réglementations distinctes. C'est aussi en fonction de la nature ou de l'origine des déchets que les différentes filières d'élimination devront être empruntées avec, comme priorité, de faciliter le recyclage et la valorisation **[2]**.



Figure I.1 : Déchets industriels **[3]**.

I.1.2. Définition de déchets

L'évolution des concepts et des technologies, les exigences de plus en plus strictes en matière de protection de l'environnement et la révision des référentiels économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et le recyclage des sous-produits industriels deviennent aujourd'hui un enjeu de préoccupation homme **[1]**.

Le recyclage des déchets en génie civil est un secteur important, car les gens veulent des produits qui ne soient pas soumis à des normes de qualité trop strictes. La récupération et le recyclage des déchets ont deux effets très importants, le traitement de ces déchets pour résoudre l'impact environnemental, et l'utilisation de ces derniers dans le secteur industriel ou de la construction pour résoudre l'impact économique. Ce type de déchets présente les avantages suivants : grande quantité et faible valeur marchande **[1]**.

I.1.3. Définition de la valorisation

La valorisation des déchets est parfois appelée revalorisation des déchets ou encore recouvert en anglais. La loi du 13 juillet 1992 définit la valorisation comme « le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ».

La valorisation donne de la valeur aux déchets et s'oppose en cela à l'élimination. Il existe trois différents types de valorisation : la valorisation matière qui consiste à utiliser la matière du déchet pour un nouveau processus de production ; la valorisation organique qui repose sur le compostage et la méthanisation ; la valorisation énergétique qui est faite via l'incinération de déchets et permet de créer de la chaleur qui est utilisée pour alimenter les systèmes de chauffage et d'électricité **[4]**.

I.1.4. Les différents modes de la valorisation et traitement des déchets

a) Le recyclage

Ce procédé peut être défini comme la réutilisation d'un déchet, c'est un moyen de transformer des substances ou des matières en de nouvelles. Le but du recyclage est de limiter la consommation des ressources utilisées lors de la fabrication d'objets neufs. Cette

méthode de traitement des déchets permet de réduire les volumes des déchets ainsi que leur pollution, c'est une manière de préserver les ressources naturelles en réutilisant les matières premières déjà existantes.

La réutilisation, une forme de recyclage, est une opération de traitement des déchets qui consiste à utiliser de nouveau des substances ou des matières, les déchets réutilisés peuvent l'être dans une activité différente de celle d'origine. La réutilisation peut être une opération de réparation ou de nettoyage pour valoriser le produit devenu un déchet, ce produit est à nouveau préparé pour pouvoir être utilisé sans autre opération de prétraitement. C'est une intervention simple qui permet la réutilisation de la matière ou de l'objet peu importe la nature de ce dernier et l'usage pour lequel il a été créé à l'origine **[4]**.

b) La régénération

Ce processus de recyclage a pour but de redonner au déchet une partie de ses propriétés d'origine. Le traitement permet au déchet de retrouver ses performances originelles, le déchet peut à nouveau être utilisé pour des fonctions proches de ses fonctions d'antan. On utilise souvent la régénération pour les plastiques, les huiles, les solvants ou les gaz, des procédés de raffinage extraient la partie indésirable contenue dans le déchet, ce dernier est ensuite prêt à être réutilisé pour des fonctions similaires **[4]**.

c) Le réemploi

Ce principe est très simple : le déchet est employé à nouveau pour une utilisation similaire pour laquelle il a été créé. Le réemploi permet de réutiliser un déchet pour allonger sa durée de vie, c'est par exemple le cas des bouteilles en verre, consignées **[4]**.

d) La valorisation énergétique

Lorsqu'un déchet ne peut plus être exploité pour sa matière et qu'il n'est pas recyclable, il existe une autre solution : la valorisation énergétique. Le déchet est transformé en énergie comme la chaleur, l'électricité ou le carburant. Cette solution se substitue aux énergies fossiles.

La valorisation dans son ensemble, dont le but est que des déchets soient utilisés en substitution à d'autres matières ou produits, est aussi un type de traitement des déchets. Cependant, le traitement des déchets n'est pas le même suivant leur nature **[4]**.

I.1.5. Les type des déchets

Notre société produit une multitude de déchets que l'on peut classer en plusieurs catégories :

a) les déchets municipaux

Ils regroupent l'ensemble des déchets dont la gestion relève de la compétence de la collectivité (mairie, communauté de communes, etc.).

Cette catégorie de déchets comprend ainsi les ordures ménagères en mélange (ensemble des déchets produits par l'activité quotidienne des ménages), les déchets ménagers collectés séparément (recyclables), les déchets d'activités économiques assimilés aux déchets ménagers, les encombrants des ménages, les déchets collectés en déchetteries et les déchets dangereux des ménages **[5]**.

b) Les déchets industriels

Déchets de l'activité industrielle ne suivant pas la filière d'élimination des ordures ménagères (art. R541-8 du Code de l'Environnement). On trouve dans cette catégorie des déchets industriels banals (DIB), des déchets industriels dangereux (ancien DIS) et des déchets industriels inertes **[5]**.

c) les déchets du BTP

Ils regroupent l'ensemble des déchets produits par les activités de travaux du bâtiment **[5]**.

d) les déchets nucléaires

Ils nécessitent des techniques de précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement, ainsi que pour le transport et le stockage **[5]**.

e) les déchets ultimes

Déchets qui ne sont plus valorisables, ni par recyclage, ni par valorisation énergétique, ne pouvant plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment. Ils

sont alors réglementairement les seuls à pouvoir être enfouis (cf. art. L541-1 du Code de l'Environnement).

Il faut traiter tous ces déchets de diverses origines et compositions, en les recyclant, en les incinérant ou les enfouissant, dans le respect de normes en vigueur **[5]**.

I.1.6. Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous ; bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les sous produits industriels dans des conditions spécifiques **[6]**.

a) Déchets industriels dangereux mais non toxiques

Ce type de déchets regroupe généralement :

- ✓ Des déchets de fer, de cuivre, de plomb
- ✓ Des déchets contenant des fibres d'amiante
- ✓ Des produits de préservation du bois
- ✓ Des déchets solides dangereux de construction et de démolition de bâtiment

Caractère industriel.



Figure I.2 : Déchets industriel dangereux **[8]**.

b) Déchets inertes

Ce sont des déchets non susceptibles d'évolution physique, chimique ou biologique importante. Ils sont essentiellement constitués de déblais et gravats et ne doivent pas être mélangés avec d'autres déchets. Les dépôts de déchets inertes sont souvent à l'origine de décharges sauvages **[7]**.



Figure I.3 : Déchets inertes **[9]**.

c) Déchets toxiques

Ils sont à caractère industriel et obtenus en général après traitement chimique des matériaux synthétiques. Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques **[6]**.



Figure I.4 : Déchets toxiques **[10]**.

d) Déchets industriels dans des conditions spécifiques

Ils proviennent d'industries générant de très grandes quantités de déchets en sous produits industriels, dont les caractéristiques sont bonnes et relativement stables (cendres volantes les scories d'aciéries, le laitier, les cendre volante, etc.) **[6]**



Figure I.5 : Poudre de laitier (a), de granite (b) et de marbre (c) **[11]**.

e) Déchets ménager et assimilés [6]

Ce type de déchets regroupe :

- ✓ Des déchets en matériaux de synthèse
- ✓ Des déchets solides non dangereux de construction ou de démolition de bâtiment à caractère industriel.
- ✓ Déchets volumineux ou "encombrants" soit collectés en porte à porte, soit réceptionnés dans une installation mise à la disposition des ménages.

Déblais et gravats produits par les ménages réceptionnés dans des déchetteries ou des dépôts réservés aux seuls déchets inertes.

- ✓ Déchets ménagers spéciaux (DMS), ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.
- ✓ Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.
- ✓ Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, …).
- ✓ Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales comme les déchets plastiques.



Figure I.6 : Déchets ménager **[12]**.

f) Les déchets industriels banals (D.I.B.)

Appelés quelquefois déchets industriels assimilés aux déchets ménagers, sont constitués de déchets non dangereux et non inertes.

Ils contiennent effectivement les mêmes composants que les déchets ménagers mais en proportions différent **[6]**.



Figure I.7 : Déchets industriels banals (D.I.B.) **[13]**.

I.2. Perlite et déchets de perlite

I.2.1. Introduction

L'industrie cimentaire à une importance primordiale pour l'Algérie comme tout pays en voie de développement. Comme la production du ciment est une grande consommatrice d'énergie, elle pose des problèmes écologiques (dégagement des gaz à effets de serre : CO_2, CO, NOX, …etc.), l'utilisation des ajouts minéraux est une solution pour augmenter la production, réduire le prix de ciment et régler les problèmes d'environnement.

L'Algérie est riche en gisements volcaniques, comme le gisement de pouzzolane naturelle de Béni Saf qui est employé comme ajout minéral actif dans les usines locales de fabrication du ciment. D'autres gisements des roches volcaniques vitreuses se trouvent au Nord-Ouest de l'Algérie, tel que la perlite de Hammam Boughrara qui doit subir un traitement qui ne demande pas beaucoup d'énergie avant son utilisation.

La perlite est une roche volcanique aluminosilicate, en raison de sa nature vitreuse et de sa composition chimique (70-75% SiO_2 et 12-18% Al_2O_3) **[14] [15]**. Elle peut être utilisée comme ajout pouzzolanique **[16] [14] [17] [18]**. Il est très intéressant d'étudier cette roche en tant que matière première pour l'utiliser comme ajout minéral actif. Dans ce chapitre on va présenter un état de l'art sur la perlite. On s'intéressera seulement à l'effet de la perlite comme ajout pouzzolanique.

I.2.2. La Perlite naturelle

I.2.2.1. Définition

La perlite est une roche volcanique naturelle formée de lave siliceuse ou de cendre. En raison d'un refroidissement rapide, la lave ou les cendres se solidifient en une roche vitreuse. Pendant des dizaines de milliers d'années, les eaux de surface et souterraines emprisonnées dans la roche se retrouvent piégées dans une structure semblable à celle du verre. Lorsqu'elle est chauffée à haute température (750 à 1250°C), la perlite se dilate de quatre à vingt fois son volume d'origine sous l'effet de l'évaporation de l'eau **[19]**. La pierre volcanique éclate comme du pop-corn, ce qui entraîne la formation d'innombrables petites bulles d'air. Cette porosité confère à la perlite des propriétés physiques remarquables telles qu'une faible

conductivité thermique ainsi qu'une incroyable légèreté pour la perlite expansée. Ces caractéristiques exceptionnelles sont recherchées pour de nombreuses applications dans le domaine de la filtration, de la cosmétique, de la construction et de l'horticulture.

Dans l'industrie de la construction, la perlite est un bon isolant thermo-acoustique pour les murs creux et un additif retardateur de flamme à faible densité très utile. Elle répond idéalement aux critères de légèreté recherchés actuellement pour les matériaux de construction et le béton.



Figure I.8 : Déchet de perlite **[20].**

I.2.3. Origine de perlite

Les perlites sont issues de l'hydratation secondaire d'une obsidienne (roche magmatique effusive entièrement vitreuse) après son dépôt. La teneur en eau des perlites véritables varie de 2 à 5 %. L'eau y est sous forme libre (molécules H_2O) ou hydroxylée (ions OH-) **[21]**. La composition chimique globale d'une perlite est celle d'une rhyolite (roche magmatique effusive acide), avec une teneur en SiO_2, supérieure à 72 % et pouvant atteindre 75 %, une teneur en Al_20_3, de 12 à 15%, et une teneur en K_2O d'environ 4 à 5% **[21]** (Tableau I.1). Cette composition chimique influence directement sur le taux d'hydratation de l'obsidienne originelle. Mais la composition chimique de certaines perlites peut également correspondre à un verre andésitique ou dacitique, ces dernières variétés ayant toutefois une importance commerciale négligeable.

Outre la phase vitreuse, la perlite peut renfermer des minéraux résiduels, tels des phénocristaux de quartz, de feldspath, de biotite et de hornblende, et des microcristaux de magnétite, d'ilménite et d'hématite : tous ces minéraux ne peuvent être expansés par

chauffage. Certains faciès de perlite contiennent des reliquats d'obsidienne sous forme de petits corps arrondis de verre noir dénommés « marekanites ou larmes d'apache ». D'une manière générale, Les obsidiennes qui renferment naturellement moins de 2 % d'eau, s'expansés mal et à une température plus élevée que la perlite proprement dite. Il en est de même des Pechstein (rhyolites vitreuses brunâtres contenant environ 10 % d'eau).

Dans un gisement, après formation de la perlite, les pressions hydro et litho statique conduisent progressivement au cours du temps à une dévitrification partielle puis totale du dépôt politique. Cette dévitrification se manifeste en particulier par la cristallisation de tridymite, de quartz et de feldspath dans les lithophyses originelles de la coulée perlitique, et par la formation de sphérolites plus ou moins abondants et volumineux, jusqu'au stade d'un assemblage microcristallin de quartz et de feldspath. Le gisement peut également subir une altération hydrothermale conduisant à la formation de minéraux argileux et de zéolites, en particulier de smaltite et de clinoptilolite **[22]**. D'une manière générale, les minéraux issus de la dévitrification (quartz, tridymite et feldspath), les minéraux argileux et les zéolites sont considérés comme des matériaux stériles, car ils ne s'expansés pas.

En raison de cette dévitrification progressive au cours du temps, les gisements de perlite de qualité commerciale sont généralement d'âge tertiaire ou début quaternaire et sont rarement plus anciens que l'Oligocène. Des gisements d'âge crétacé sont toutefois exploités, notamment en Chine, mais les occurrences plus anciennes, trop dévitrifiées, ne présentent pas d'intérêt commercial. Les obsidiennes trop récentes n'ont également pas d'intérêt, car elles ne sont pas à un stade d'hydratation suffisamment avancé. Le tableau I.1 donne les compositions chimiques des différentes perlites issues de plusieurs pays.

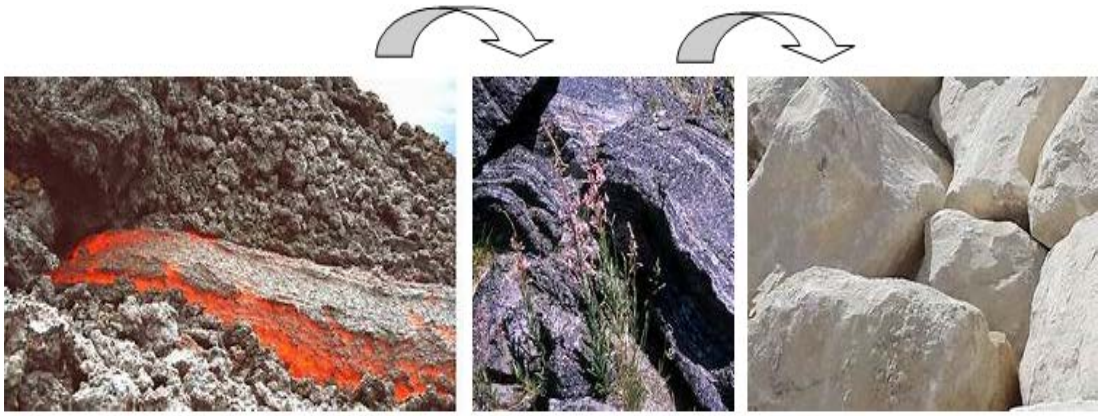


Figure I.9 : Origine de la perlite **[23]**.

Tableau I.1 : Compositions chimiques d'une sélection de perlites typiques commercialisées **[21].**

		SiO_2	AL_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	H_2O^+
Grece	(Milos)	74.20	12.30	0.95	0.08	0.85	0.13	4	4.40	2.80
Turquie	(Biga)	73	13.80	0.70	0.20	0.70	0.25	3.25	4.50	3.70
Italie	(Monte, sparau, sardaigne)	72.80	13.80	2.10	0.30	0.90	0.40	3.30	5.60	Nd
Bulgarie	(schupenata	73.80	12.8	0.56	0.07	0.50	0.03	3	4.90	4
Hongrie	(palhaza)	73.50	13	1.80	-	1.50	0.40	3.50	3.80	3
USA	No Agua (nouveaeau Mexxique	72.10	13.50	0.80	0.06	0.89	0.50	4.60	4.40	372.
	Pioche (nevada)	73.10	12.80	0.70	0.08	0.90	0.20	3	4.70	3.90
	Fish Springs (californée	75	13.20	0.70	n.d	0.50	trac	4.30	4.60	3.20
Argentine	Rio Negro	72.30	13.40	1	0.08	0.59	0.30	3.40	4.70	3.70
Arménie	Aragafs	73	12.40	0.70	0.05	0.40	0.10	4.50	4.90	3.50
Russie	Sibérie	72.80	14.15	0.17	n.d	0.82	-	2.50	4.35	?
Japon	Akita	74.20	12.90	0.68	0.06	0.45	0.05	4.10	4	3.30
chine	Xinyang (henan)	72	12.31	1.34	n.d	1	0.14	3.29	4.67	?

I.2.4. Caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de la perlite

Les différentes variétés de perlites se sont formées d'un même magma acide, fortement différencié, de nature essentiellement rhyolitique, plus rarement rhyodacitique **[24]**. En ce qui concerne la texture des perlites, on admet qu'elle correspond au stade final du processus de formation, au moment où le magma s'est solidifié en roche. La composition chimique des différentes variétés de perlites est déterminée par les processus de différenciation ayant eu lieu dans le magma au cours de son ascension, tandis que leur composition minéralogique est conditionnée par la vitesse ascensionnelle du magma, les paramètres thermiques et les conditions de solidification de la roche **[25]**. La perlite moins hydratée ou moins perlitisée a une couleur noire et la perlite plus hydratée ou perlitisée prend la couleur grise avec la présence des perles en verre **[18]**.

I.2.4.1. Caractéristiques physiques de la perlite

Les plus importantes propriétés physiques de la perlite sont énumérées dans le tableau I.2.

Tableau. I. 2 : Propriétés physiques de la perlite brute **[15]**.

Désignation	propriété	Désignation	propriété
Couleur	Grise, brune, noire, verte.	Dureté	5.5 à 7 (échelle de Mohs)
Masse volumique absolue	2.3 à 2.8 g/cm³	Point de fusion	1260-1343°C
Masse volumique apparente	1.2 à 2.35 g/cm³	Température d'expansion	600 à 1100°C
Rapport d'expansion	10 à 20 (volume)	Rétention d'eau	35 à 50 %
PH	6.5 à 8.0	Densité	2.2 à 2.4
Densité apparente	32-400 kg/m³	Chaleur spécifique	387 J/kg K
Point de ramollissent	871-1093°C	Conductivité thermique (a 24 °C)	0.04 à 0.06 W/m.K

I.2.4.2. Caractéristiques chimiques de la perlite

La composition chimique typique de la perlite brute montrée dans le tableau I.3. Il apparait une prédominance de la silice, élément déclencheur de la réaction pouzzolanique, suivie de l'alumine.

Tableau I.3 : La composition chimique typique de la perlite brute **[14]**.

Désignations	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO	H_2O
Teneur%	71.0 à 75.0	12.5 à 16	2.9 à 4	4.0 à 5.0	0.2 à 0.5	0.5 à 1.45	0.03 à 0.5	3.05 à 5.16

I.2.4.3. L'activité pouzzolanique de la perlite

Depuis longtemps, l'activité pouzzolanique des ajouts a été associée à la phase vitreuse. Des procédés industriels ont même été mis en œuvre afin d'obtenir cette structure particulière (formation de métakaolin ou de laitiers métallurgiques vitrifiés) **[26]**. Les ajouts minéraux peuvent être constitués d'une structure amorphe ou cristallisée, en fonction du degré

d'ordre de leur arrangement atomique. La silice peut se présenter sous la forme vitreuse (verre siliceux, silica gel, fumée de silice) ou cristallisée (quartz, cristoballite) **[27]**. Il existe des méthodes pour estimer l'activité pouzzolanique des additions minérales, citons quelques-unes:

- L'indice d'activité Chapelle selon la norme **[NF P18-513]** : Cette méthode consiste à suivre la quantité d'hydroxyde de calcium fixée par la pouzzolane dans des conditions très précises en déterminant la quantité d'hydroxyde de calcium résiduelle après une conservation de 24 heures du matériau dans une solution contenue de chaux à 90°C. Cette détermination peut donner des indications utiles pour suivre la cinétique de fixation et la quantité d'hydroxyde de calcium « fixable » condition nécessaire à l'activité pouzzolanique.
- Test de Frattini selon la norme **[NF EN196-5]**. La pouzzolanicité est appréciée en comparant la quantité d'hydroxyde de calcium (CH) présente dans la solution aqueuse au contact du ciment hydraté, après une période de temps déterminée, avec la quantité de CH pouvant saturer une solution de même alcalinité. L'essai est considéré comme positif si la concentration de CH en solution est inférieure à la concentration de saturation. L'expérience a montré qu'en opérant avec 20g de ciment pour 100mL d'eau à la température de 40°C, l'équilibre est atteint après une période de 8 jours ou 15 jours.
- Fixation d'hydroxyde de calcium pendant le durcissement (DRX ou ATG/TD). L'activité pouzzolanique est évaluée par la consommation de la chaux des pâtes. Le degré d'activité est évalué par des observations des pâtes par DRX à différentes échéances. La consommation de chaux est quantifiée par ATG/TD.

Ray et al. [28] Ont montré par analyse thermique différentielle ATD (Figure I.10) que la réactivité de la perlite est semblable aux deux ajouts étudiés : la fumée de silice et la cendre volante.

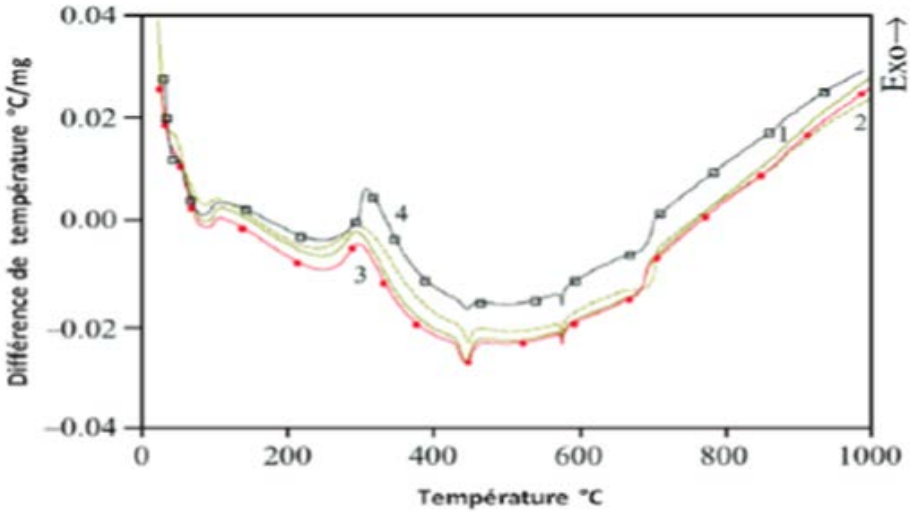


Figure I.10: ATD des mortiers à 7 jours 1-Témoin 2-Perlite 3- Cendre volante **[28]**.

D'autres chercheurs **[29]** ont étudié l'influence de 5% de filler calcaire (mortier témoin), 5% de la perlite et 5% de cendre volante comme substitution en poids de ciment, par l'analyse DRX, ATG/TD et les photos MEB. Ils ont trouvé qu'à 28 jours, les hydrates dans les trois mortiers sont les mêmes (portlandite, CSH et ettringite), avec une diminution de la portlandite dans les mortiers à base de perlite et de la cendre volante par rapport au mortier de référence, cela est due à l'activité pouzzolanique de ces deux ajouts.

Hamadache [30] a testé l'activité pouzzolanique de la perlite et de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf selon la norme NF EN196-5. La perlite satisfait à l'essai de pouzzolanicité, le point tracé se trouve au-dessous de la courbe de concentration de saturation d'ions calcium (Figure I-11).

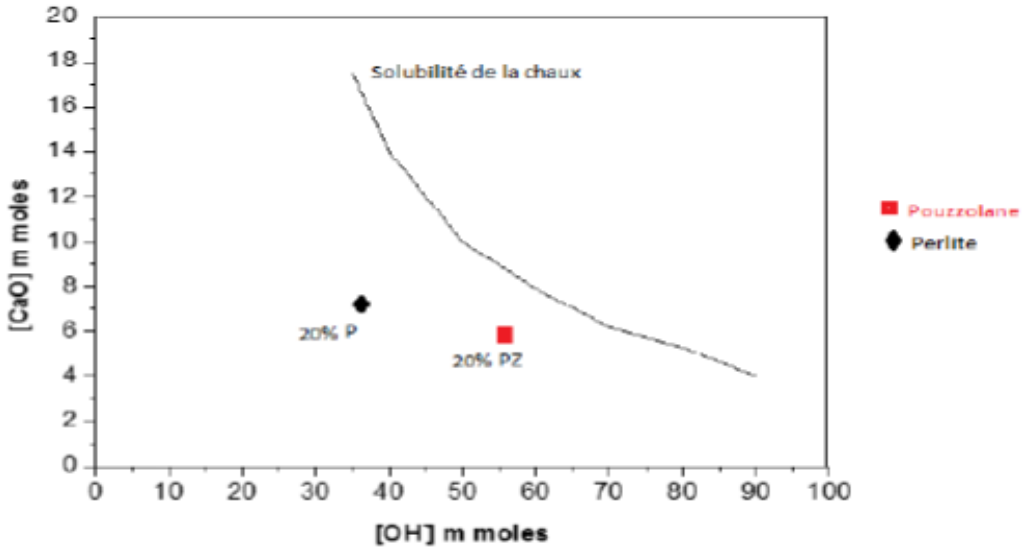


Figure I.11 : Localisation des ajouts pouzzolanique selon le graphe de Frattini **[30]**.

Chihaoui [18] a testé l'activité pouzzolanique de la perlite par l'essai Chapelle. Le résultat obtenu concernant la consommation de la chaux (Ca (OH) 2) par la perlite est 705 mg de (Ca (OH) $_2$) fixés par un gramme de perlite. En comparant le degré de consommation de la chaux par la perlite à ceux rapportés par **Senhadji** [**30]**, on trouve qu'il est supérieur à celui de la pouzzolane naturelle (580 mg/g), comparable à celui du métakaolin (700 mg/g) et inférieur à celui de la fumée de silice (980 mg/g).

La perlite répond aux exigences de la norme [ASTM C618] et elle peut être considérée comme ajout pouzzolanique (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Conformité de la perlite selon la norme ASTM C618 [**32]**.

Propriétés	Chihaoui, 2018	Erdem T.K. et ai.2007	ASTM C 618
SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3(%)	88.65	87.52	M*in. 70.0*
SO_3(%)	0.01	0.04	Max.4.0
Perte au feu(%)	4.20	4.22	Max. 10.0
Refus 45 µm(%)	14	31	Max. 34
Indice d'activité			
7- jours(%)	/	80.3	Min. 75
28- jours(%)	86	81.9	Min.75
Demande en eau(%)	105	103	Max. 115

I.2.5. Production de la perlite dans le monde

Les réserves de la perlite sont généralement situées dans les régions volcaniques du début tertiaire ou quaternaire. Des informations détaillées sur les réserves et la production de la perlite sont résumées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Réserves et productions mondiales de la perlite (mille tonne) [USGC, 2018].

Pays	**Production**			**réserve totale**
	2015	2016	2017	
Etats –unis	459	513	520	50000
Chine	1800	1800	1800	EI
Grèce	1000	1490	1550	120000
Bulgarie	40	30	50	28000
Iran	60	60	60	EI
Mexico	26	28	40	EI
Turquie	925	950	1000	57000
Autres	70	112	120	EI
Total	**4380**	**5000**	**5100**	**EI**

Avec

EI : Estimation indisponible

Les principaux producteurs de perlite dans l'ordre décroissant en 2016, sont la chine, la Grèce, la Turquie et les Etats-Unis avec 35%, 30%, 20% et 10% de la production mondiale respectivement. Bien que la chine soit le principal producteur, la majeure partie de sa production de perlite était consommée intérieurement. La Grèce et la Turquie sont restées les principaux exportateurs de perlite [USGC, 2018].

I.2.6. Production de la perlite en Algérie

La perlite existe dans les roches volcaniques et sédimentaires au Nord-Ouest de Tlemcen près de Hammam Boughrara (Maghnia) (Figure I.12). Les gisements sont localisés près des routes et peuvent apparemment être exploités à ciel ouvert (Tableau 1.6).



Figure I.12 : Gisement Bab à Hammam Boughrara (Tlemcen) **[32]**.

Tableau I.6. Les principaux gisements de la perlite en Algérie **[33]**.

Réserve ou paramètres estimatifs en tonnes	Conditions techniques et minières	Composition chimique(%) ou propriétés physico-mécaniques
Secteur principal : 142500 Secteur Bab:196000 Secteur Roussel : 15000	Favorables (Inexistence de roches de recouvrement)	SiO_2=71.68, Al_2O_3=12.69 Fe_2O_3=1.34, CaO=1.08 MgO=0.55, K_2O=3.91 Na_2O=3.62, FeO=0.49 SO_3=0.08, P_2O_5=0.05 PF=3.53 (perte aux feux%)
Considérables	Favorables	SiO_2=71.38, Al_2O_3=14.25 Fe_2O_3=2.19, CaO=0.7 MgO=0.35, K_2O=3.30 Na_2O=4.00, FeO=1.15

I.2.6.1. Volcanisme de la région de Hammam Boughrara

Les formations volcaniques de la région sont représentées par des rhyolites et des basaltes. Sadran **[34]** distingue dans cette région quatre pitons rhyolitiques indépendants qui coupent les sédiments du miocène synchro-nappe. Ces pitons sont les suivants :

- Ain Torba, Hammam Boughrara, Oued el Maleha, Bled el Rekiza. Ils sont souvent associés à des argiles smectiques (dépôts pyroclastiques) et à des matériaux rhyolitiques remaniés. Parmi les 4 pitons ceux d'Ain Torba et de Hammam Boughrara sont les plus importants par leur taille avec un volume d'environ 1km^3 **[35]**. Ils apparaissent sous forme de massifs érodés assez bien développés et bien visibles dans le paysage et sur les cartes géologiques (Figure I.13). Le piton d'Ain Torba est associé au gisement de bentonite exploitée dans la région (carrière roussel).



Figure I.13 : Localisation du gisement de Hammem Boughrara (TLEMCEN) [**32]**.

Cette perlite est extraite sous forme de roches de diamètres variant de 20 à 50 cm, de couleur grise, à l'aspect d'un verre avec des reflets argentés, elle réfléchit la lumière suivant certains plans internes et elle se fragmente en petites sphères ou perles d'où vient son nom « perlite » (Figure I.14.a). Elle est concassée (Figure I.14.b) puis étuvée pendant 24 heures à une température de 80°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité, ensuite broyée et tamisée à travers un tamis de 80 μm (Figure I.14.c). Le passant sera utilisé en substitution du ciment Portland.



Figure I.14 : Perlite naturelle (a), concassée (b), broyée (c) **[32]**.

La composition minéralogique de perlite, obtenue par un diffractomètre à Rayon X (DRX) effectuée au laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim, a donné les résultats illustrés dans la figure I.15.

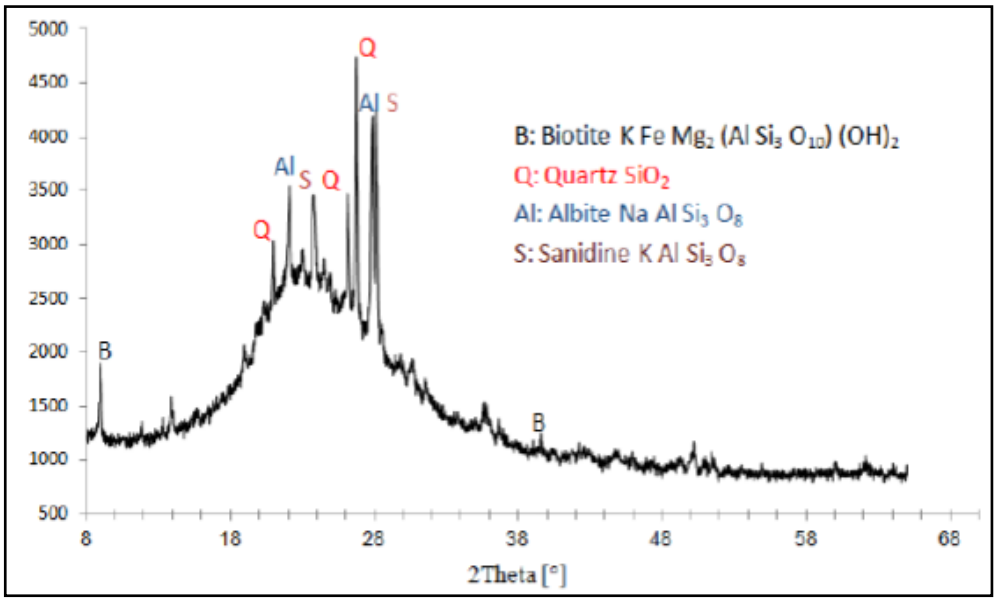


Figure I.15 : L'analyse aux rayons X de la perlite **[32]**.

L'analyse aux rayons X de perlite présente une remarquable bosse qui signifie une importante teneur en silice amorphe et des pics qui caractérise la phase cristalline tel que la biotite le quartz, l'albite et le sanidine. La superposition des trois DRX de la perlite, PZ et FS est illustrée dans la figure I.16. D'après Cyr **[27]**, la diminution de l'intensité des pics dans le DRX indique l'augmentation du degré de désordre dans un matériau (phase amorphe). Nous observons que l'intensité des pics du DRX de perlite est moins importante que l'intensité des

pics de DRX du PZ. Aussi, le DRX de perlite présente une remarquable bosse par rapport à ce du PZ. L'absence de la phase cristalline pour la FS est la présence d'une remarquable bosse, indiquant que la FS est un matériau totalement vitreux. D'après la superposition des DRX, nous pouvons classer la teneur en verre de la perlite (PR) entre la PZ et la FS.

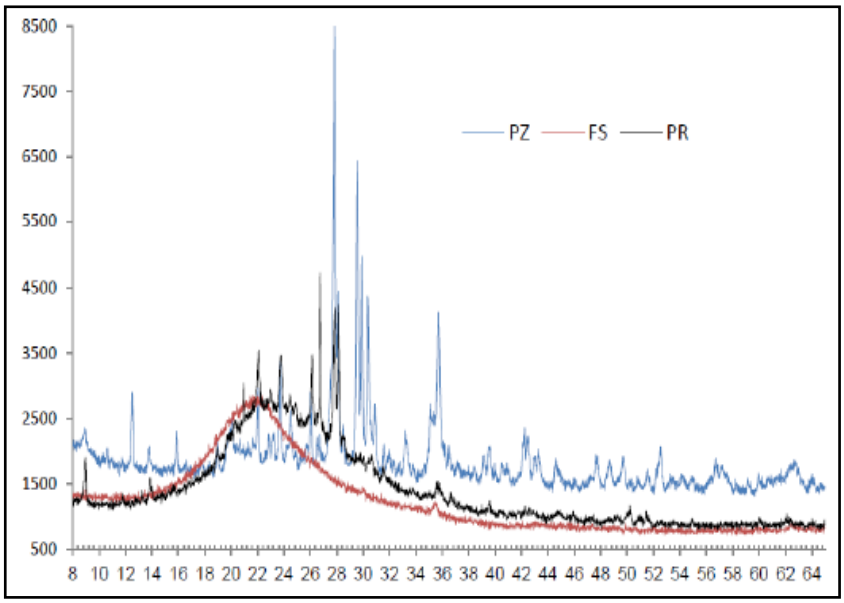


Figure I.16 : Superposition des DRX de la perlite, pouzzolane et fumée de silice **[32]**.

I.2.6.2. La composition chimique de la perlite broyée

La composition chimique de la perlite, est obtenue par la méthode de fluorescence X en utilisant le spectromètre de fluorescence X du laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim (Tableau I.7).

Tableau I.7 : Composition chimique élémentaire de la perlite de Hammam Boughrara (%) **[32]**.

CaO	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**SO_3**	**K_2O**	**Na_2O**	**MgO**	**Cl**	**PAF**
0.14	72.01	15.70	1.81	0.01	4.10	1.70	0.20	0.01	3.99

La qualité d'une pouzzolane est liée à sa teneur en verre. Les teneurs en silice et en chaux sont les deux éléments qui influent sur le résultat de la teneur en verre. Un critère

chimique simple est proposé par la littérature **[36]** pour la sélection des pouzzolanes sur la base de leur teneur en phase vitreuse : il s'agit de la différence entre les teneurs brutes en silice et en chaux (SiO2 – CaO), facile à déterminer par les méthodes chimiques courantes. Lorsque cette différence est inférieure à une valeur seuil, voisine de 34 %, les pouzzolanes ne comportent pas de phase vitreuse. Les pouzzolanes les plus acides, c'est-à-dire contenant une teneur importante en silice et peu de chaux, sont en général les plus vitreuses.

L'analyse chimique a montré que la perlite contient 72,01 % de silice et environ 0,14 % de chaux (Tableau II.4). Nous pouvons donc affirmer que cette perlite contient une grande phase vitreuse, la différence entre la silice et la chaux est de 71,87 %, nettement supérieure à 34 %. Selon la norme ASTM C 618, cette perlite peut être considérée comme ajout pouzzolanique de classe N (Tableau I.8).

Tableau. I.8 : Conformité de PR selon la norme ASTM C618 **[32]**.

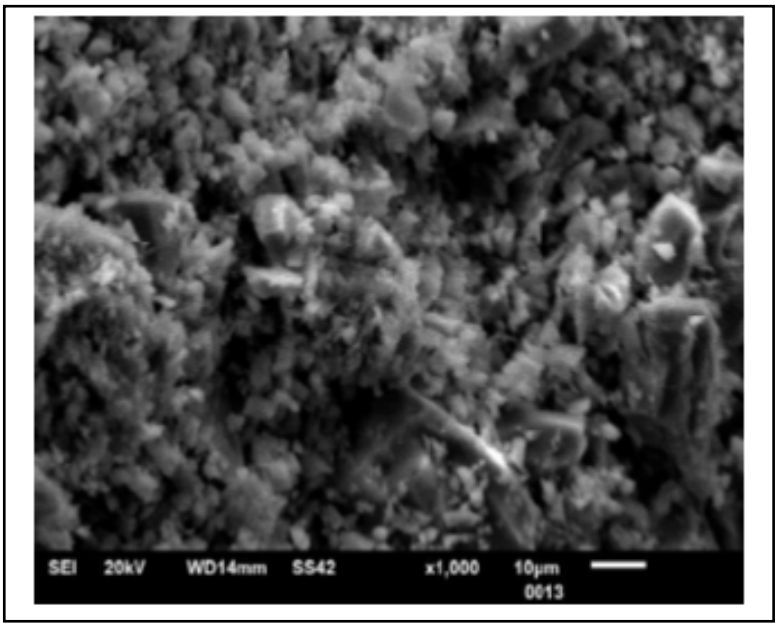
Propriétés	**Perlite**	**ASTM C 618**
SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 (%)	89.52	Min. 70.0
SO_2 (%)	0.01	Max.4.0
Perte au feu(%)	3.99	Max.10.0
Refus 45µm(%)	19.2	Max.34
Indice d'activité		
7-jours (%)	78	Min. 75
28-jours(%)	80	Min.75
Demande en eau (%)	104.7	Max. 115

Les caractéristiques physiques de la perlite utilisée déterminées au laboratoire de la cimenterie de Lafarge-Holcim sont regroupées dans le tableau I.9, montre le résultat d'analyse granulométrique par laser de la perlite.

Tableau I.9 : Caractéristiques physiques de perlite **[32]**.

Désignation	**PR**	**Appareillages et normes**
Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)	4180	Perméabilimètre de Blaine, Norme **NF EN 196-6**
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.43	Densimètre a l'hélium
Refus 45µm (%)	19.2	Norme **NF EN 196-6**

La photo MEB et l'analyse EDS de perlite brute sont effectuées au laboratoire LMESM de l'USTO/MB et celles de PR broyé au laboratoire LSTGP de l'USTO/MB. La photo MEB de la perlite brute illustrée dans la figure I.18 indique que cette perlite à une porosité élevée, et l'analyse EDS confirme la teneur importante en silice et en alumine par rapport aux autres oxydes. Après broyage de perlite, les grains prennent une forme angulaire (Figure I.17).



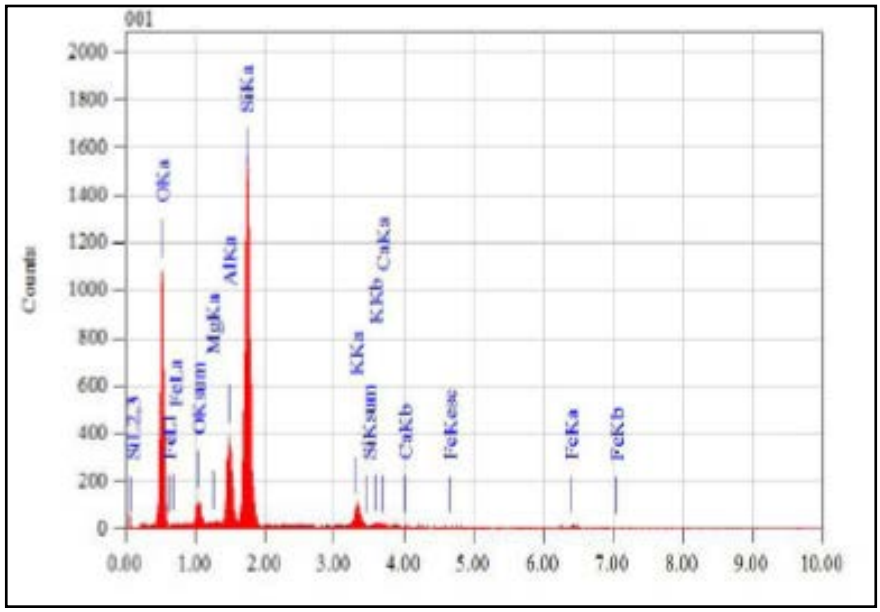


Figure I.17 : Photo MEB et EDS de perlite brute **[32]**.

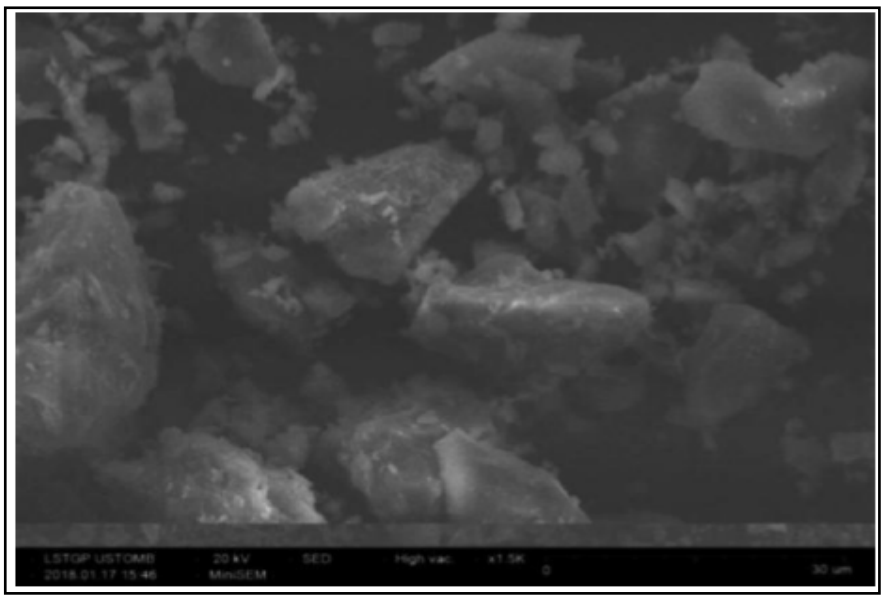


Figure I.18 : Photo MEB de perlite broyée **[32]**.

I.2.7. Traitement et méthodes d'exploitation de perlites

L'exploitation à ciel ouvert est la seule méthode d'extraction économique. La plupart des exploitations de perlite utilisent soit le ripage, soit l'explosif, ou une combinaison des deux procédés. Quand le minerai perlitique est suffisamment tendre et friable, l'utilisation d'un

ripeur est la plus économique. En revanche, lorsque le minerai est résistant, la création de gradins et l'utilisation d'explosifs sont nécessaires. Dans ce cas, il faut veiller à ce que la fragmentation du massif ne produise pas trop de fines ou, à l'inverse, de blocs de grandes dimensions. Le minerai est ensuite chargé sur des camions ou, lorsque la forme du plancher de la carrière le permet, il peut être directement récupéré par un scraper, puis transporté jusqu'à l'installation de broyage de l'usine de traitement. Une extraction sélective est couramment effectuée lorsque la qualité du minerai est variable ou les substances contaminants (argile, obsidienne) sont abondantes. Dans certains cas, lorsque le gisement renferme des minerais perlitiques de textures variables, ces derniers peuvent être mélangés pour produire un minerai composite présentant des caractéristiques de broyage constantes et, en définitive, des propriétés régulières pour les utilisateurs.

I.3.Granite et déchets de granite

I.3.1. Introduction

Le granite est une roche magmatique plutonique à texture grenue, c'est-à-dire entièrement cristallisée et composée de minéraux bien développés et visibles à l'œil nu. Celle-ci est le résultat du refroidissement lent, en profondeur, de grandes masses de magma qui formeront des plutons, ces derniers étant actuellement en surface grâce au jeu de l'érosion qui a décapé les roches sus-jacentes. Ces magmas, acides (c'est-à-dire relativement riches en silice) sont essentiellement le résultat de la fusion partielle de la croûte terrestre continentale. Certains granites (plagio-granites) rencontrés en petits plutons dans la croûte océanique sont, quant à eux le résultat de la différentiation ultime de magmas basiques **[37]**.

Les granites sont formés de minéraux en grains (cristaux), tous visibles à l'œil nu ; cette apparence leur vaut leur nom dérivé du latin granum, grain. Ces minéraux sont principalement du quartz, des micas (biotite et/ou muscovite), des feldspaths potassiques (orthoses) et des plagioclases. Ils peuvent contenir également de la hornblende, de la magnétite, du grenat, du zircon et de l'apatite. En tout, on dénombre aujourd'hui plus de 500 couleurs de granites différentes. Les roches volcaniques correspondantes sont les rhyolites. La composition chimique moyenne du granite est : SiO_2 : 72.5 %, $Al2O_3$: 14 %, (Na_2O, K_2O) :

9.5 %, oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca) : 2 %.Le granite est une roche acide, dense (densité moyenne : 2,7). Le granite et ses roches associées forment l'essentiel de la croûte continentale de la planète. Les plus gros monolithes granitiques du monde se trouvent dans le parc du Yosemite, en Californie **[37]**.

I.3.2.Définition

Le granit est une pierre naturelle et plus précisément une roche magmatique présente au cœur de l'écorce terrestre. Elle se décline en différentes couleurs, à savoir le blanc, le noir, le rose, le gris, le bleu ou encore le rouge et profite d'une grande solidité. Ses veines, tâches, inclusions et micro fissures sont uniques pour chaque morceau taillé puisque chaque roche est unique ! Le granit se compose de feldspath alcalin et de quartz, il est présent partout dans le monde. Il est plus accessible que le marbre et ses rainures sont parfois semblables à celles du marbre. Cette pierre naturelle n'est pas poreuse et cela lui permet d'être naturellement antidérapante. Ainsi, elle se destine à un usage intérieur et extérieur **[38]**.



Figure I.19 : Déchets de granite **[39]**.

I.3.3. Les déférents types de granites

Le granit se décline en différent modèle grâce à son large panel de couleurs, mais il garde la même composition. Par conséquent, les critères de choix qui différencient les différents granits, son l'utilisation, la couleur et les motifs naturellement présent sur la pierre. Du côté des couleurs, le granit peut être rouge, orange, jaune, bleu, gris, noir, blanc, rose, vert

et violet. Généralement, il mélange plusieurs couleurs, ce qui lui permet d'obtenir des designs uniques ! En effet, les granits arborent des motifs particuliers formés naturellement, ils sont uniques pour chaque morceau de roche. Vous retrouvez :

- Les veines
- Les microfissures
- Les tâches
- Et les inclusions

Ensuite, le granit se décline en différents matériaux. Vous retrouvez par exemple des dalles en granit**,** du carrelage en granit, des plans de travail en granit ou encore pour la réalisation de décorations intérieures comme les figurines ou les statuettes. Évidemment, chaque utilisation diffère, par conséquent, il faut choisir un granit adapté pour cela **[39]**.

I.3.4. Domaine d'utilisation de granite

Le granit s'utilise dedans, dehors, comme revêtement mural ou revêtement de sol. Voici quelques exemples d'utilisation du granite **[39]**.

a) Le granite dans la cuisine

Dans la maison, le granit prend place dans la cuisine et devient un plan de travail résistant à la préparation des repas. Son design naturel permet de réchauffer l'ambiance de la cuisine et il convient de le choisir en fonction de la décoration pour encore plus de cachet. Toutefois, faites attention à son poids. En effet, si le granit est résistant, c'est avant tout parce qu'il est vraiment très lourd : en moyenne 50 kg au m^2. Par conséquent, la mise en place et la découpe d'un plan de travail en granit passe obligatoirement par un professionnel aguerri **[39]**.

b) Le granite dans la salle de bain

Le granit s'utilise dans la salle de bain, en carrelage, en mosaïque ou encore en dalles sur le sol et les murs. Sa haute résistance, vous permet de réaliser une salle de bains durable et élégante **[39]**.

c) Le granite sur la terrasse et dans le jardin

Le granit est une roche capable de résister aux intempéries et aux variations de température. Voilà pourquoi, il peut facilement prendre place sur la terrasse ou être utilisé dans les allées du jardin. En plus, il est naturellement antidérapant **[39]**.

I.3.5. Origine, composition et densité du granite

La dureté du granit en fait l'une des pierres naturelles les plus utilisées aujourd'hui, pour les applications intérieures et extérieures. Le granit est une roche plutonique éclatante qui se forme lorsque le magma (aluminium fondu) se refroidit lentement à de grandes profondeurs dans la croûte terrestre.

Ce qui le rend très dur. Ce refroidissement continu permet la formation de gros cristaux, ce qui lui offre la texture cristalline distinctive du granit. Les principaux minéraux du granit sont le quartz (jusqu'à 60 %), le feldspath et le mica et, esthétiquement, c'est une pierre qui a généralement un aspect grainé et une texture épaisse. La dureté et la couleur du granit dépendent de sa composition chimique spécifique – plus le granit est foncé, plus la proportion de quartz est faible, et donc moins elle est dure **[40]**.

I.3.6. Les propriétés du granite

- **Les propriétés physiques du granite :**

Le granit est une roche magmatique qui possède des propriétés physiques remarquables, ce qui en fait un matériau de choix pour l'industrie de la construction et de l'aménagement **[41]**.

- **Résistance et dureté**

Le granit est une roche très résistante et durable. Il est dur et peut résister à l'usure, aux rayures et aux taches. Cette propriété en fait un choix populaire pour les comptoirs de cuisine, les planchers et les façades de bâtiments **[41]**.

- **Densité**

Le granit est une roche dense, ce qui lui donne une sensation de solidité et de robustesse. Cette propriété le rend résistant à l'usure, aux impacts et aux pressions **[41]**.

- **Variété de couleurs**

Le granit est disponible dans une large gamme de couleurs, allant du blanc au noir, en passant par le rose, le gris et le jaune. Cette variété de couleurs permet aux architectes et aux designers de choisir le granit qui convient le mieux à leur projet **[41]**.

- **Les propriétés chimiques du granite :**

Le granit est une roche magmatique qui possède une composition chimique complexe et variée. Sa composition chimique varie en fonction de sa formation géologique. Cette composition en minéraux confère au granit sa résistance à l'acidité et sa durabilité. Voici quelques-unes de ses propriétés chimiques les plus importantes **[41]**.

- **Composition en minéraux**

Le granit est principalement composé de trois minéraux : le feldspath, le quartz et le mica. Les proportions de ces minéraux peuvent varier en fonction de la formation géologique de la roche. Les différents types de granit sont ainsi classés en fonction de leur composition minérale **[41]**.

- **Réaction à l'acidité**

Le granit est résistant à l'acide en raison de sa composition en minéraux. Il peut résister à des produits de nettoyage acides tels que le vinaigre et le jus de citron. Cependant, il est important de noter que certaines pierres de granit peuvent contenir des minéraux qui sont plus sensibles à l'acidité. Il est donc important de tester la résistance du granit avant de l'utiliser dans des projets qui pourraient être exposés à des produits acides **[41]**.

- **Les propriétés thermiques du granite :**

Le granit est une roche qui possède de nombreuses propriétés thermiques, voici quelques- unes des plus importantes **[41]**.

- **Conductivité thermique**

Le granit est un matériau qui conduit très bien la chaleur. Sa conductivité thermique est élevée, ce qui le rend très utile dans les projets de construction nécessitant une régulation thermique. Le granit peut ainsi être utilisé dans la construction de cheminées, de plans de travail de cuisine, ou encore de dalles de sol pour une régulation thermique efficace **[41]**.

- **Résistance à la chaleur**

Le granit est également très résistant à la chaleur. Il peut supporter des températures élevées sans se déformer, ni se fissurer. Cette propriété en fait un matériau de choix pour les projets de construction nécessitant une résistance à la chaleur, tels que les revêtements de cheminées ou les plans de travail de cuisine **[41]**.

- **Dilatation thermique**

Le granit a une faible dilatation thermique, ce qui signifie qu'il ne se dilate pas beaucoup lorsqu'il est exposé à des températures élevées. Cette propriété est importante dans

les projets de construction où des matériaux de différents types sont utilisés ensemble. Le granit peut ainsi être utilisé pour des joints de dilatation afin d'éviter les fissures causées par la dilatation thermique **[41]**.

I.3.7. Influence des déchets de granite sur les propriétés des matériaux cimentaires

I.3.7. 1.Influence à l'état frais

- ✓ **Maniabilité**

Peem Nuaklong et al. **[42]** Ont étudié l'effet de déchet de granite sur la maniabilité de béton, Ils ont rapporte que plus le pourcentage de déchets de granite augmente plus la maniabilité est augmente.

Houria Hebhoub et al. **[43]** Ont étudié l'influence de substitution du (25%,50%,75% et 100%) du sable par la poudre de granite sur l'ouvrabilité du béton. Ils ont constaté que l'affaissement est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de granite jusqu'à 75%

Naamaoui et al. **[44]** ont trouvé que l'étalement d'un BAP est augmenté en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre de granite.

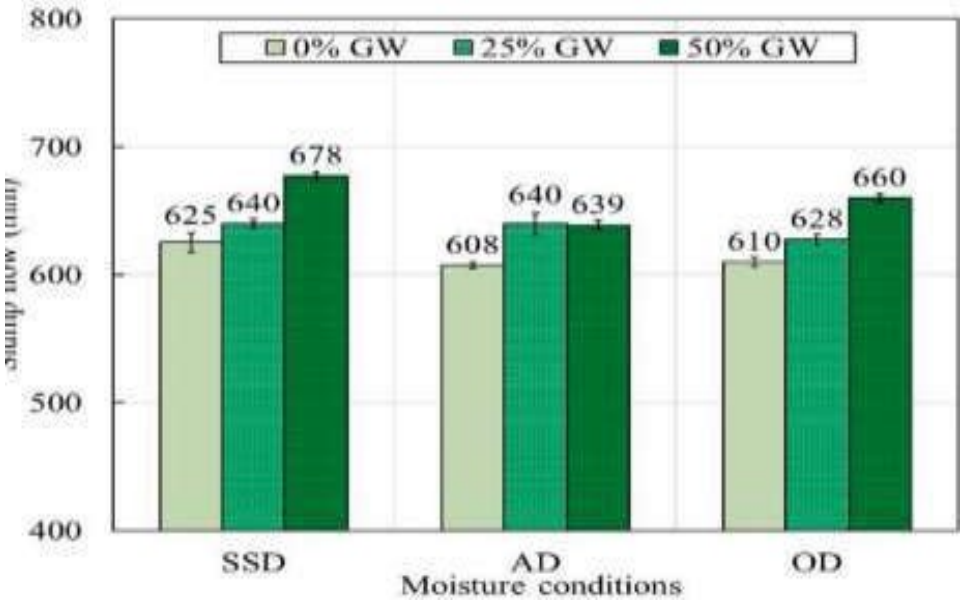


Figure I.20 : La maniabilité de béton à base de déchets de granite [**42**].

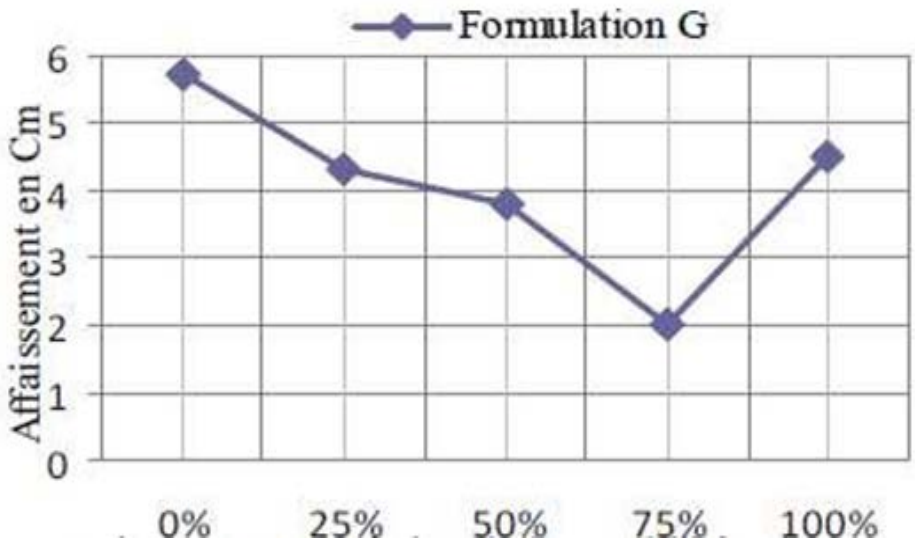


Figure I.21 : L'affaissement au cône d'Abrams en fonction de pourcentage de substitution de granite [**43**].

- ✓ **Densité**

Houria Hebhoub et al. [**43]** Ont étudié l'influence de substitution du (25%,50%,75% et 100%) sable par le granite sur la densité du béton vibré. Ils ont trouvé que la densité est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de granite. C'est mêmes résultats trouvées par Naamaoui et al [**44]**.

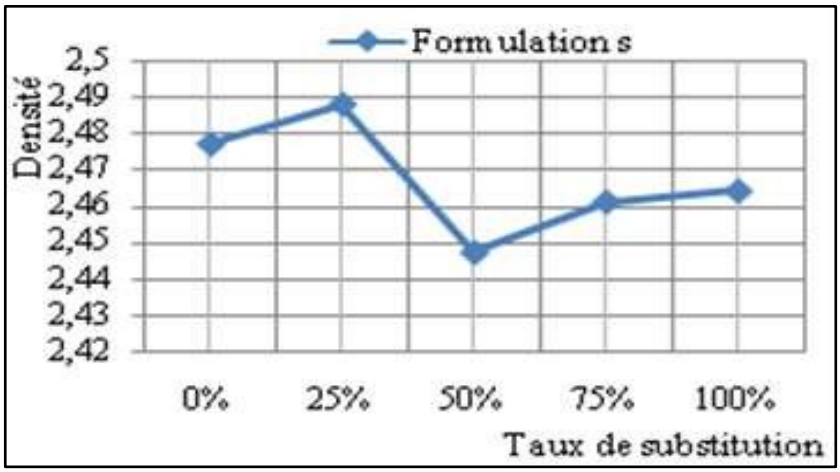


Figure I.22 : Variation de la densité en fonction du taux de substitution à poudre de granite [**43]**.

- ✓ **L’air Occlus**

Houria Hebhoub et al. **[43]** Ont montrés d’après leur études que l’air occlue du béton ordinaire est diminué en fonction de substitution du (25%,50%,75% et 100%) du sable par la poudre de granite. **Naamaoui et al**. [**44]** on montrés d’après leur recherches que l’air occlue de béton autoplaçant est diminué aussi avec l’augmentation du % de granite.

I.3.7. 2.Influence à l’état durci

- ✓ **La résistance à la compression**

La figure I.46 présente les résultats des tests de résistance à la compression pour divers mélanges de béton géo polymère. La résistance à la compression sur 7 jours variait entre 15,2 et 22,1 MPa. Les résultats présentés que la force du jeune âge augmentait avec l'augmentation de la teneur en déchets de granite. Le béton géo polymère avec les déchets de granite dans une proportion de 50% des granulats fins avaient la compression de 7 jours résistance d'environ 27 à 40 % supérieure à celle du béton de sable naturel. Cela peut être attribué à l'amélioration du lien physique entre la pâte de géo polymère et les particules de granit de forme angulaire [**42]**.

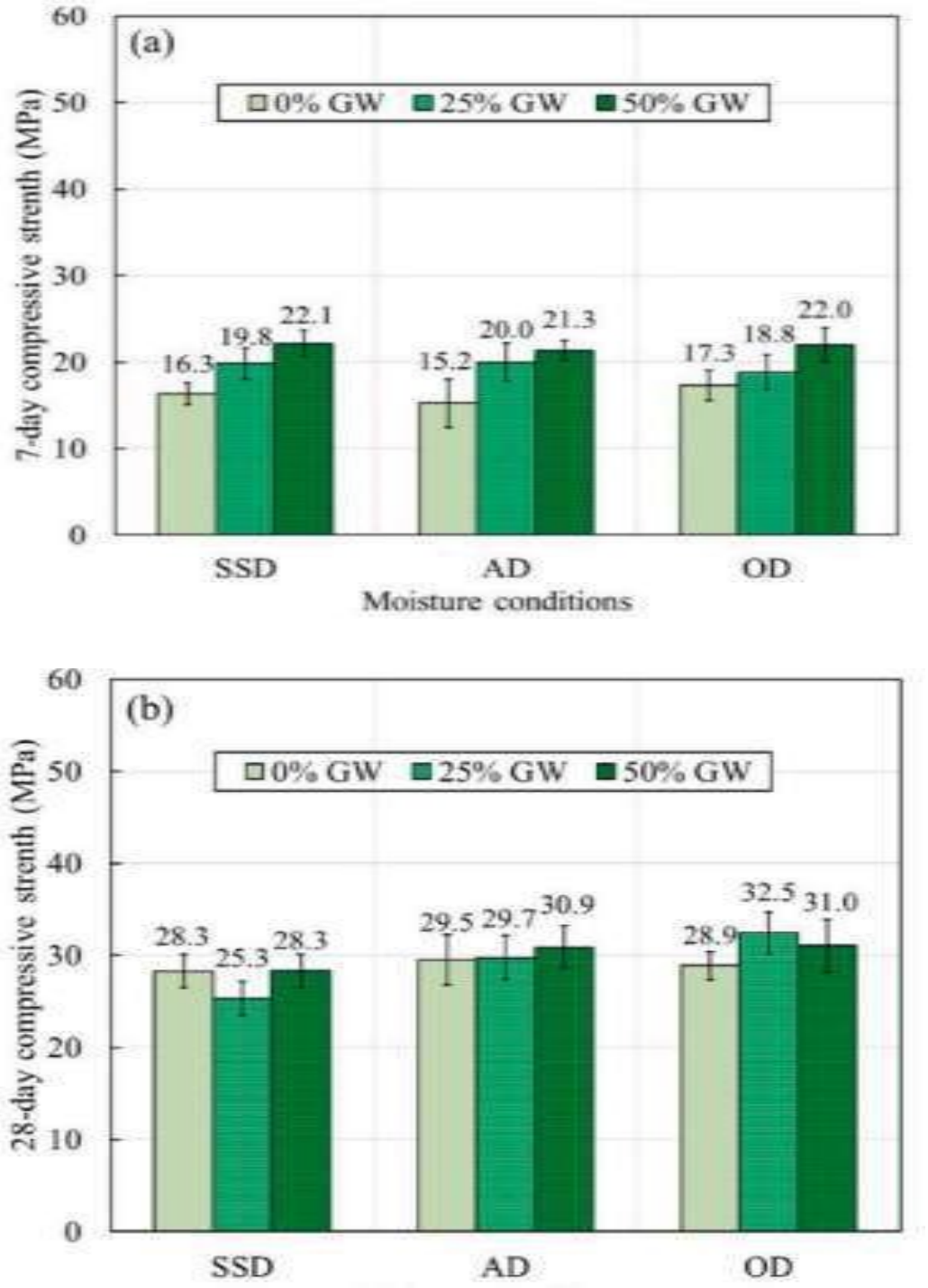


Figure I.23 : La résistance à la compression de béton à base de déchets de granite avec (a) 7 jours, (b) 28 jours **[42]**.

Houria Hebhoub et al. [**44]** on trouvé que la résistance à la compression est augmenté en fonction de substitution de 50% du sable par la poudre de granite. La valeur maximale de la résistance à 28 jours est de 34,5 MPa obtenue dans le béton de 50% de taux de substitution et la valeur minimale est de 21,4 MPa obtenue dans le béton de 100% de taux de substitution.

Naamaoui et al. [**44]** on conclue que la résistance à la compression augmente au fur et à mesure que l'âge augmente et elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de poudre de granite incorporé. Pour un pourcentage de 30% de poudre de granite incorporé la résistance à la compression du béton représente près de 81% de la résistance du BAP avec 5% de poudre de granite.

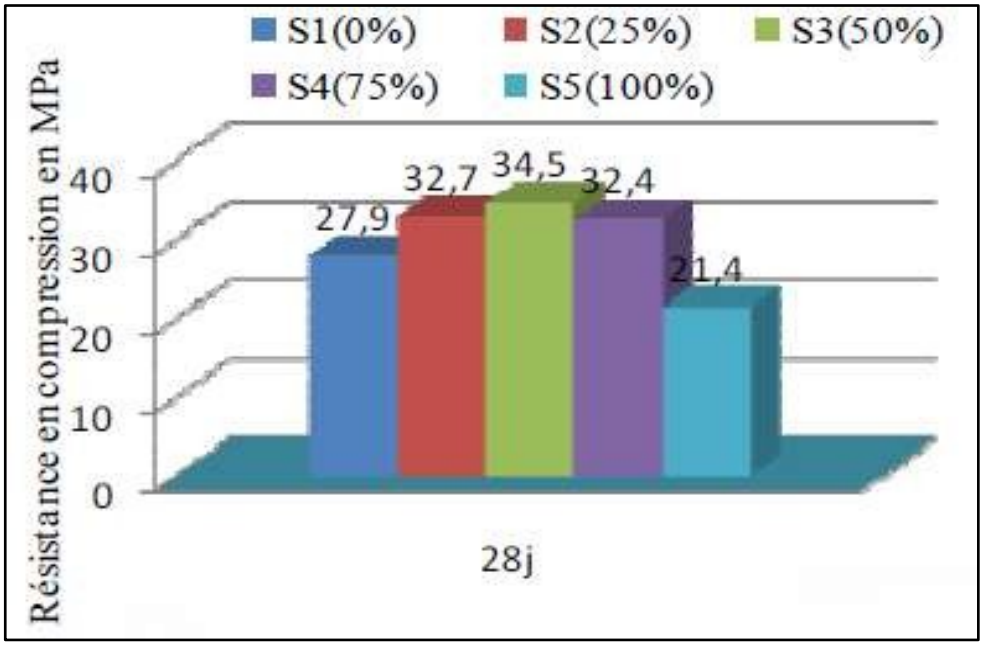


Figure I.24 : Influence du pourcentage sue la résistance en compression **[44]**.

Taylor et al. **[45]** ont montré que les résistances en compression de béton avec ajout de poudre de granite de granulométrie très serrée sont augmentées en fonction d'augmentation.

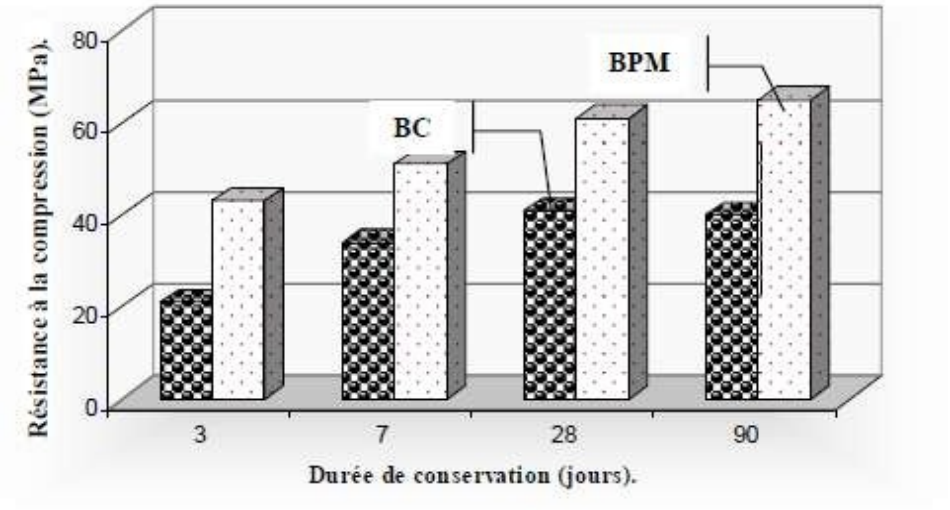


Figure I.25 : Résistances en compression de béton avec ajout de poudre de granite [**45]**.

- ✓ **Absorption capillaire**

Taylor et al [45] ont trouvé une faible capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de granite comparée au béton de contrôle. Ceci est un indice d'une compacité accrue de ces bétons.

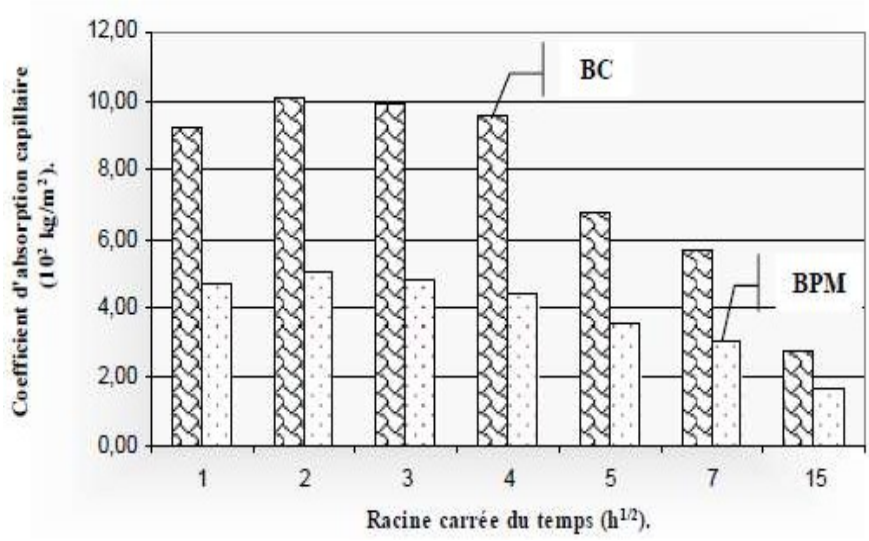


Figure I.26 : Capacités d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de granite **[45]**.

I.4.Marbre et déchets de marbre

I.4.1.Définition

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent). Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Certains marbres, comme le vert antique, composés de calcaire et de serpentines, sont des Ophicalces. Le mot vient du latin marmot. 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 **[46]**.



Figure I.27 : Déchets de Marbre [**47]**.

I.4.2.Composition de marbre

Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7. Les marbres, au sens géologique, correspondent à des calcaires métamorphisés. - C'est pourquoi ils sont souvent clairs (comme les calcaires). On y observe très souvent des veines un peu plus sombres, qui correspondent à des impuretés, des argiles. Le chimisme de la roche

d'origine étant essentiellement du carbonate de calcium $CaCO_3$, au cours du métamorphisme, si le calcaire est très pur, on ne pourra pas former les minéraux « classiques du métamorphisme » qui nécessitent dans la roche d'origine la présence de silice d'aluminium… Les marbres sont très utilisés pour la sculpture, dans l'architecture **[48]**.

I.4.3. Déférent type de marbres

La classification des marbres se fait selon la teinte et le dessin : 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: **[48]**

- **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.

I.4.4. Les déférentes propriétés de marbres

- **Durable** :

Le marbre est l'une des pierres durable entre toutes les pierres naturelles. Il garantit toujours la longue durée de vie des éléments construire avec du marbre.

- **Résistance à la chaleur :**

Le marbre est l'une des pierres une meilleure résistance à la chaleur parmi les toutes les pierres naturelles. Cela garantit également la température uniforme à l'intérieur de la maison.

❖ **Résistance au feu :**

Résistance au feu Marbre être le rend idéal pour la maison et la construction de bureaux. En cas d'accident le feu à la maison, le marbre assure moins de dégâts **[49]**.

I.5. Le béton de sable

I.5.1. Introduction

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé antérieurement au béton traditionnel. Il est tombé en désuétude, avec l'abondance des granulats du plus gros calibre permettant d'obtenir facilement des nouveaux élevés de résistances. Il retrouve cependant de nos jours un intérêt certain du fait des propriétés spécifiques de ce matériau, par rapport au béton traditionnel : excellente maniabilité et cohésion, bonne adaptation aux milieux fortement ferraillés, qualités esthétiques, etc. Par ailleurs, dans certaines régions riches en sable, il peut procurer des économies par rapport au béton traditionnel. Dans ce chapitre on présentera un aperçu général sur les BS, ou on va exposer d'abord l'historique et l'origine des bétons de sable ainsi que leur définition et la différence entre les BS et les mortiers. Ensuite, on donnera une description des constituants entrant dans la fabrication, on décrit les propriétés mécaniques et hygrométriques, puis on explique le caractère non fissurant du BS. Finalement, on met en relief les innovations et les avantages apportés par les BS et on donnera quelques exemples de réparation structurale réalisés par ce matériau **[50]**.

I.5.2. Origines de béton de sable

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le béton aggloméré confectionné par F.Coignet dans le 3ème quart de XIX siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement a Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Saïd en Egypte (hauteur : 52m) et du pont de New-York .Les premières tentatives de correction granulaire reste l'apanage de « F.Coignet)» qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872, mélangea un sable

fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction. Cette technique a été mise au point depuis des décennies, en URSS, en témoignent les réalisations du port Kaliringrad en Prusse- Orientale en béton de sable au début du siècle et aussi du pont de Chernavskif coulé sur place à Voronej (500Km de Moscou) .A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder a permit l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines : (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.)**[50]**.



Figure I.28 : Port Saïd **[51]**.

I.5.3. 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 **[50]**.

I.5.4 Techniques particulières

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui ci **[52]**.

I.5.5. Béton de sable projeté

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement et se prêtent au renforcement de structure par projection, exemple :

- La réhabilitation de collecteur d'assainissement.
- La stabilisation de parois ou talus.

En général, le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments **[52]**.



Figure I.29 : Béton projeté **[53]**.

I.5.6.Bétons de sable fluide

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BS s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation. La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants super plastifiants 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 œuvrent. Les bétons de sable fluides sont économiquement mieux adaptés aux dallages du bâtiment. S'agissant d'éléments horizontaux, la fluidité convient et l'auto-nivellement est un atout considérable. L'intérêt réside dans les avantages suivants :

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

Dans le cas des aménagements de voirie peu dénivelés (comme les aires de stationnement et les voies piétons), où les performances demandées ne seront pas élevées, elles se prêtent parfaitement à la technique de fluidification de BS**.** Les bétons de sable fluides présentent des performances comparables aux bétons fluides classiques, dont l'utilisation semble se développer actuellement. Indépendamment de l'aspect environnemental lié à l'utilisation des BS, il pourra être mieux adapté aux cas suivants :

- Risques de ségrégation préjudiciable

- Forte densité de ferraillages
- Recherche d'un produit fini



Figure I.30 : Béton de sable fluide [**55]**.

Le béton de sable fluide présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les BSF nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiantes additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques. 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 traditionnel **[54]**.

I.5.7. Les composants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre au besoin de certain usage, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants **[50]**.

a) Les Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-540 et NF P 18-101 il peut s'agir 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 granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homo métrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un O/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté **[50]**.

b) Les fines d'ajout (filler)

Le terme filler fait référence à tout produit obtenu par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, bentonite, cendres volantes...) naturelles ou non. Ce mot filler provient de l'anglais « to fil » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2mm. L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage, . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration, . .) L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe **[50]**.

c) 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 **[50]**.

d) L'eau de gâchage

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.

e) Les 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. On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton d e sable privilégie toutefois l'usage du plastifiant ou super plastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui on été utilisés dans cette étude. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103 **[50]**.

I.5.8. Formulation du béton de sable

I.5.8.1 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, et joue aussi le rôle d'une colle liant les granulats en donnant une certaine durabilité au matériau durci. Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange ; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [25] a pu établir à partir des données expérimentales

une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{max}). Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit :

$$V=Vo\ (d\ /D_{max})\ 1/5 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

V : Volume des vides du mélange granulaire.

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

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

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

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

A. Dosage en fines d'un béton de sable

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

- Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 μm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et la fraction du sable inférieure à 80μm.
- Toute l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sableD_{max}, ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80μm, provenant des fines d'ajout.

En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 μm et l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

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

Ps (v) : Porosité du sable détendue granulaire comprise entre 80 μm etD_{max}.

D_{max} : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (Vo) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7, 0.8). Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80μm, et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires. En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (<80μm) et le volume de vide associé à l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout. [Fines]= [Vides]. Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.

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

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

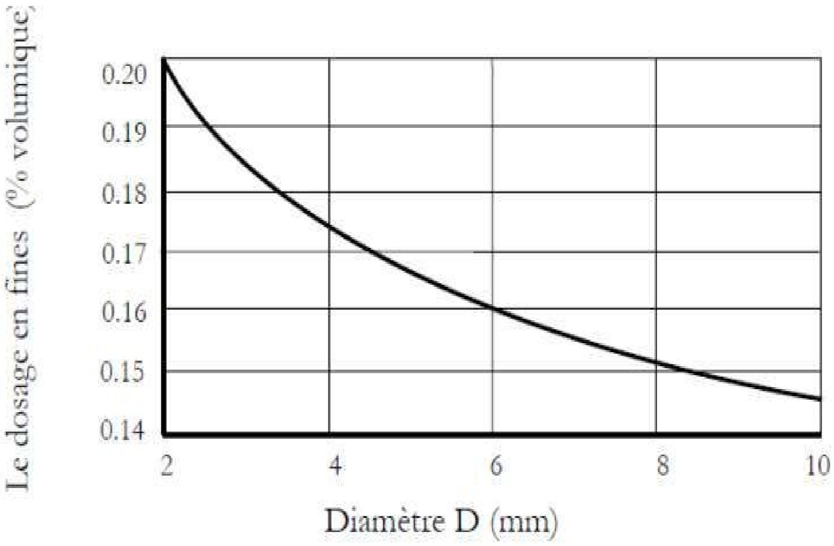


Figure I.31: Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines **[56]**.

B. 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.

$(e+v)$ min = 0.8 (d/D_{max}) 1/5 ……………………………. (4)

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

d = (60 / (f)) mm p ×…………………………….. (5)

Avec:

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

p: densité du constituant exprimée en g/cm3.

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

Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: La dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale.

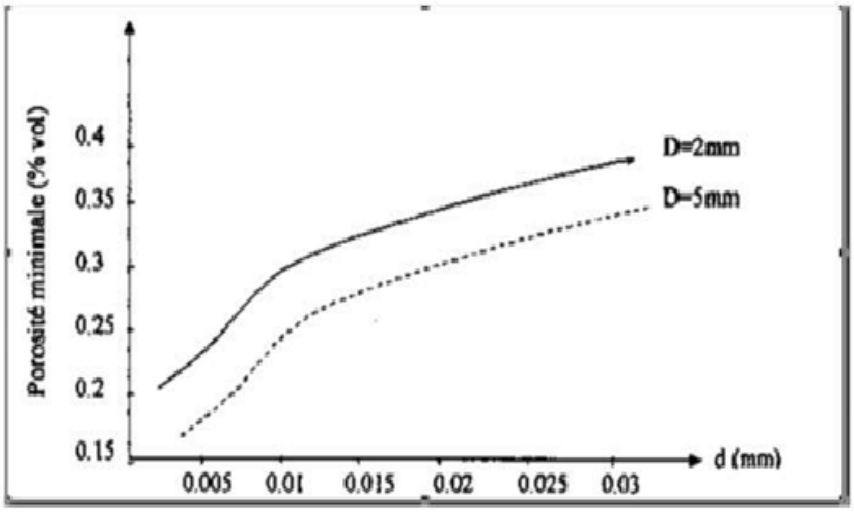


Figure I.32: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D_{max} du sable **[56]**.

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

optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

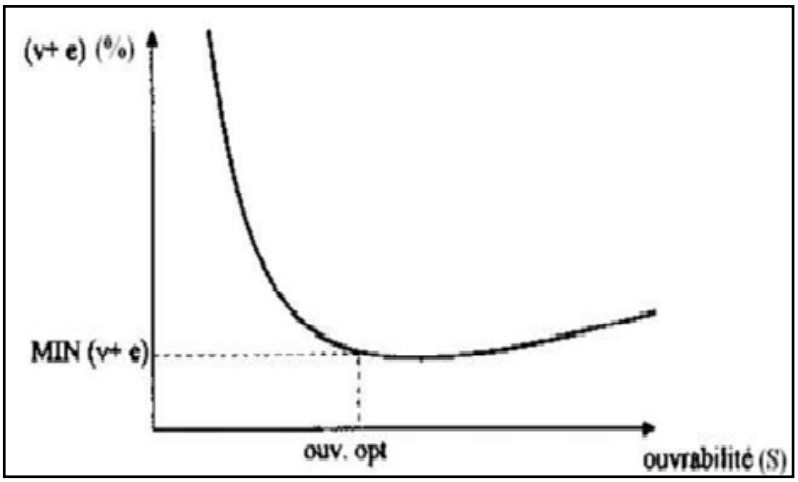


Figure I.33: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage(e+v) d'une matrice pour une mise en Œuvre donnée **[56]**.

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

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

Avec:

K:constante comprise entre 0.2 et 0.25.

C. Dosage ensable

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

$$[\text{Sable}]=1000-[\text{fine}]-[\text{eau}]-[\text{vide}]\ (l/m^3)$$

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

D. Estimation de la résistance en compression

L'estimation de la résistance en compression se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte. Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [27] a été proposée récemment.

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

Kf: coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 R_c : classe vraie du ciment(MPa) ;

e : dosage en eau totale (l/m^3)

V:air piégée (l/m3)

C:dosage en ciment (kg/m3)

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

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

0.2<Kcv<0.4

2<Kfs<3.3

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

K1<0.2

K1 : coefficient pouzzolanique

K2:coefficient d'activité du filler calcaire.

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

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

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

Ainsi d'autres paramètres pour raient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. L'activité de filler calcaire présente un optimum Aude là duquel la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques.

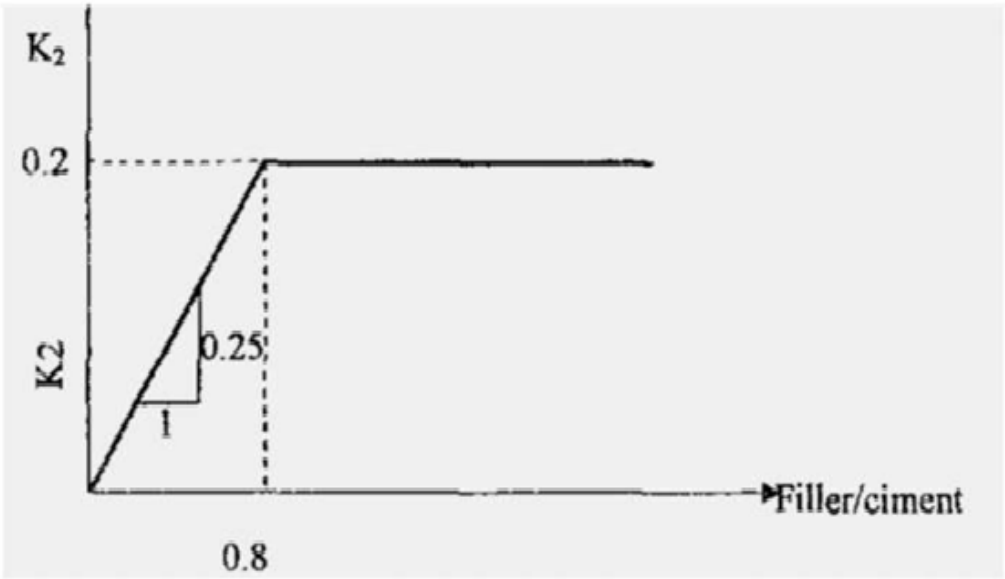


Figure I.34 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) **[56]**.

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

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

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité à la 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 Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme. On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme comme indique.

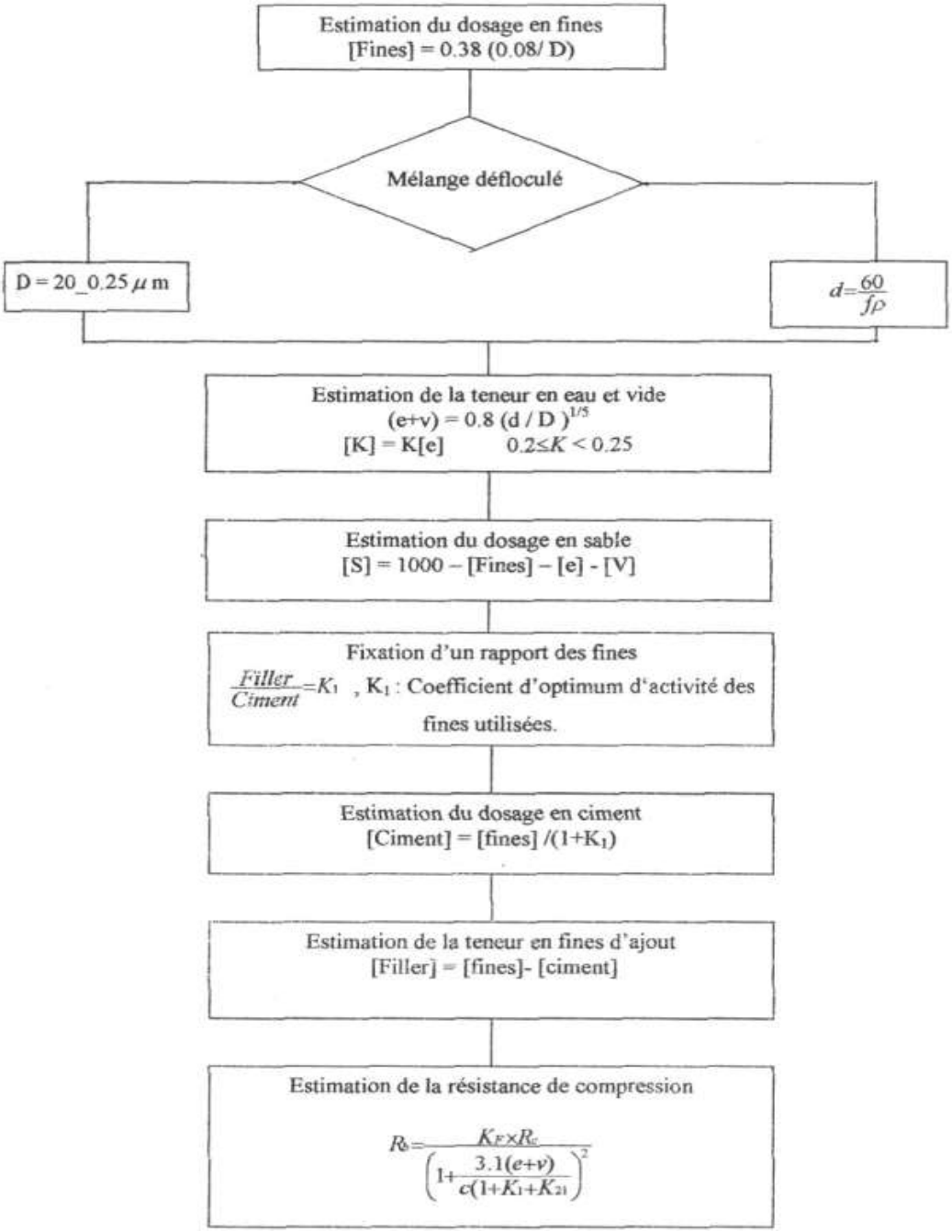


Figure I.35: Organigramme de la méthode théorique **[56]**.

1.5.8.2 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable

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

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

- **Le dosage en ciment**

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

- **Dosage en eau**

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

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

α: compris entre 0.1 et 0.15

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

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

- **Détermination du dosage en sable**

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

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

$$Vsable = 1000 – Vc - Vadj – Vair - Veau \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

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

$$Msable = MVA * Vsable \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (9)$$

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

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

Vsable : 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).

$$MVAT = mciment + meau + madj + M\ sable \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

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

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

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (9)

- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.

L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique apparente théorique (MVAT) vers la masse volumique apparente réelle (MVAR)) et le temps d'écoulement de 7 à10 S. La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante (correction sur le sable).

$$Si = Si\text{-}1(MVATi\text{-}1 - MVARi\text{-}1) + V * MVAsable. \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

Où

Si : dosage en sable après correction

Si-1 : dosage en sable avant correction MVAT,

MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel

MV sable : masse volumique absolue du sable

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

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

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

Les fines d'ajout sont destinées à corriger l'indice des vides des sables et à limiter le dosage en ciment des bétons de sable. Elles sont incorporées au mélange de base à un rapport E / C constant et à un dosage optimal permettant d'augmenter la compacité sans changement du volume total (MVAR=(MVAT). Ce qui revient à dire que la masse volumique théorique du mélange et la masse volumique réelle restent égales. Pour cela des gâchées de béton de sable seront réalisées aux différents dosages en fines dans leur plage d'emploi usuelle. Pour chaque gâchée, les essais de maniabilité et la détermination de la masse volumique doivent être réalisés et fixés précédemment afin de les comparer aux critères imposés. Si ces derniers

ne sont pas vérifiés, la correction sur le sable s'effectue toujours selon la formule suivante jusqu'à égalité des masses volumiques théorique et expérimentale.

$$Si = Si\text{-}1\text{-}(MVATi\text{-}1 - MVARi\text{-}1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

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/m3 de fines. Figures 1.29 et 1.30.

- 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

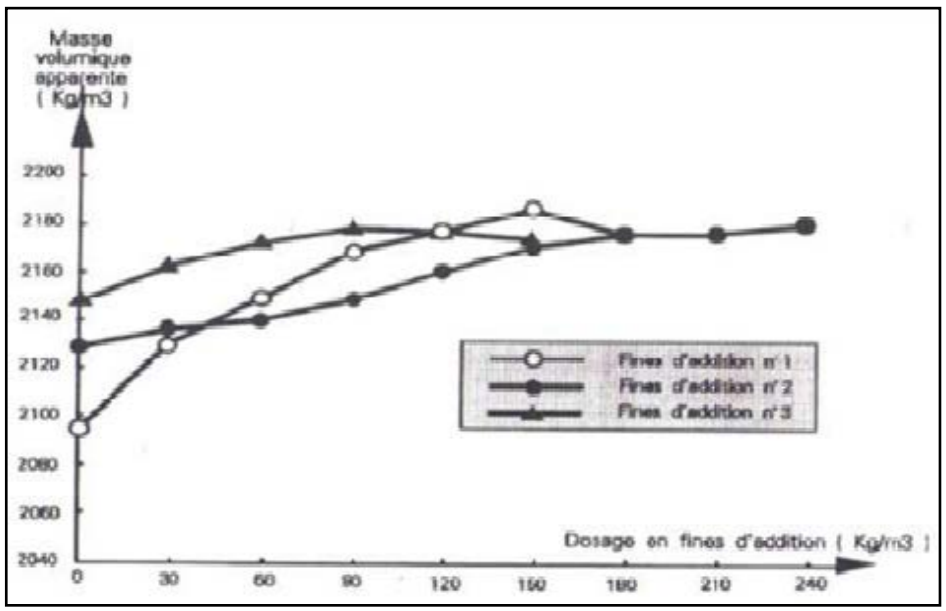


Figure I.36 : Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition **[56]**.

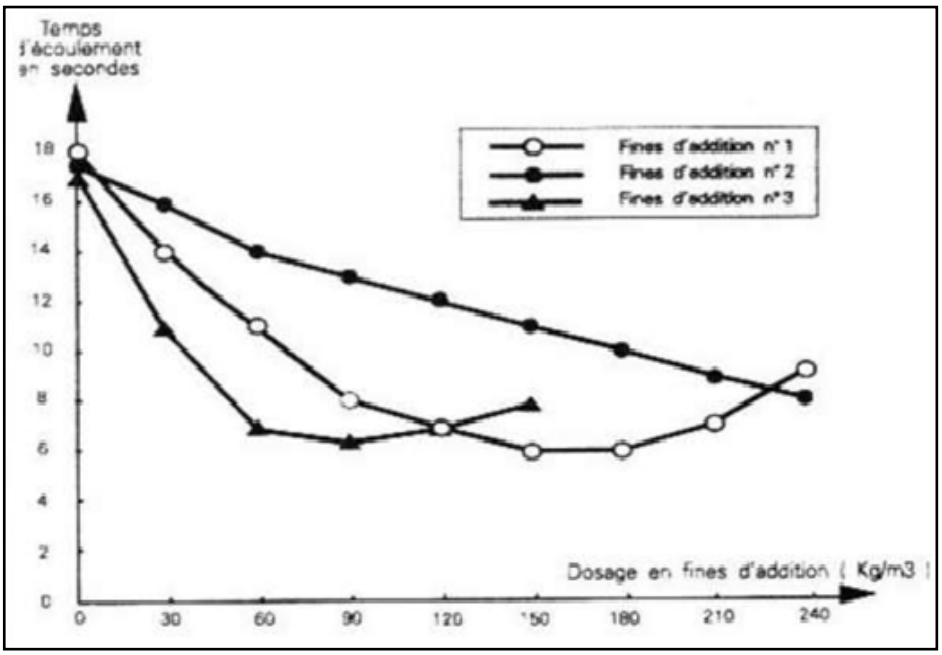


Figure I.37 : Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition **[56]**.

I.6 Conclusion

Le déchet est par définition « matière » et a ce titre il est en premier lieu sollicité pour le traiter, il est nécessaire de trouve les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour diminuer les capacités de nuisances. Plusieurs types de déchets peuvent être utilisés comme granulats.

Dans ce chapitre nous avons passé en revue la problématique des déchets usagés non réutilisables, ainsi que de leurs recyclage et valorisations. Puis on a donné une généralité sur le déférant déchet de granite, marbre, perlite (définition, composition, propriété), et le béton de sable (définition, composition, utilisation, formulation), ainsi que finalement un aperçu sur l'effet de valorisation et recyclage de déchets sur les performances de matériaux à base cimentaire à l'état frais et durci.

Chapitre II Matériaux et technique d’expériences



II.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux et les techniques expérimentales utilisées dans notre étude. On présente en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux de base utilisés dans la composition des mortiers et des bétons. Dans une seconde partie, on exposera la méthode de formulation adoptée dans les différentes compositions des bétons de sable. Ensuite, on présente les essais réalisés au cours de notre investigation sur les composites obtenus à l'état frais et à l'état durci, Les différents essais faits au cours de ce travail sont **:**

❖ **Etat frais :**

- Etalement au mini cône
- Taux d'écoulement (V-Funnel)

❖ **Etat durci :**

- La résistance a la compression à 7, 28 et 90 jours
- La résistance a la traction par flexion à 7, 28 et 90 jours
- Essai ultrasonique
- Module d'élasticité
- Conductivité thermique
- La porosité accessible à l'eau
- Absorption capillaire
- La résistance au feu (perte au feu)

II .2 Caractérisation des matériaux utilisés

Pour la confection du béton, Nous avons utilisé des matériaux locaux de la wilaya de Médéa sont caractérisés expérimentalement au laboratoire de génie civil tout en assurant les recommandations des normes en vigueur.

II.2.1 Granulats utilisé

II.2.1.1 Sable

Nous avons utilisé un sable de (Oued sauf) et leurs caractéristiques sont représentées dans le tableau II.1 et la figure II.1 représente la courbe granulométrique de sable utilisés.



Figure II.1: Sable moyenne d'Oued sauf.

Tableau II.1 : Propriétés physiques d'identification de sable utilisés.

Caractéristiques	**Sable**
Provenance	Oued sauf
Classe granulaire	0/3
Module de finesse	2.07
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.63
Masse volumique apparent (g/cm3)	1.48
Equivalent de sable (%)	81.16
Taux d'absorption d'eau (%)	0.2

.

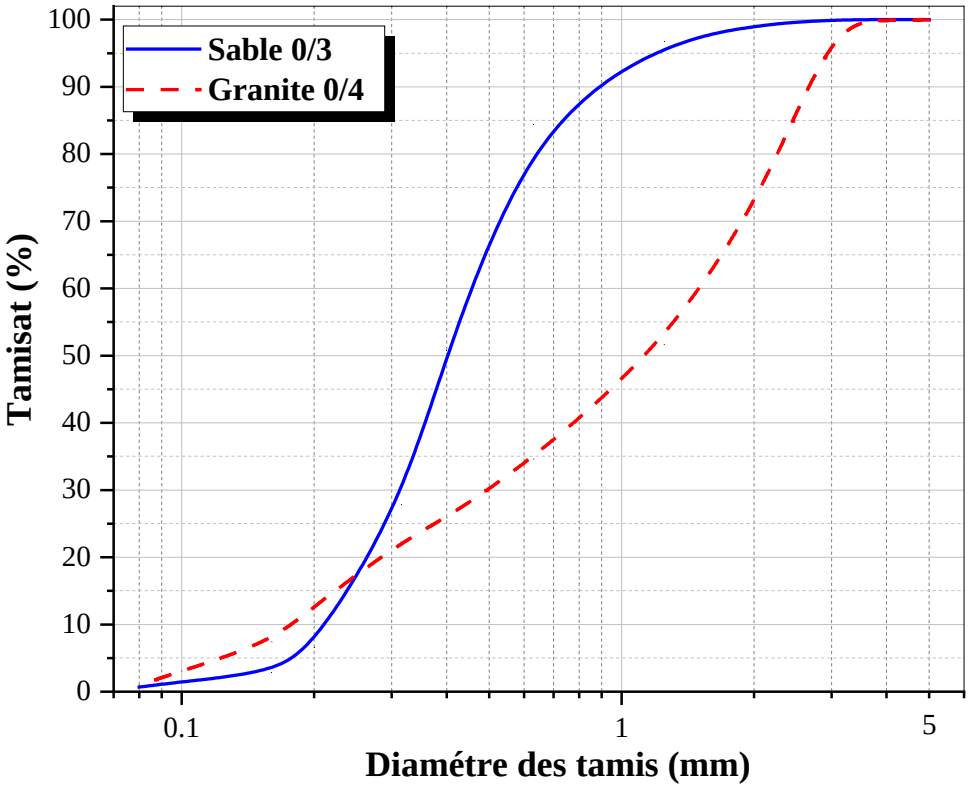


Figure II.2: Courbe granulométrique des sables utilisées.

II .2.2. Le Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour les différentes compositions, il s'agit du ciment résistant aux sulfates (CRS) CEM I 42,5 R.

Ce ciment présente une résistance moyenne en compression à 28 jours de 42,5 MPa, est constitué de : 95% de clinker, des constituants secondaires (de 0 à 5%) peuvent être incorporés dans ce ciment et du sulfate de calcium sous forme de gypse est rajouté en tant que régulateur de prise.

II .2.2.1.Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Dans notre étude le ciment utilisé provenant du groupe GICA. La proportion chimique et minéralogique du ciment varie en fonction de l'état physique ou du traitement thermique subit par le matériau pendant le processus de sa fabrication.

Les compositions chimiques du ciment et minéralogique du clinker sont données respectivement par les tableaux II.2 et II.3.

Tableau II.2: Composition chimique élémentaire du ciment CRS-CEM I 42,5 (%)

Les oxydes	**Pourcentages %**
Silicate tri calcique **C_3S**	**59.68**
Silicate bi calcique **C_2S**	**12.52**
Aluminate tricalcique **C_3A**	**2.62**
Alummino-ferrite tetracalcique **C_4AF**	**16.73**

Tableau II.3: Composition minéralogique du clinker (%)

CaO	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**SO_3**	**K_2O**	**Na_2O**	**MgO**	**CL**
63.10	20.0	4.50	5.50	2.50	0.60	0.20	2.00	0.02

II .2.2.2. Caractéristiques physico-mécaniques

Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment CRS est présenté dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Les caractéristiques physico-mécaniques du ciment.

Expansion à chaud	Surface spécifique de Blaine	Résistance à la compression		Temps de début de prise	Chaleur d'hydratation
		02jours	28jours		
0-5 mm	3000 à 3800 cm²/g	≥20 N/mm²	≥42.5 N/mm²	60 min-150min	≤270j/g

Le tableau II.5 résume les caractéristiques physiques du ciment utilisé dans notre étude.

Tableau. II.5 : Caractéristiques physiques du ciment CRS.

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm³)	1.01
Masse volumique absolue (g/cm³)	3.05
Finesse (cm²/g)	2896
Perte de feu	≤1%
Résidu insoluble	0.5% à -1%
Densité	0.950à 1.10
Refus sur tamis 45 micron	≥20%

II.2.3. Filler de marbre blanche

Les filler utilisées au cours de ce travail sont obtenues par broyage des déchets de concassage mécanique de déchets de marbre (figure II.5). Rappelons que la poudre de marbre sont les plus adaptés au béton et donnent de meilleures performances**.** Leur caractéristique physique est mentionnée dans le tableau (II.6).



Figure II.3: poudre de marbre.



Figure II.4 : Protocole de concassage des déchets de marbre sous forme sable 0/3.

Tableau II.6: Propriétés physiques de marbre.

Caractéristiques	**Marbre**
Classe granulaire	0/3
Surface spécifique (cm^2/g)	3000
Module de finesse	2.77
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.74
Masse volumique apparent (g/cm^3)	1.68
Taux d'absorption d'eau(%)	2.1

II.2.4. Poudre de déchet de perlite

La perlite naturelle utilisée est extraite du gisement de Hammam Boughrara situé à Maghnia (Figure II.5). Ce matériau sous forme de roches, après concassage a été séché à 105 °C dans une étuve pendant 24 heures pour éliminer l'eau libre, puis broyé (Figure II.6).



Figure II.5. (a) Roche de la perlite naturelle avant broyage, (b) Poudre de la perlite naturelle après broyage **[18]**.



Figure II.6 : Protocole de concassage des déchets de perlite.

La composition chimique de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau II.7 :

Tableau II.7 : Composition chimique élémentaire de la perlite naturelle **[18]**.

CaO	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**TiO_2**	**K_2O**	**Na_2O**	**MgO**	**Minéraux divers**
1.2	72	13	1.6	0. 2	4	4	0.5	3.5

Les caractéristiques physiques de la perlite naturelle, est donnée dans le tableau II.8 :

Tableau II.8 : Caractéristiques physiques de la perlite naturelle **[18]**.

Désignation	**propriété**	**Désignation**	**propriété**
Couleur	Gris	La finesse au tamis 45µm	12%
Masse volumique absolue	2.6 g/cm³	Surface spécifique de Blaine	4230 cm²/g

Le diagramme (Figure II.7) montre que la perlite naturelle est composée de minéraux courants pour une substance volcanique avec principalement du quartz, anorthite et biotite. Aucun minéral hydraulique n'a été reconnu dans ce matériau, néanmoins le décollement de la ligne de base du diffractogramme sous forme d'une bosse nous indique la présence d'une phase amorphe potentiellement réactive.

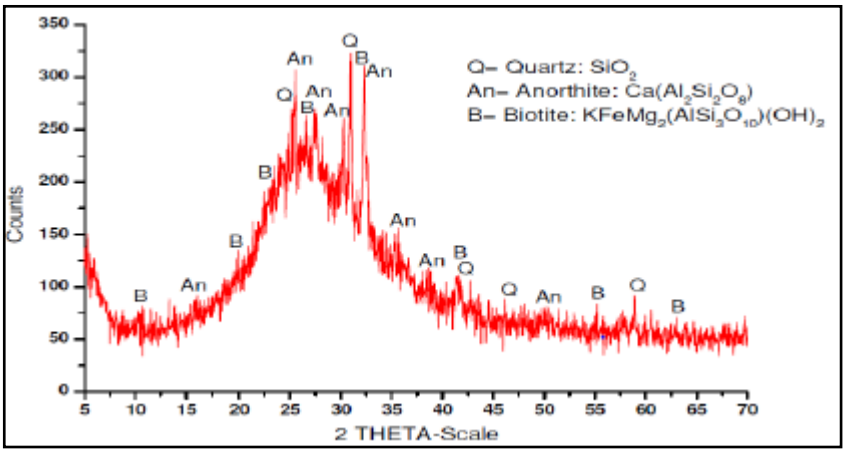


Figure II.7. Le diffractogramme aux rayons X de la perlite naturelle **[18]**.

II.2.5. Déchets de granite

Les déchets de granite utilisée à la cour de ce travail est provient de l'usine de l'industrie de granite, après avoir récupérée les déchets de granite ont été broyer et utilisé dans la masse de béton de sable fluide sous forme de sable de (0/3) figure II.8, la granulométrie et les caractéristique de déchet de granite utilisé dans ce travail sont représente dans la figure II.9et le tableau II.9.

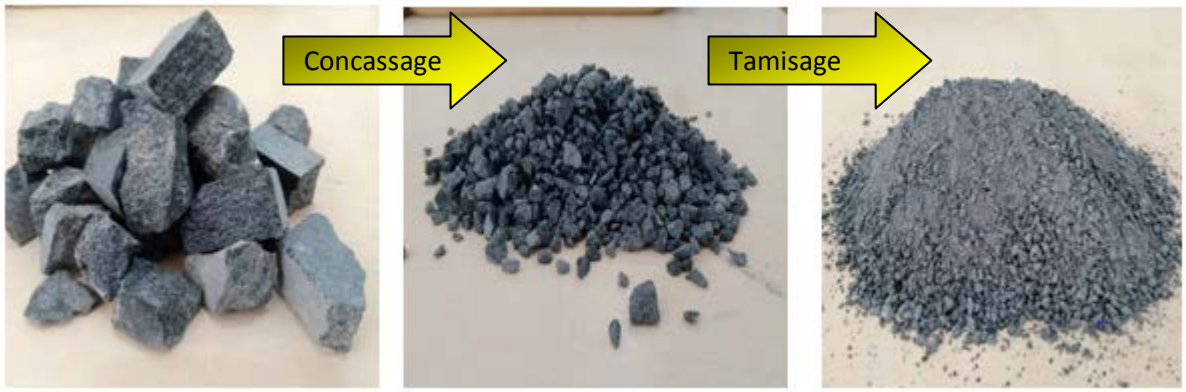


Figure II.8: Déchets de granite.



Figure II.9 : Protocole de concassage des déchets de granite sous forme sable 0/3.

Le SGR est caractérisé suivant les normes en vigueurs, voire les procédures des essais qu'on a réalisées sur ce sable, les résultats sont représentés dans le tableau II.9.

Tableau II.9: Propriétés physiques de SGR.

Caractéristiques	**Granite**
Classe granulaire	0/3
Module de finesse	2.78
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.51
Masse volumique apparent (g/cm3)	1.22
Taux d'absorption d'eau (%)	0.34

II.2.6 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection des bétons est celle du robinet considérée Comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme **[NF EN -1008]**. Sa température est comprise entre 18 et 20°C.

II.2.7 Super plastifiant

Un seul type d'adjuvants ont été utilisés dans notre étude, appelée : TEMPO-10 est un super plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère. Le TEMPO-10 combine plusieurs mécanismes d'action. Rédaction d'eau extrêmement importante, en plus rapide des résistances à court terme, de étanchéité fortement améliorée.

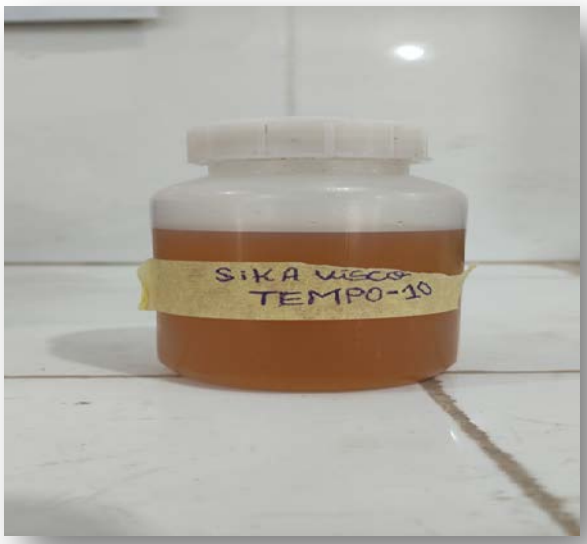


Figure II.10 : Super plastifiant utilisé TOMPO-10

II.3 Formulation du béton

La formulation du béton de sable fluide pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode théorique SABLOCRETE 1994.

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux du gâchée, afin d'obtenir un béton (BSF) avec des propriétés souhaitées.

Notre étude est focalisée sur l'influence de l'ajout des déchets de granite et de marbres issus sous formes sable (SR), et déchets de perlite forme poudre sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton de sable fluide (BSF). Le tableau II.10 représentées les différentes compositions sable, ciment, filler, eau et adjuvant de la formulation pour un volume de 1 L.

Tableau II.10 : Composition des BSF formulés pour $1M^3$.

Mélange	**Ciment (Kg/m³)**	**PM (Kg/m³)**	**Eau (Kg/m³)**	**PP (Kg/m³)**	**Sable (Kg/m³)**	**SG (kg/m³)**	**SP %**
Témoin	403.86	201.93	265	0	1400	0	0.8
5PP+0SG	380.82	201.93	265	20.04	1400	0	0.8
5PP+20SG	380.82	201.93	265	20.04	1266.4	267.2	0.85
5PP+40SG	380.82	201.93	265	20.04	1132.8	534.4	0.9
5PP+60SG	380.82	201.93	265	20.04	999.2	801.6	0.95
10PP+0SG	360.78	201.93	265	40.08	1400	0	0.8
10PP+20SG	360.78	201.93	265	40.08	1266.4	534.4	0.85
10PP+40SG	360.78	201.93	265	40.08	1132.8	801.6	0.9
10PP+60SG	360.78	201.93	265	40.08	999.2	1068.8	0.95
15PP+0SG	340.74	201.93	265	60.12	1400	0	0.8
15PP+20SG	340.74	201.93	265	60.12	1266.4	534.4	0.85
15PP+40SG	340.74	201.93	265	60.12	1132.8	801.6	0.9
15PP+60SG	340.74	201.93	265	60.12	999.2	1068.8	0.95

Avec :

PP : poudre de perlite.

SG : sable de granit**.**

PM : poudre de marbre.

II.4 Séquence de malaxage du béton

La séquence de malaxage et la composition du béton ont un rôle important pour avoir une hydratation correcte, ce qui conduit à un béton performant et durable. Les mélanges ont été confectionnés dans un malaxeur à béton d'une capacité de 5 litres.

Selon les caractéristiques souhaitées et les composants du béton, les auteurs suivent plusieurs séquences. Pour notre cas, la séquence suivie est celle décrite dans figure II.10 ; elle suit les étapes suivantes :

- On verse les gros grains (le sable).
- Puis en ajoute les fillers et le ciment après on malaxe à sec pendant 30 sec.
- On verse deux tiers d'eau de gâchage, puis on malaxe pendant 1 minute.
- Après on ajoute de super plastifiant avec le tiers de la quantité d'eau nécessaire et on mélange pendant 1 minute.
- Après, malaxé le mélange à vitesse rapide pendant 3 minutes, puis on laisse le mélange repose 3 minute.
- Puis lancer vitesse rapide pendant 1 minute et 30 sec.

La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du béton.

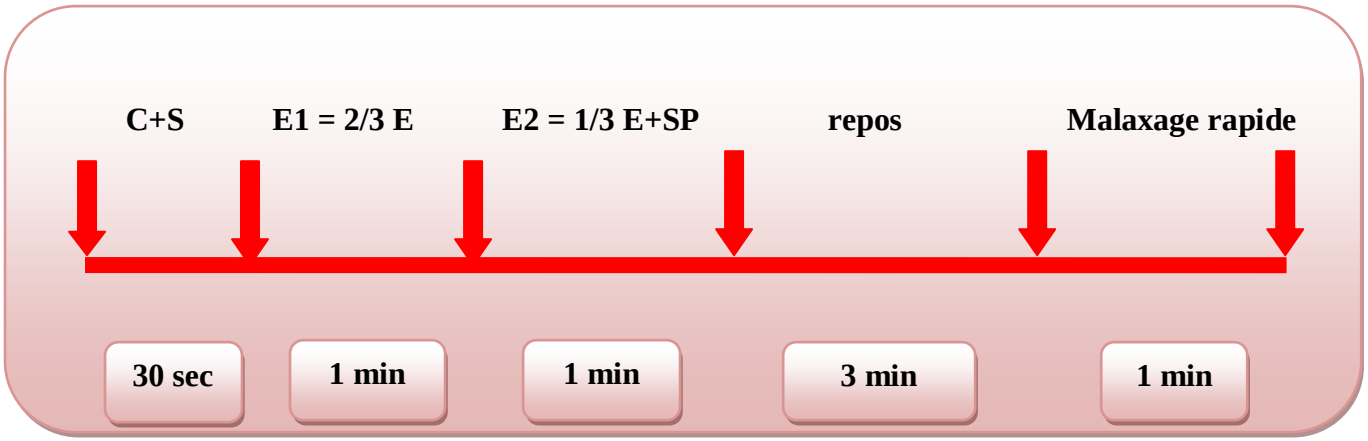


Figure II.11 : Séquence de malaxage du béton de sable fluide.



Figure II.12 : Procédure du malaxage.

II.5 Les essais sur le béton (BSF)

II.5.1 Etat frais

A. Essais d'étalement au mini-cône

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 II.13 montre les étapes de l'essai d'étalement mini cône selon la recommandation NF EN 12350-8 **[57]**.

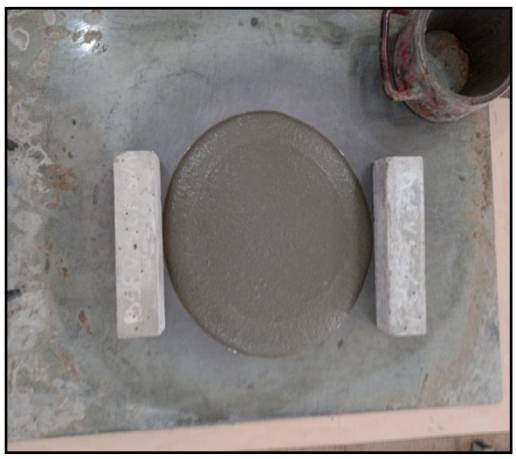


Figure II.13 : Développement de l'essai d'étalement.

B. Essai d'écoulement à l'entonnoir en (V-Funnel)

Essai d'écoulement à l'entonnoir en (V-Funnel) décrit la méthode de détermination de la durée d'écoulement du BSF à travers l'ouverture d'un entonnoir en V figure II.14. 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 BSF. Si le béton a une faible résistance à la ségrégation statique, un blocage partiel des granulats pourra également être observé. (Figure II.14).



Figure II.14 : Essai d'écoulement à l'entonnoir en V.

II.5.2 Démoulage et conservation des éprouvettes

On prélever un échantillon du béton afin de remplir des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm. On stocke les éprouvettes dans une salle en attendant de les démouler 24 heures après. Après 24 heures on démoule les éprouvettes et on les place dans un bac rempli d'eau à une température d'environ 20°C jusqu'à l'échéance de l'essai, pour maintenir l'humidité Satisfaisante et la température favorable durant la période d'hydratation du ciment pour éviter l'évaporation rapide de l'eau de gâchage, afin d'assurer un bon mûrissement du béton.



Figure II.15: Conservation des éprouvettes fabriquées.

II.5.3 Etat durci

A. Essai de la résistance à la compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme **[EN 196-1] [58]** par compression axiale pour d'éprouvettes cubique à l'âge de 7 et 28 jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 KN .La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement de trois (3) d'éprouvettes cubique (4x4x4) cm. La figure II.16 montre les étapes de l'essai.

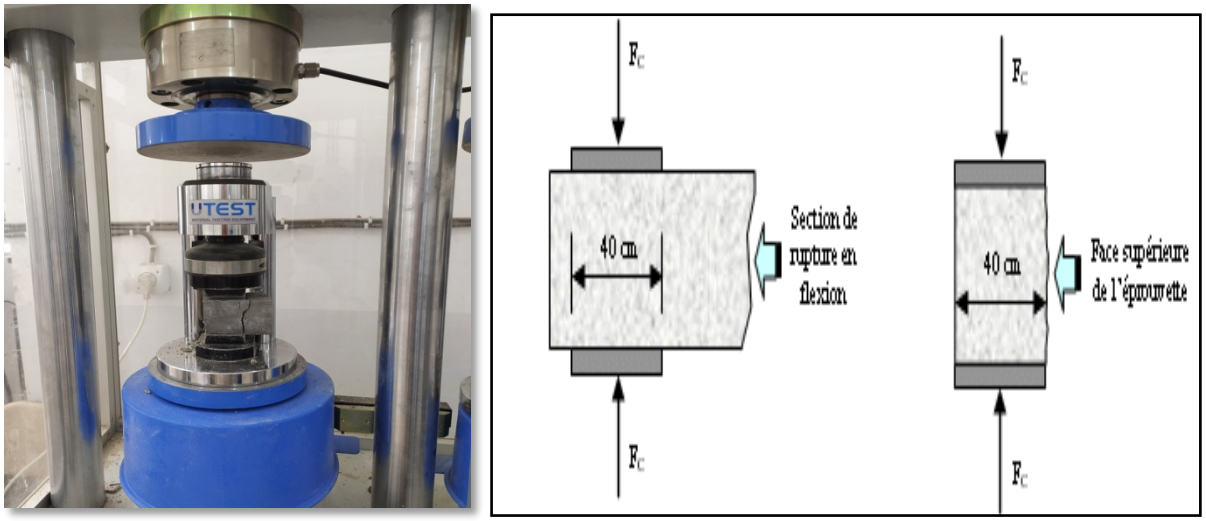


Figure II.16 : Essai de compression sur éprouvette béton.

B. Essai de la résistance à la traction par flexion

À l´âge requis, les éprouvettes sont brisées par flexion en deux moitiés selon la norme **[EN 196-1] [58]**. C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (Par trois points), une éprouvette prismatique (4x4x16) cm de côté **a** et de longueur **L**. La figure II.17 montre les étapes de l'essai.

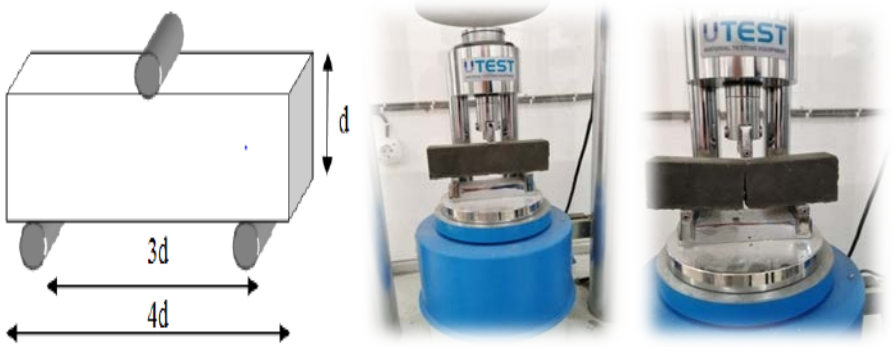


Figure II.17 : Essai de traction par flexion sur béton.

La contrainte de flexion sur la fibre inférieure est donnée par la formule suivante :

Avec : $\sigma_t = \frac{M}{I} v$

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge : $M = \frac{FfL}{4}$

I : Moment d'inertie de la section transversale : $I = \frac{d4}{12}$

v : La distance de la fibre inférieure la plus éloignée : $v = \frac{d}{2}$

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante : $\sigma_t = \frac{M15FfL}{d3}$

C. Essai de la vitesse ultrasonique

Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement Par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage pour chaque éprouvette. Les essais à l'ultrason ont été effectués en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit

perpendiculaire au sens de confection. Sur les faces opposées de l'éprouvette on a placé les deux transducteurs en interposant entre eux une couche mince de vaseline, puis l'enregistrement du temps de transit en micro seconde est réalisé. La figure II.18 montre les étapes de l'essai conforment a la norme **NF EN 12504-4 [59]**.



Figure II.18 : Etalonnage et mesure du temps de parcours des ondes ultrasonores.

D. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton léger dépend principalement du module d'élasticité des granulats et de celui de la pâte de ciment. Les valeurs usuelles du module d'élasticité du granulat léger varient entre : 3000 et 18000 N/mm2 et n'atteignent qu'une fraction du module d'élasticité du granulat normal. En général, il est même inférieur à celui de la pâte de ciment.
Selon le type de granulat léger, la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger, le module d'élasticité du béton léger de construction varie entre 5000 et 24000 N/mm2. A résistances à la compression identiques, le béton léger présente un module d'élasticité 30 à 70 % inférieur à celui du béton normal.
Le module d'élasticité du béton léger diminue avec sa masse volumique. Cette dépendance est illustrée.

E. Conductivité thermique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesurés à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme **ISO 8497-1 [60]**. Le CT-mètre c'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton. Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite selon la norme **[NF EN 993-15] [61]**.

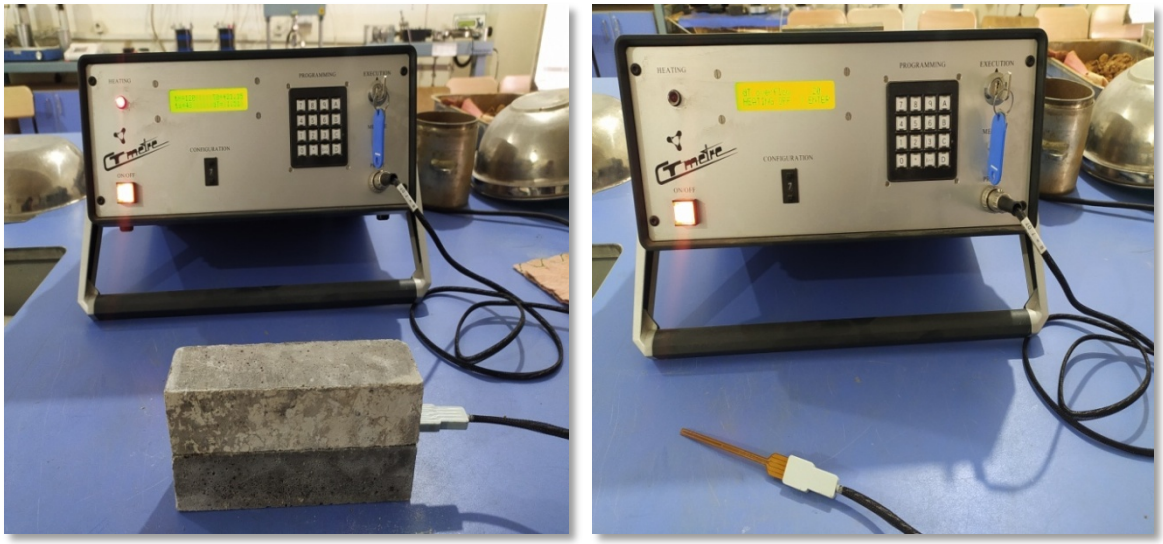


Figure II.19: Le CT-mètre et ses composants.

II.5.4.Des essais de la durabilité

A. Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau **[NF EN 18-459] [62]** a été mesurée selon la recommandation de l'AFPC AFREM. Les échantillons ont d'abord été séchés dans une étuve à 100 °C, jusqu'à stabilisation de la masse ($\mathbf{M_{sec}}$), puis l'air présent dans les pores de mortier a été évacué à l'aide d'une pompe à vide. La masse des cubes de mortier entièrement saturés a

été mesurée sous l'eau ($\mathbf{M_{eau}}$) et dans l'air ($\mathbf{M_{air}}$). La porosité totale ($\boldsymbol{\varepsilon}$%) a été calculée en utilisant l'équation :

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\%) = \frac{\mathbf{M_{air} - M_{sec}}}{\mathbf{M_{air} - M_{eau}}} \times \mathbf{100}$$



Figure II.20 : Essai de porosité accessible à l'eau.

B. Absorption d'eau par capillarité

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(II.20), et pendant chaque intervalle de temps (0min,6 min,12 min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h,48h ,72h ,96h,144h,168h) 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) **[NE 13057] [63]** .

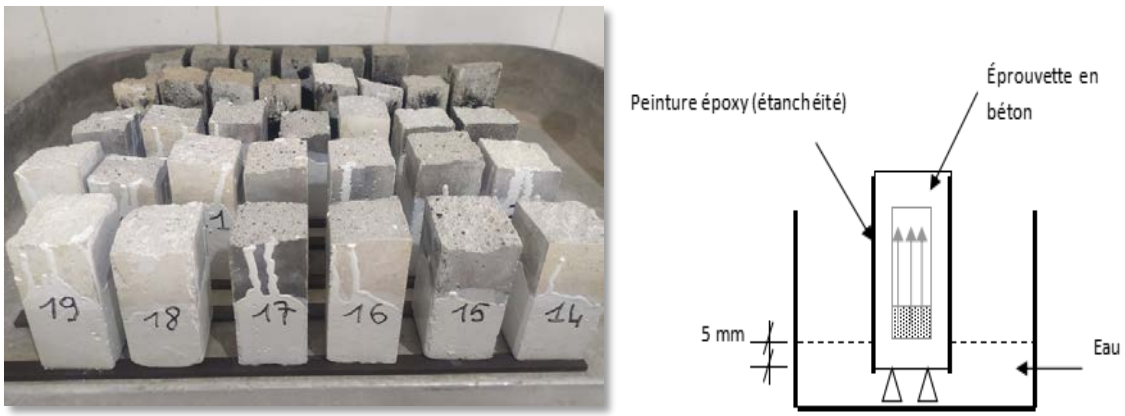


Figure II.21 : Essai de l'absorption d'eau par capillarité.

C. Perte au feu

Conformément à la norme ISO 834, six échantillons de demi-prismes, obtenus après des essais de flexion sur trois échantillons mesurant 4 × 4 × 16 cm à 90 jours, ont été sélectionnés pour évaluer leur résistance au feu. Les échantillons ont été séchés dans une étuve à 105°C pendant 24 heures pour éliminer toute humidité, puis chauffés dans un four à moufle (Figure II.22) à différentes températures de 400°C, 600°C et 800°C avec une vitesse de chauffage de 10°C/min (Figure II.22) pour maintenir des températures constantes dans le four pendant deux heures. Tous les échantillons ont ensuite été refroidis à l'air libre pendant 24 heures.



Figure II.22 : Echauffement des échantillons dans un four à moufle.

Pour chaque température, les mesures de perte de masse (perte de masse (%)) et les résultats de résistance à la compression résiduelle (RCR) ont été évalués à l'aide des relations suivantes :

$$\text{Perte de masse}\,(\%) = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

$$\text{RCR}\,(\%) = \frac{RC2}{RC1} \times 100$$

Où

M1: la masse de l'échantillon avant le chauffage en (Kg).

M2 : la masse de l'échantillon après le chauffage en (Kg).

RCR : la résistance à la compression résiduelle en (%).

RC1 : la résistance à la compression résiduelle de l'échantillon avant le chauffage en (MPa).

RC2 : la résistance à la compression résiduelle de l'échantillon après le chauffage en (MPa).

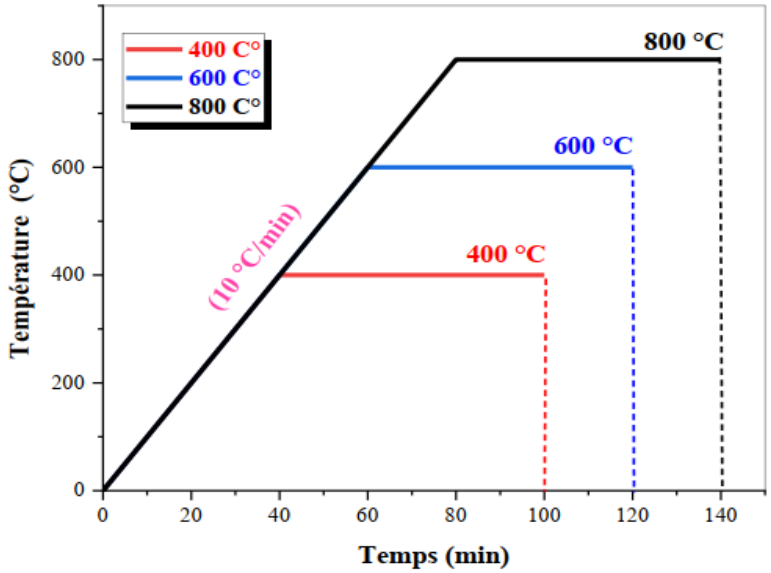


Figure II.23 : Courbes temps-température pour différentes températures.

D. Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion a été mesurée sur des échantillons cubiques de 7x7x7 cm, conformément à la norme ASTM C779. Le test a été effectué à 28 jours à l'aide d'une machine d'essai d'abrasion, comme décrit dans la figure II.24. Ce test permet de déterminer le coefficient d'abrasion (AC, exprimé en kg/m²).



Figure II.24 : Diapositif de l’essai de la résistance à l’abrasion.

La machine comprenait un disque en fonte d'un diamètre de 200 mm, fonctionnant à une vitesse de 30 ± 1 cycles/min. Avant l'expérience, les échantillons ont été séchés dans un four à 105°C pendant 24 heures. Pendant le test, 20 g de sable sec ont été utilisés pour le travail d'abrasion. Chaque échantillon cubique a été examiné sur quatre surfaces avec une trajectoire de meulage de 600 m ; en détail, chaque surface a été abrasée cinq fois avec une trajectoire de broyage de 150 m. Les surfaces abrasées provenaient des quatre faces latérales de l'échantillon. Au début et à la fin de chaque essai d'abrasion, la masse de l'échantillon testé a été mesurée pour déterminer le pourcentage de perte de masse. Le coefficient d'abrasion (AC) est calculé selon la formule suivante :

$$AC = \frac{m0 - m1}{A}$$

Où

m 0 : la masse de l'échantillon avant l'essai en (Kg) ; m 1 : la masse de l'échantillon après l'essai en (Kg); A : la surface de l'échantillon avant l'essai en (m) ; AC : le coefficient d'abrasion en (Kg/m).

II.6 Variable étudié

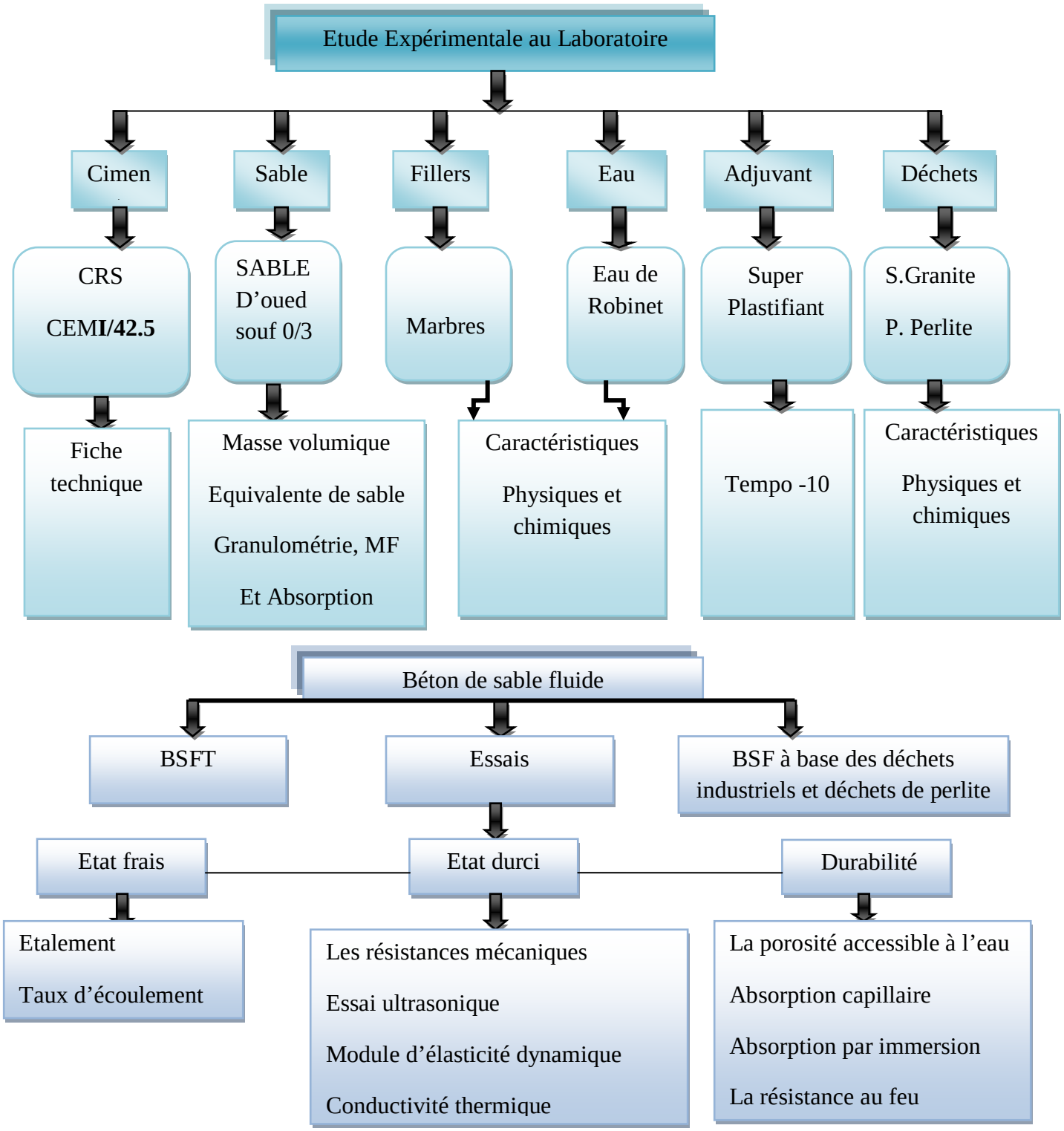


Figure II.25: Variable étudier.

II.7 .Conclusion

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché Algérien tels que le ciment, les granulats, les super plastifiants. On a réalisés des essais importants pour déterminer les caractéristiques Rhéologiques et mécaniques. Tout dans le but de connaître l'effet des déchets de granite, perlite sur le béton de sable fluide.

Chapitre III
Résultats et Interprétation



III.1 Introduction

L'objectif de l'étude expérimental est d'étudier l'effet du combinaison les déchets industriel de granite et de perlite dans la fabrication du béton de sable fluide(BSF) et sur les caractéristiques mécanique et rhéologique d'un (BSF) à base des matériaux locaux .Les résultats obtenus suites aux essais entrepris, sont regroupés, selon l'âge, le type d'essai et le type de béton afin de permettre la compréhension et l'exploitation de ces derniers de la manière la plus pratique et la plus aisée.

III.2. Comportent de béton sable fluide (BSF) à l'état frais

III.2.1. Effets de la poudre de perlite et le sable de granite sur l'étalement de BSF

Les résultats de l'étalement des (BSF) en fonction de la teneur en PP et SG, sont représentés sur la figure III.1**.** La figure montre que les valeurs de l'étalement étaient comprises entre 270 et 320 mm dans l'intervalle recommandé par l'EFNARC.Elles représenteront donc la capacité d'écoulement du BSF sans ségrégation et ressuage. Cependant, les résultats obtenus montrent une augmentation de l'étalement avec l'accroissement de taux de substitution de 5 à 15% dans les mélanges contenant de la poudre de perlite (PP).

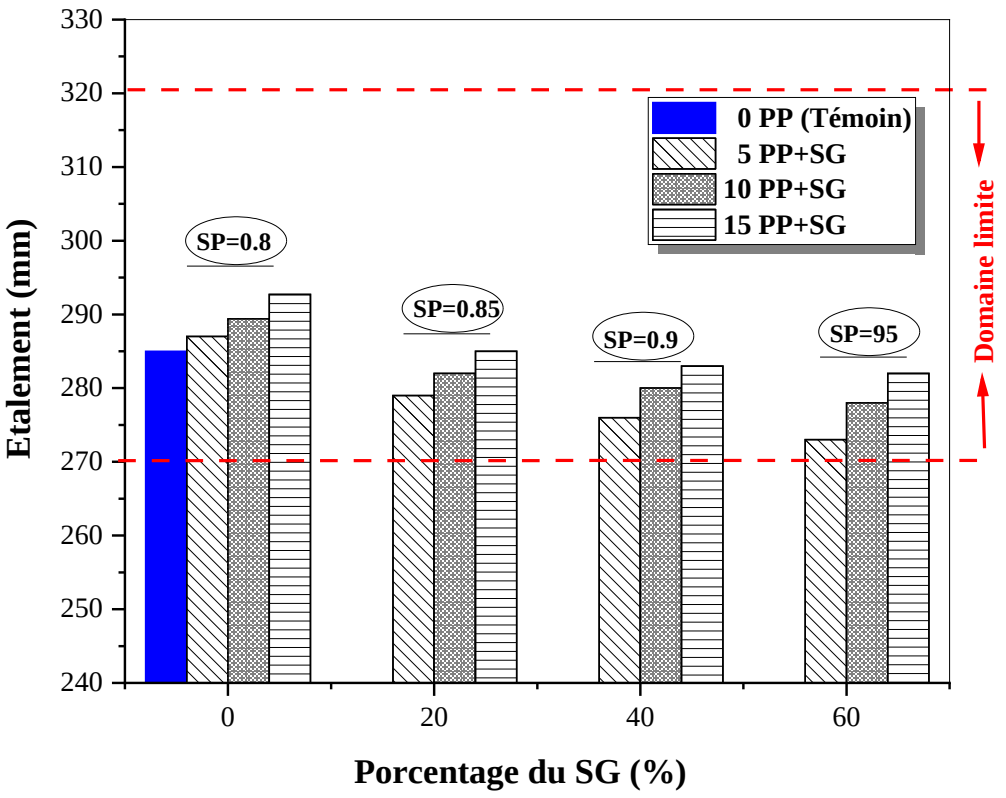


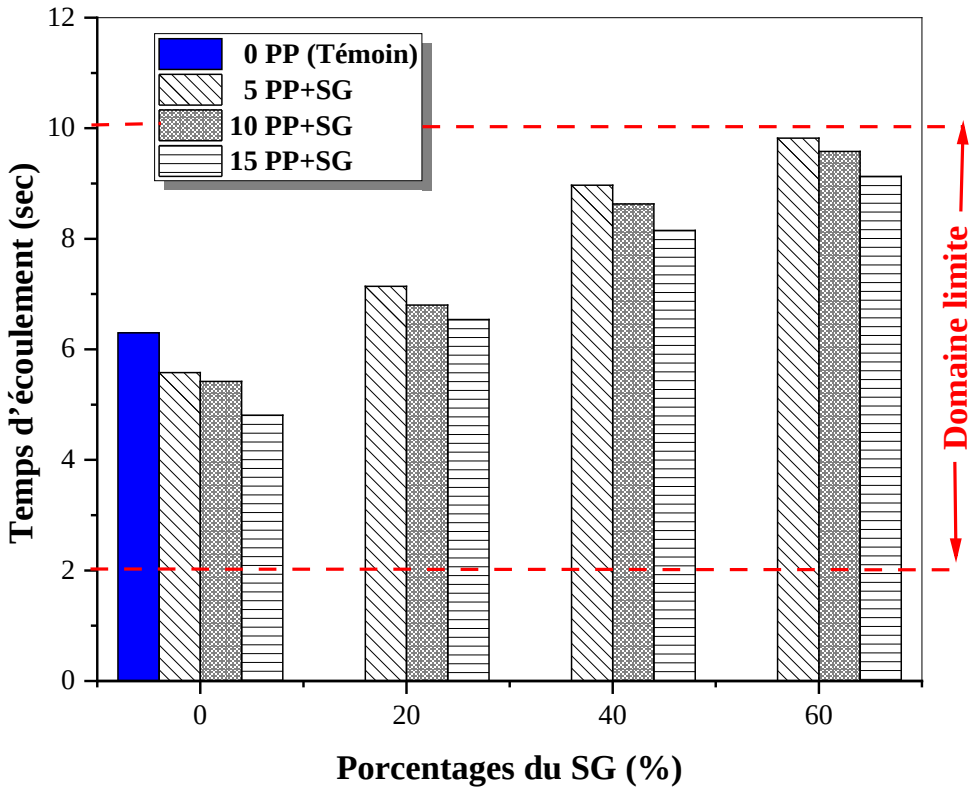
Figure III.1 : Etalement des différents mélanges de BSF.

Cette augmentation est plus prononcée au-delà de 10% de PP. Ceci peut être expliqué par la hydratation long de la PP par rapport le ciment, ce qui donné une quantité d'eau reste libre dans le mélanges du BSF, qui donc amélioré l'ouvrabilité du BSF. En outre, une diminution de l'étalement est observée dans les mélanges incluant SG ce qui indique une diminution de la fluidité, grâce à l'effet négatif de SG grâce à la forme angulaire des particules du SG et leur surface rageuse. L'utilisation de ses deux matériaux en combinaison a été trouvée bénéfique, car elle permet d'atténuer l'effet négatif de l'utilisation de SG avec le ciment ordinaire sur la déformabilité des BSF surtout à des pourcentages de 40% et 60% de SG.

III.2.2.Taux d'écoulement (V-Funnel)

La figure III.2 montre la variation du temps d'écoulement par le mini V-funnel pour les BSF en fonction de la teneur en PP et SG. D'après la figure on remarque que la capacité de passage pour tous les BSF donne des temps d'écoulement dans la plage recommandée de 2 à 10 secs, par l'EFNARC.Ces résultats montrent que l'introduction du PP seul a démunie le temps d'écoulement et la viscosité plastique des BSF.

L'analyse des résultats montre aussi l'utilisation de SG dans les mélanges fournit un effet négatif sur les temps d'écoulement des BSF. Le plus petit temps d'écoulement de celui du BAP avec 5%PP, 10%PP et 15%PP est de 750 sec, 745 sec et 740 sec respectivement, alors que le meilleur est celui du BSF, qui contient de 60 % de SG, est de 750 sec, 745 sec et 740 sec pour les mélanges 5PP+60SG, 10PP+60SG et 15PP+60SG respectivement.



FigureIII.2 : Taux d'écoulement des différents mélanges de BSF.

Cette augmentation des temps d'écoulement des BSF a été en raison de la texture régleuse du granite qui a favorisé des efforts de frouement entre les particules des granulats en comparaison par rapport le sable naturel. Toutefois, il y a eu une légère augmentation de l'écoulement des mélanges de BSF avec 20% de SG par rapport à ceux avec un SG de 40 % et de 60 %; cela était dû à la différence du dosage de SP, car il faut noter que claque pourcentage de SG exige la quantité de SP nécessaire pour atteindre la capacité de remplissage visée pour obtenir des BSF caractérisé par des temps d'écoulement acceptable pour un béton fluide (2 à 10 sec).

La figure III.3 illustre, la relation entre l'étalement et le temps d'écoulement pour les différents mélanges des BSF.La figure III.3illustre une bonne corrélation linéaire entre les deux paramètres avec un coefficient de corrélation acceptable (R2=0.84).

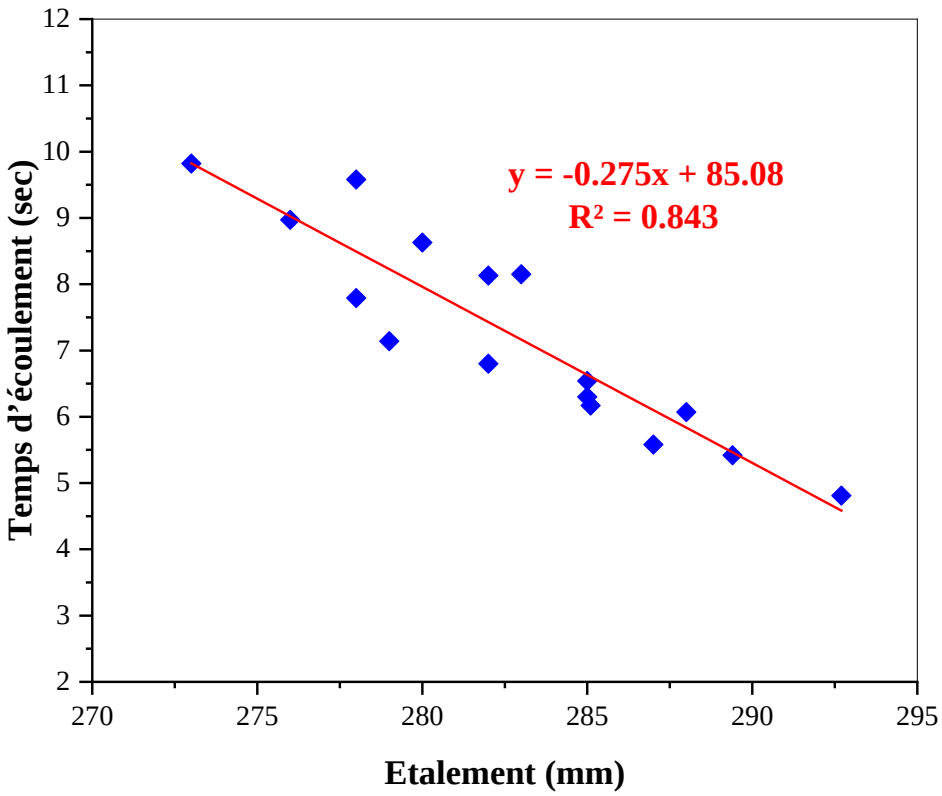


Figure III 3. Corrélation entre l'étalement et le temps d'écoulement des déférents mélanges deBSF

III.3. Comportent de béton sable fluide (BSF) à l'état durci

III.3.1.Résistance à la compression

La figure III.4 (a, b et c) montre la variation de la résistance à la compression des différents mélanges des BSF à 7et 28 jours. La figure montre une augmentation relative de la résistance à la compression avec l'augmentation du pourcentage de PP. Au-delà de 5% du contenu en pp, il y a eu une perte de résistance à tous les âges de durcissement par rapport à 5% du PP. La résistance à la compression de 7 jours du BSFT (PP+SG) est de 22.27 MPa, ce qui augmente avec l'introduction de PP à 37.93 MPapour les mélanges fabriqués avec 5%, et démunie à 36.73 MPa et 35.94 MPa pour les mélanges fabriqués avec 10% et 15% PP respectivement.

D'après la figure III.4 (a, b et c), une évolution similaire de la résistance à la compression à 28 jours a été observée cela peut être dû à la progression de la réaction d'hydratation. De même, la résistance à la compression à 28 jours des mélanges de BSF augmente de 30.97 MPa à 48.7 MPapour les mélanges fabriqués avec 5% du PP, et à 42.1 MPa et 41.61 MPapour les mélanges fabriqués avec 10% et 15% PP respectivement, ce qui représente une augmentation de 23%, 28% et 20% du taux de résistance par rapport au BAPT. Cette amélioration de la

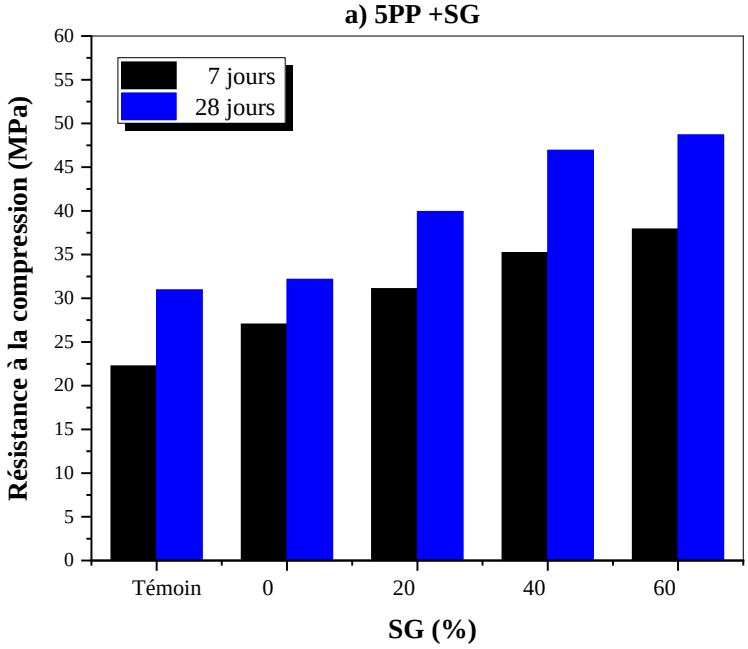
résistance avec l'introduction de PP à 28 jours s'explique par la réaction pouzzolanique avec $Ca(OH)_2$ à long terme.

Les résultats ont montré que l'élimination du $Ca(OH)_2$ et l'ajout de C-S-H par la réaction pouzzolanique sont les clés pour augmenter la résistance à la compression du béton. Les résultats ont indiqué aussi que la quantité optimale pour avoir une résistance maximale avec 5% de PP quel que soit l'âge de durcissement. En revanche, la réaction de PP a amélioré la résistance en raison de l'effet pouzzolanique et de remplissage dans les pores. Mais, l'augmentation du niveau de substitution au-delà de 5% réduira la résistance, cela peut être dû à l'effet de dilution du clinker où la quantité des produits de clinker dans le ciment diminue par le remplaçant élevé de PP.Par conséquent, la teneur en portlandite dans le produit d'hydratation disponible pour la réaction pouzzolanique de PP diminue. Cela conduit à la formation d'une quantité moindre de gel C-S-H supplémentaire qui participe par la suite à la réduction de la résistance.

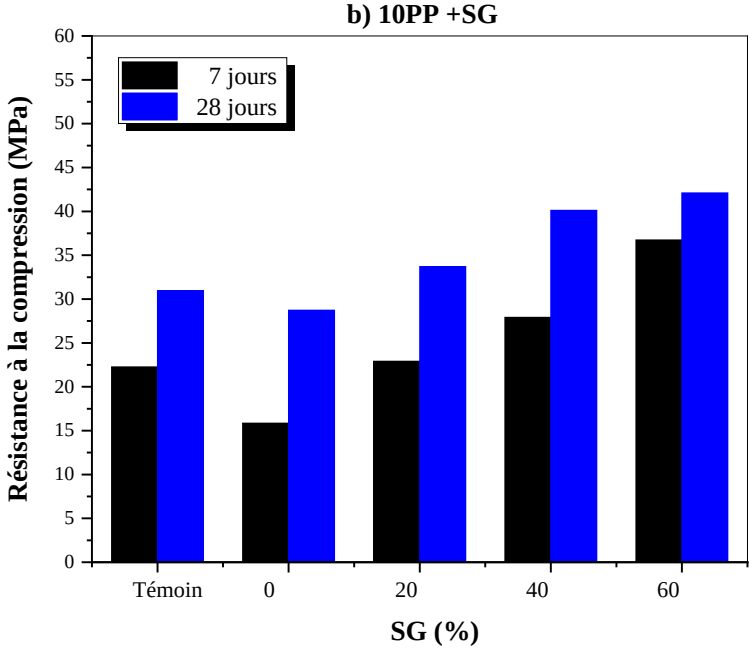
De plus, on remarque aussi sur la figure III.4 (a, b et c), que l'ajout de SG a augmenté la résistance à la compression des BSF. Ceci s'explique par la réaction pouzzolanique du PP qui peut compenser la résistance à la compression à long terme. La résistance à la compression à 28 jours des mélanges de BSF passe de 60 MPa à 62,31 MPa, 69,31 MPa et 61,8 MPa pour les mélanges 5PP + 60SG, 10PP + 60SG et 15PP + 60SG, qui sont de 4%, 16% et 3% plus élevés que le mélange témoin (BSFT).

Ce développement de la résistance peut être dû à la dureté des particules du SG par rapport le sable naturel, ainsi que la présence de PP qui pénètre et remplit les pores, ce qui contribue à améliorer la ZTI entre les SG et la pâte de ciment due à la forme angulaire et la surface rugueuse des grains du SG.

a) 5PP +SG



b) 10PP +SG



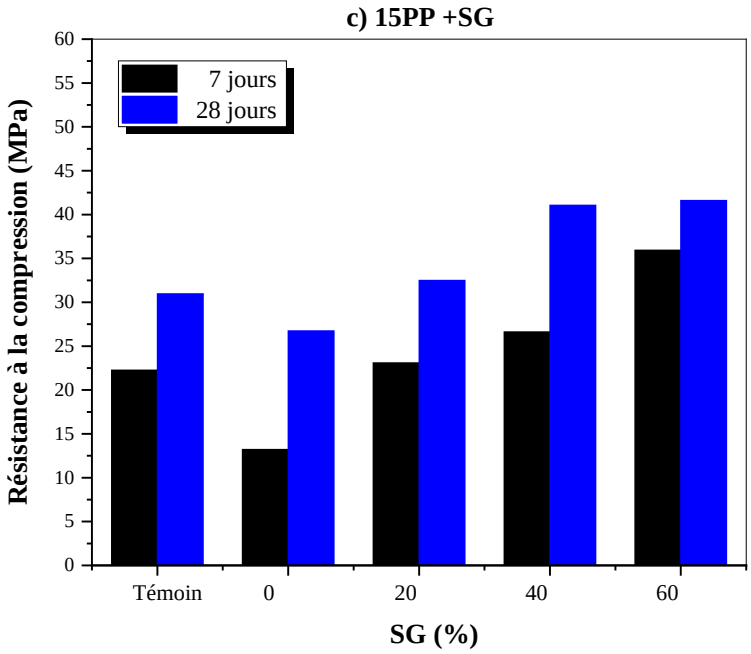


Figure III.4.Résistance à la compression des différents BSF.

III.3.2.Résistance à la flexion

L'évolution de résistance à la flexion des différents BSF à 7 et 28 jours est représentée sur la figureIII.5 (a, b et c). D'après ces figures, on constate que la résistance à la flexion des BSFaugmente, lorsque le SG est incorporé aux mélanges surtout avec des taux élevés de remplacement (40et 60%). La raison de l'amélioration de la résistance à la flexion du BSF avec le SG due a la surface rugueuse et la forme angulaire des particules de SG qui provoqué une bon adhérence entre les SG et la matrice de ciment, qui crée ainsi une zone dure à l'interface, où la défaillance se déclenche lorsque la charge est appliquée.

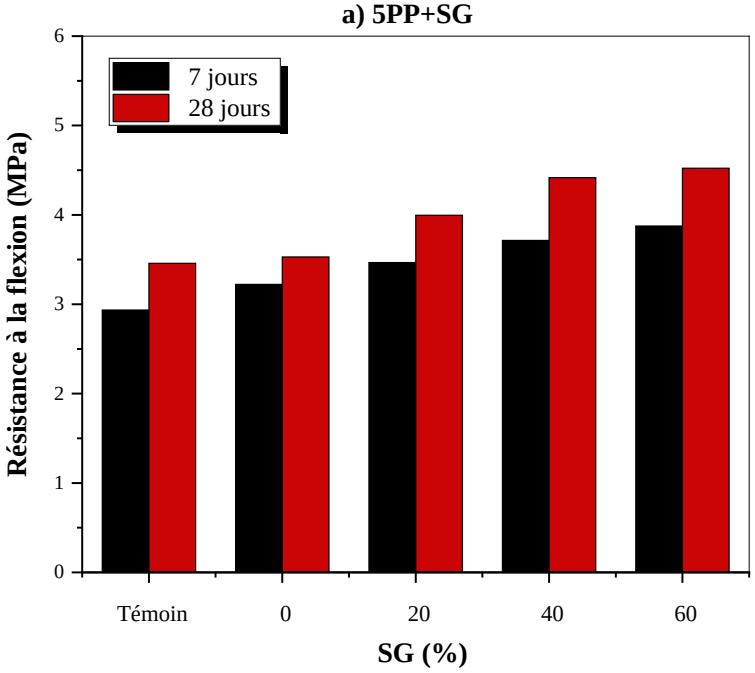
De plus, il est illustré sur la figure III.5 (a, b et c)que l'amélioration de la résistance à la flexion pour les mélanges de BSF pourrait être atténuée par l'incorporation de PP dans le béton. La résistance à la flexion avec la présence de PP sans SG augmente avec l'augmentation des quantités de PP jusqu'à 5%. La résistance à la flexion à l'âge de 28 jours du mélange témoin (BSFT) est de 5.45 MPa, ce qui était augmentée à 6.1 MPapour les mélanges fabriqués avec 5%, et diminué à6.3 MPa et 5.9 MPa, pour l'incorporation de PP au taux de 10% et 15% respectivement.

Par exemple, les gains de résistance à la flexion de 11,8%, 15,6% et 9% sont observés respectivement, pour 5%, 10% et 15% de béton en PP, par rapport au BSFT. Alors que 2,1%, 3.3% et 1% des gains de résistance à la flexion sont détectés pour le béton avec 5PP+60SG, 10PP+60SG et 15PP+60SG respectivement. L'amélioration de résistance à la flexion peut être

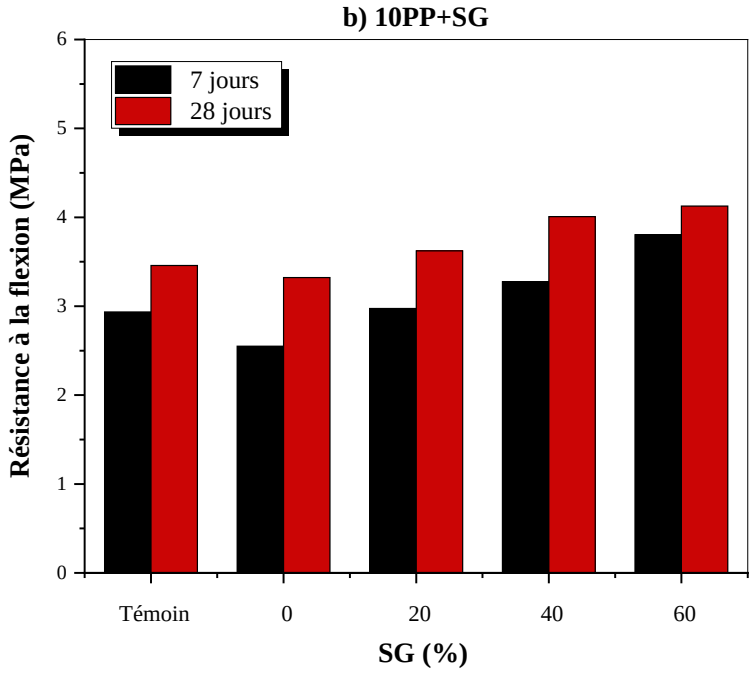
interprétée par la faible présence des vides dans le béton, qui est rempli par le gel C-S-H résultant de la réaction pouzzolanique du PP, ainsi que de forte adhérence (zone de transition (ITZ)) entre la pate cimentaire et les grains de SG.

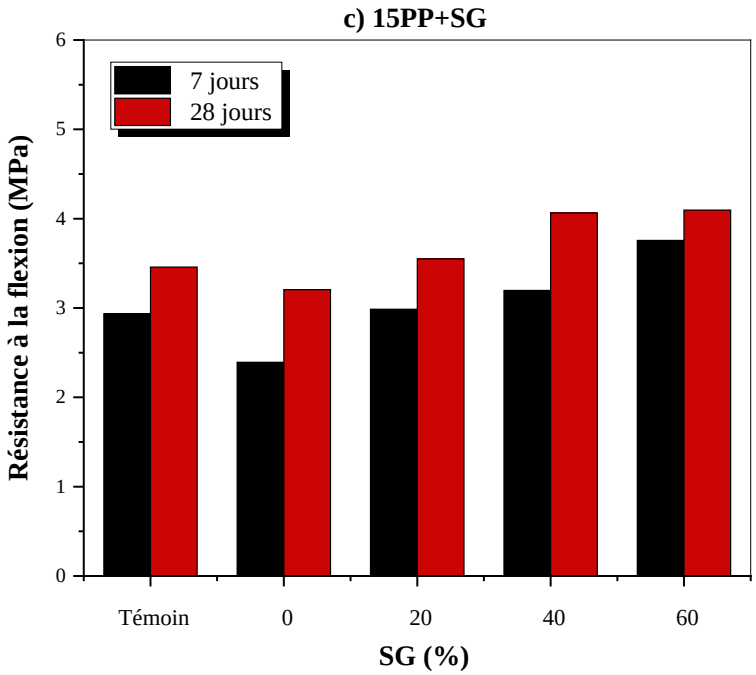
De plus, une autre constatation notable sur les résultats de résistance à la flexion est que la résistance à la flexion la plus élevée est produite lorsque 5% de PP a été ajouté au mélange de BSF.

a) 5PP+SG



b) 10PP+SG





FigureIII.5.Résistance à la flexion des différents BSF**.**

III.3.3.Vitesse d'ausculation sonique

La figure III.6 (a, b et c) illustre l'effet du PP et SG sur le test de la vitesse d'auscultation sonique (VAS) effectué après un durcissement de 7 et 28 jours de durcissement. Les résultats du test montrent que les valeurs de VAS augment à mesure que le pourcentage de SG augmente. Une augmentation optimale des valeurs de VAS est observée pour la substitution de SG par 60%.

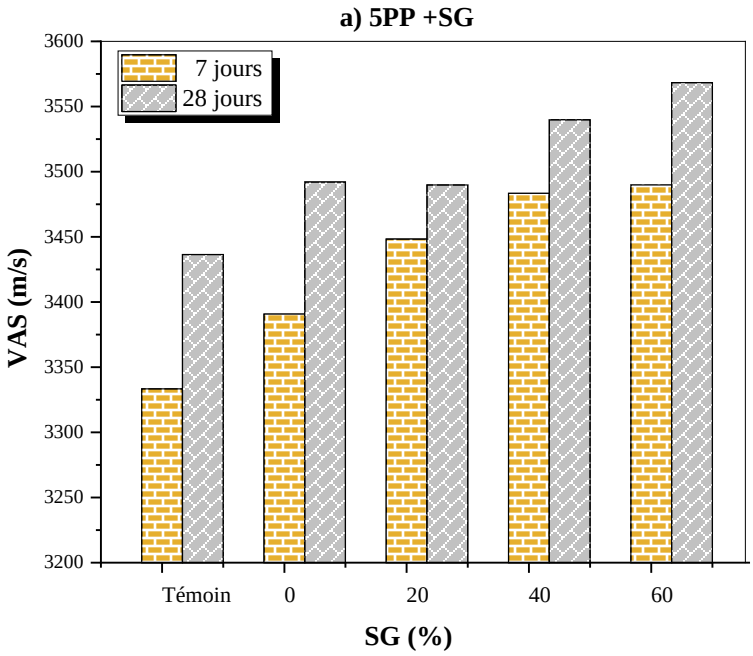
Étant donné que les valeurs de VAS dépendent de la densité, de l'homogénéité, des vides et des fissures dans le béton, l'absence de mortier résiduel sur la surface de SGdémunie le système des pores, augmente la densité et donné une bon l'homogénéité, minimisé ainsi les chemins pour le déplacement des ondes ultrasonores, ce qui en conséquence amélioré la vitesse d'impulsion.

Cependant, l'utilisation du PP offrant un chemin bénéfique pour augmenter les valeurs de VAS du BSF. Il est observé que les valeurs de VAS des mélanges sont supérieures à celles du BSFT de 4, 2%, 6, 3% et 2, 1% pour les mélanges 5PP + 0SG, 10PP + 0SG et 15PP + 0SG respectivement. IL est évident que laPP provoque une densification de la microstructure et un raffinement des pores dans la matrice de ciment et dans le ZTI. La capacité de remplissage des pores par PP et la génération de C–S–H supplémentaire dans les micro-fissures par la

réaction pouzzolanique réduisent la porosité et améliorent finalement les valeurs de VAS. La valeur de VAS plus élevée est enregistrée pour les mélanges avec 5% de PP.

En ce qui concerne la combinaison de PP et SG dans les mélanges des BSF. On note un taux de développement de VAS de BSF avec 60% de SG qui de l'ordre de 1, 31%, 2, 1% et 1, 27% avec l'ajout de PP à 5%, 10% et 15% respectivement par rapport au BSFT. Cette amélioration est due à l'effet bénéfique de PP. De plus, il peut être visualisé que les valeurs de VAS mesurées de tous les mélanges de béton varient de 3200 à 3600 m/s, ce qui est supérieur à 3000 m/s.

Par conséquent, les mélanges de béton sont classés de excellente qualité comme il est défini par la norme IS 13311 (partie 1) **[64]**.



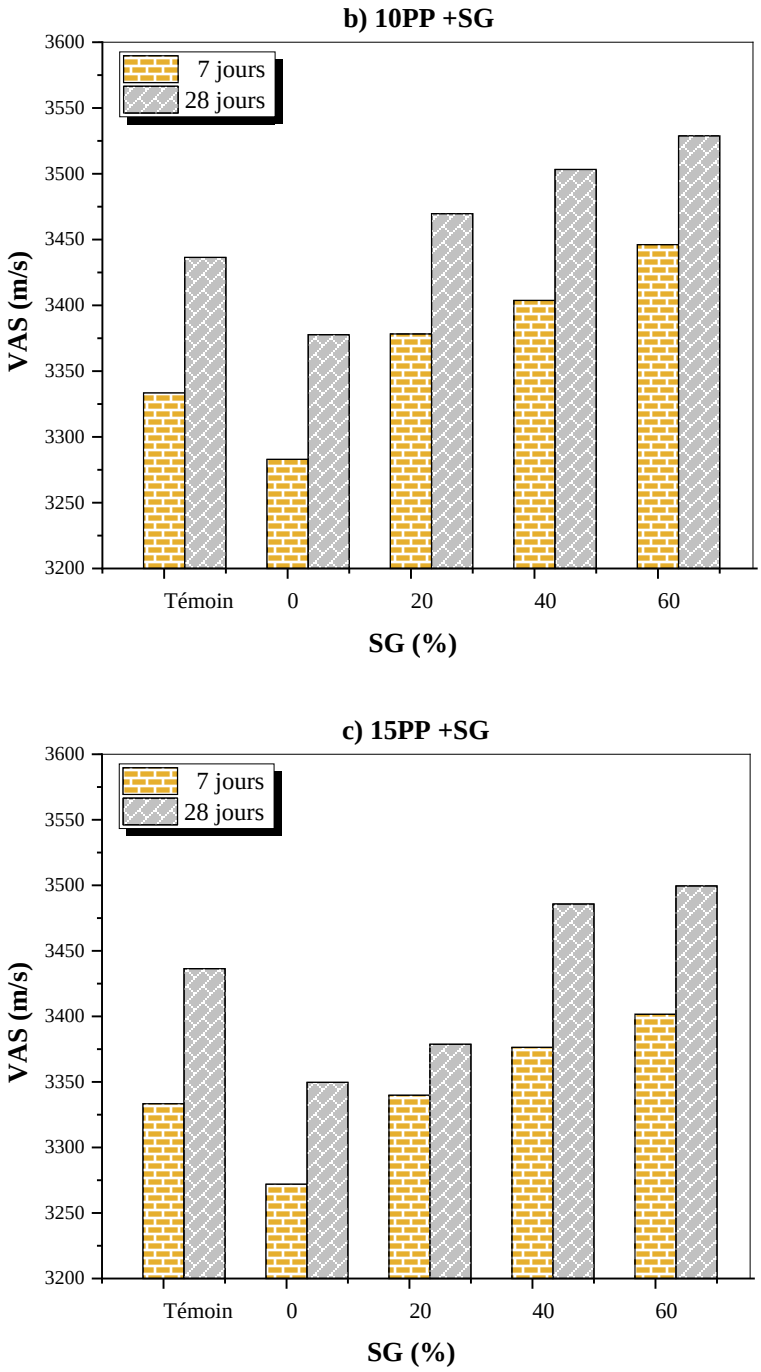


Figure III.6 : VAS des différents BSF.

III.3.4.Module d’élasticité

La figure III.7 (a, b et c) illustre l'effet du PP et SG sur le test du module d’élasticité effectué après un durcissement de 7, 28 et 90 jours. Les résultats du test montrent que les valeurs dumodule d’élasticitéaugment à mesure que le pourcentage de SG augmente. Une amélioration des valeurs dumodule d’élasticité est observée pour la substitution de SG par 60%. Étant donné que les valeurs du module d’élasticité dépendent de la résistance à la compression, et sous dernier dépendent de la densité, de l'homogénéité, des vides et des fissures dans le béton.

Cependant, l'utilisation du PP offrant un chemin bénéfique pour augmenter les valeurs du module d’élasticité du BSF. Il est observé que les valeurs du module d’élasticité des mélanges sont supérieures à celles du BSFT de 4,2%, 6,3% et 2,1% pour les mélanges 5PP + 0SG, 10PP + 0SG et 15PP + 0SG respectivement. Il est évident que laPP provoque une densification de la microstructure et un raffinement des pores dans la matrice de ciment et dans le ZTI. La capacité de remplissage des pores par PP et la génération de C–S–H supplémentaire dans les micro-fissures par la réaction pouzzolanique réduisent la porosité et améliorent finalement les valeurs du module d’élasticité. La valeur du module d’élasticité plus élevée est enregistrée pour les mélanges avec 10% de PP.

En ce qui concerne la combinaison de PP et SG dans les mélanges des BSF, on note un taux de développement du module d’élasticité desBSF avec 60% de SG qui de l’ordre de 1,31%, 2 ,1% et 1,27% avec l’ajout de PP à 5%, 10% et 15% respectivement par rapport au BSF. Cette amélioration est due à l’effet bénéfique de PP est. De plus, il peut être visualisé que les valeurs du module d’élasticité mesurées de tous les mélanges de béton varient de 28 à 40 GPa, ce qui est supérieur à 25GPa.Par conséquent, les mélanges de béton sont classés d’excellente qualité de déformations.

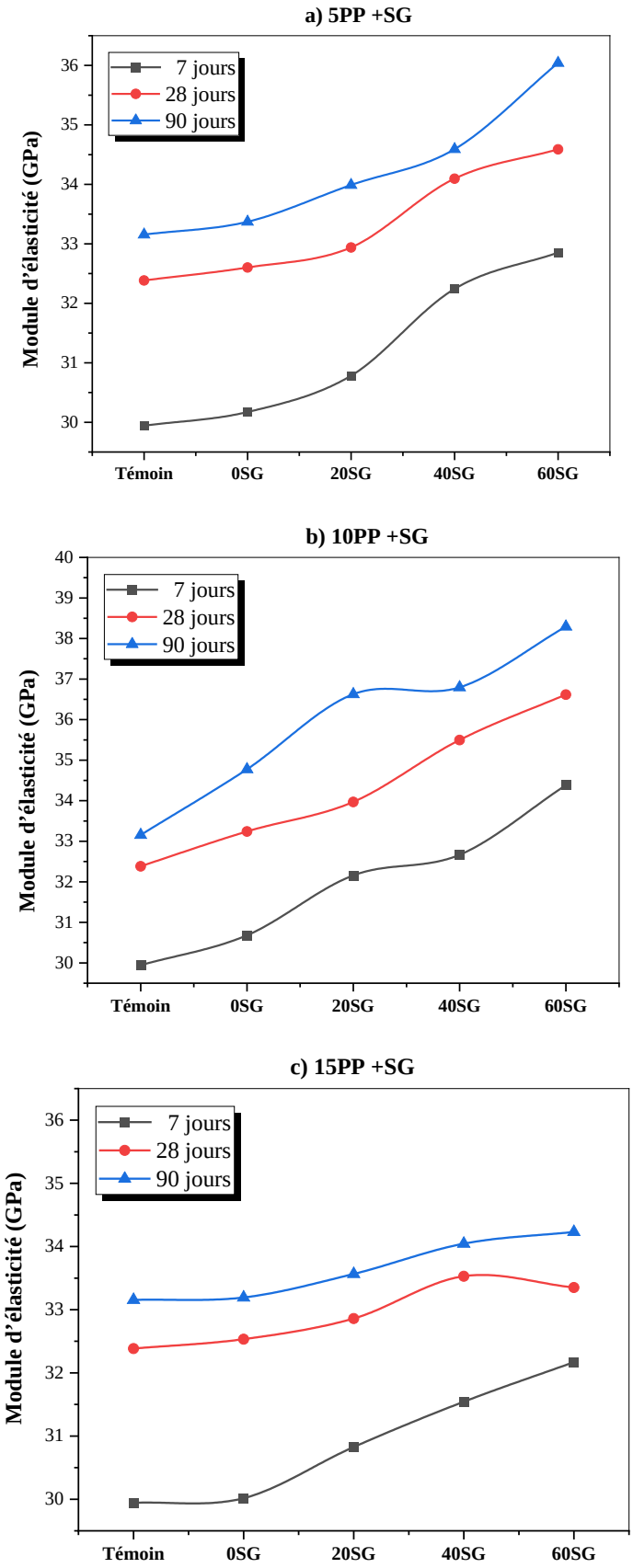


Figure III.7 : Module d'élasticité des différents BSF.

III.3.5.Conductivité thermique

L'évolution de la conductivité thermique(λ) des différents BSF est représentée sur la figure III.8. D'après ces figures, on constate que la conductivité thermique des BSF augmente, lorsque le SG est incorporé aux mélanges surtout avec des taux élevés de remplacement (60%).Étant donné que les valeurs de la conductivité thermique dépendent de la densité, de l'homogénéité, des vides et des fissures dans le béton, lefaible présence de mortier résiduel sur la surface de SGdiminue le système des pores, augment la densité et perturbé l'homogénéité, offrant ainsi une faible longueur de chemin pour le déplacement des chaleurs, ce qui en conséquence augment la conductivité thermique. L'augmentation de la conductivité thermiqueavec le pourcentage de SG est également observée dans les littératures.

Cependant, l'utilisation élevé de laPP(15%) offrant un chemin bénéfique pour diminue les valeurs de la conductivité thermique du BSF. Il est observé que les valeurs de la conductivité thermique des mélanges du BSF sont supérieures à celles du BSFT de 5.29%, pour les mélanges 5PP + 0SG et inferieur à celles du BSFT de 7.45% et 16.14% pour les mélanges 10PP + 0SG et 15PP + 0SG respectivement. Il est évident que la PPen pourcentages élevé provoque une densification de la microstructure et un raffinement des pores dans la matrice de ciment et dans le ZTI. La capacité de remplissage des pores par PP et la génération de C–S–H supplémentaire dans les micro-fissures par la réaction pouzzolanique réduisent la porosité et augmenter finalement les valeurs de la conductivité thermique. La valeur de la conductivité thermique plus élevée est enregistrée pour les mélanges avec 5% de PP.

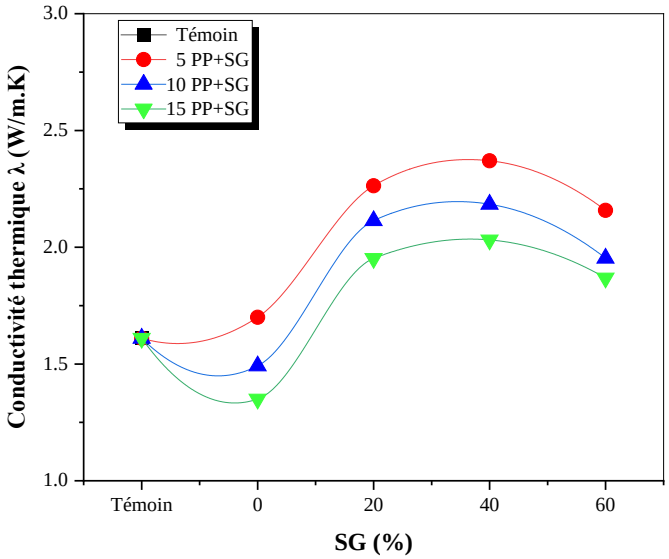
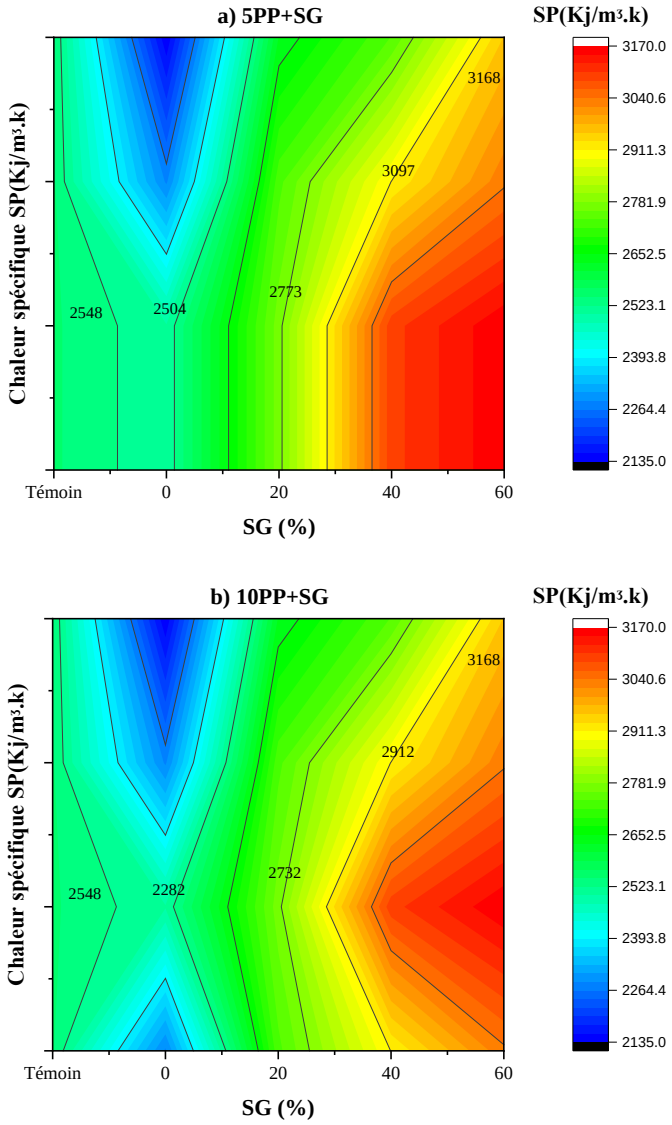
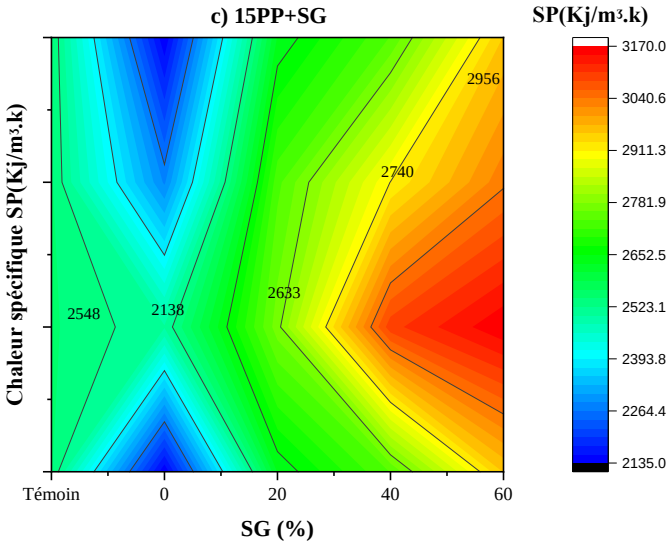


Figure III.8 : Evaluation de la conductivité thermique des différents BSF.

La figureIII.9(a, b et c) montre les résultats de la chaleur spécifique pour les différents mélanges de BSF déterminés en fonction de la substituions de PP et SG. D'après la figure 8 (a, b et c), on peut voir que la chaleur spécifique des mélanges de BSF contenant 5%, 10% et 15% de PP sans SG (5PP+0SG , 10PP+0SG et 15PP+0SG) diminue avec l'augmentation du contenu de la PP. La chaleur spécifique de mélanges detémoin (BSFT) était de 2548KJ/m^3.k, elle est diminue de 2504KJ/m^3.ket 2248KJ/m^3.k pour les mélanges contenant de 5 et 10 % de PP respectivement. Cependant, au-delà de 10% d'ajout du PP, la chaleur spécifique diminue de 2138KJ/m^3.k pour les mélanges contenant de 15% en PP, elle est inferieur à celle du béton témoin. Cette réduction en chaleur spécifique peut être attribuée à la microstructure poreux des BSF âpre l'ajout de 15% de la PP.





FigureIII.9 : Chaleur spécifique de déférents BSF.

III.3.6.Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion est un paramètre physico-mécanique qui donne un bon indicateur sur la durabilité du béton exposé à des charges de frottements. La figure III.10 présente la variation de résistance à l'abrasion sont estimé en terme ce la perte de masse des éprouvettes de BSF contenant différents pourcentages de SG et la PP. Le coefficient d'abrasion de tous les mélanges des BSF diminue à mesure que la substitution de sable de granite augmente,ce qui indique l'amélioration de la résistance à l'abrasion. Pour le mélange de béton de sable fluide témoin (BSFT), le coefficient d'abrasion était de 4.62 Kg/m^2, elle est diminue à 2.18 Kg/m^2, 2.53 Kg/m^2 et 3.33 Kg/m^2 avec une amélioration de l'ordre de 52.18%, 45.23% et 27.92% pour les mélanges 5PP+60SG, 10PP+60SG et 15PP+60SG respectivement, par rapport au mélange de référence (0PP + 0 SG).Les résultats ont montré que la résistance à l'abrasion optimale développée pour les mélanges BSF contenant de 5 % de PP avec 60 % de SG.Cette diminution des coefficients d'abrasion des BSF est due à la dureté des particules de granite par rapport au particule de sable naturel ainsi que le bon adhérence entre la pate cimentaire et les surfaces des particules de SG.

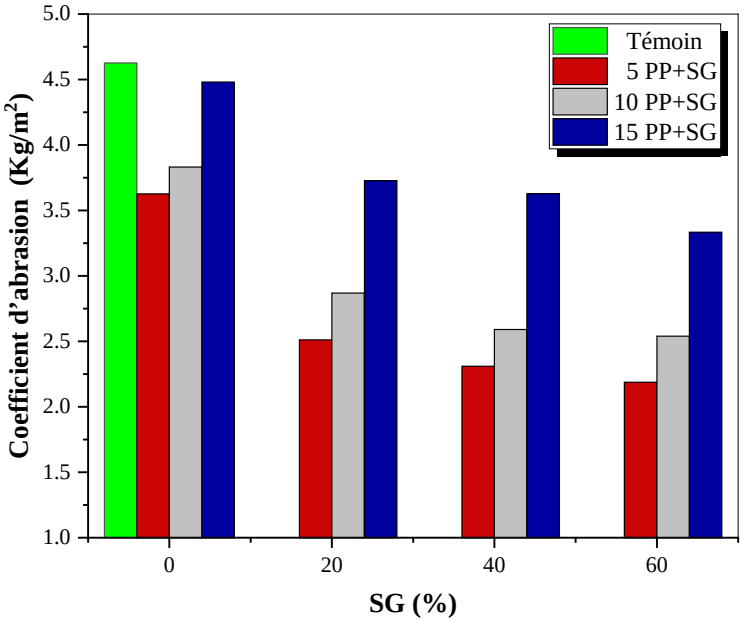


Figure III.10 : Evolution de la variation de la résistance à l'abrasion des différents BSF.

III.4. Durabilité

III.4.1.La Porositéaccessible à l'eau

L'influence du PP et SG sur le volume des vides de tous les mélanges de BSF sont déterminée à partir les résultats des essais de porosité est présente sur la figure III.11. Il est déduit d'après de la figure III.11, que le volume des vides diminué avec l'augmentation de SG. Pour le BSFT, le volume de vide est de 5.37%,la réduction est de 2.95%, 3.15% et 4.03% pour les mélanges de béton préparés avec 60% de SG(5PP+60SG, 10PP+60SG et 15PP+60SG) respectivement. Comme expliqué dans la section précédente, le volume plus faible des vides pour les mélanges à base SG est la conséquence de forte adhérence entre la pâte cimentaire et les particules de SG.De manière générale, l'incorporation de SGréduire le volume total des pores dans les BSF, ce qui entraine ainsi une porosité faible et une structure moins poreuse, produisant également unemicrostructure denseet plus complexe. Le volume des vides diminue considérablement grâce à l'incorporation de PP dans le béton (PP+0SG). Il ressort de la figure III .11 que, l'inclusion de 5%, 10% et 15% de PP dans le mélange de BSF diminue le volume des vides de 4.41% 4.98% et 5.16% respectivement, par rapport au mélange témoin.De plus, l'ajout de PP aux mélanges de BSF semble avoir un effet plus important sur la réduction du volume des vides. Pour les mélanges BSF contenant 60% de SG et 5-15% de PP.

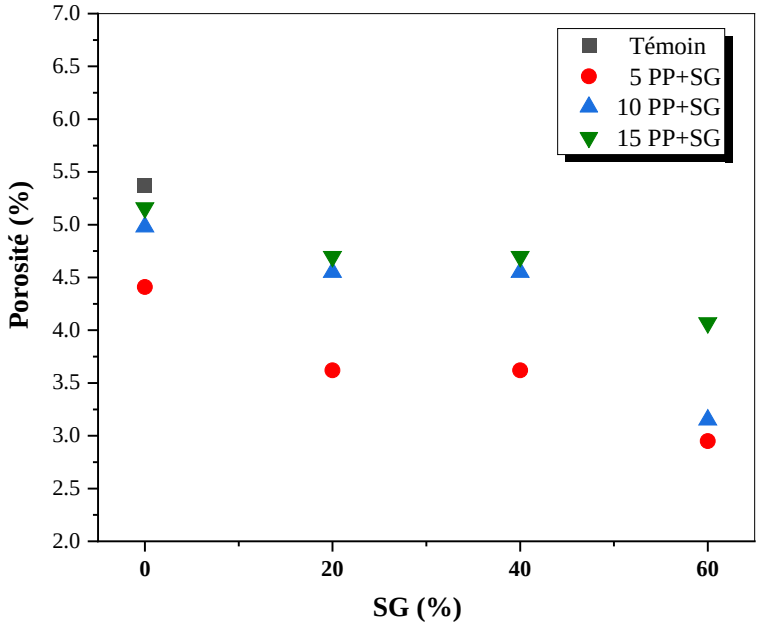


Figure III.11: Porosité des différents BSF.

III.4.2.Absorption d'eau

Lorsque la surface du béton durci est exposée à l'humidité, les pores du béton absorbent l'eau par aspiration capillaire. La détérioration sous cycle humide-sec et la durée de vie du béton peuvent être liées à son taux de sorptivité capillaire. L'influence de PP et SG sur l'absorption d'eau est présentée dans la figure III .12. Les valeurs de cette figure montrent une diminution de l'absorption avec le temps, ceci pour tous les mélanges. D'après cette figure III .12 on observe que le mélange de référence (BSFT) est celui qui a le coefficient d'absorption le plus grand, alors que le coefficient d'absorption des autres mélanges est plus petit, et diminue au fur et à mesure que la teneur en SG augmente.On remarque d'après les résultats obtenus une réduction significative de l'absorption d'eau surtout lorsque leur pourcentage de SG combiné atteint 60%. Cette réduction était de l'ordre de 63.82%, 62.97%, et 60.42% pour les mélanges avec 5PP + 60SG, 10PP + 60SG et 15PP + 60SG respectivement. Cette valeur faible de l'absorption d'eau est liée à la nature de granite qui est caractérisé par une granulométrie grossie de SG (0- 4mm).

Selon les résultats de la figure III.12, on note aussi que la capacité d'absorption d'eau diminue avec l'ajout de PP. La valeur optimale de l'absorption d'eau est produite dans la série des BSF avec 5% de PP, ceci est dû à la faible porosité par rapport aux autres séries (10% PP et 15% PP), l'augmentation de la porosité est due à la vitesse d'hydratation plus lente du PP. Ces résultats montrent que l'ajout de PP a diminué la capacité d'absorption par diminution de la

porosité, c'est-à-dire, la diminution du nombre des vides et pores existant dans le béton qui devient ainsi plus compact, plus résistant et plus étanche à l'eau.

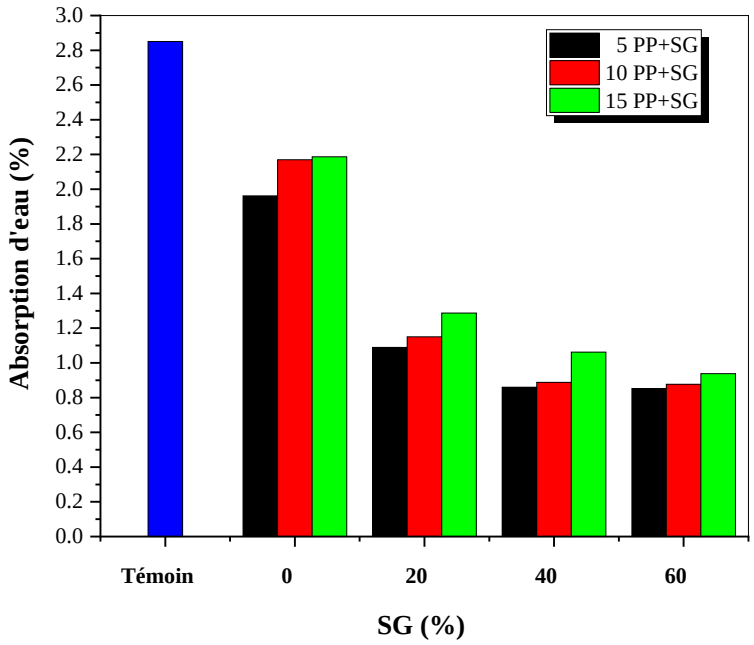


Figure III.12 : Évolution de l'absorption pour les différents BSF.

III.4.3.Résistance à haute température

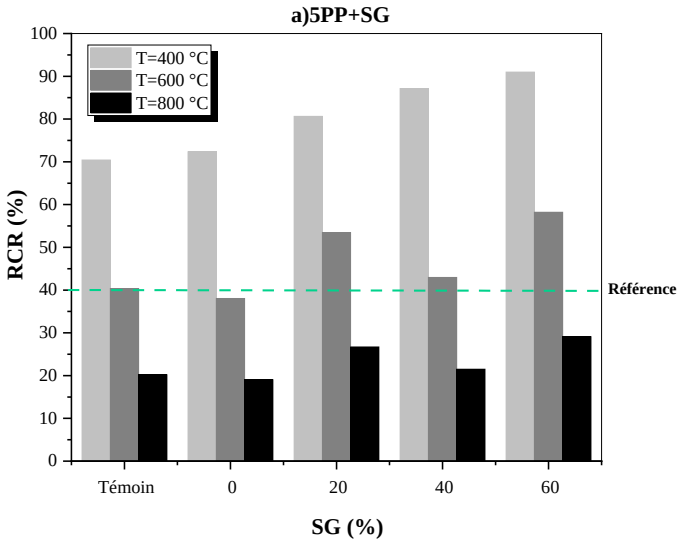
- **Perte de résistance**

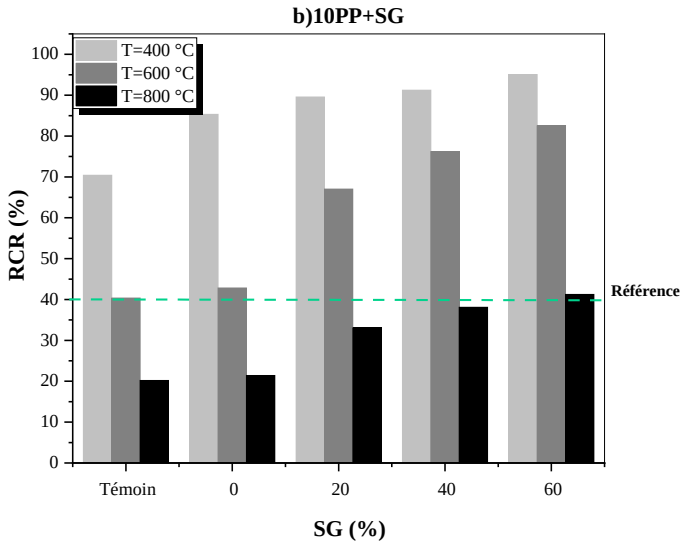
La figure III.13 (a, b et c) présente la variation de résistance à la compression résiduelle (RCR) des éprouvettes de BSF contenant différents pourcentages de SG et PP. La perte de résistance de tous les mélanges des BSF diminue à mesure que la température d'exposition augmente. Cette réduction est due à la déshydratation de l'ettringite, du gel C–S–H, des hydrates de calciques et de l'évaporation de l'eau des pores capillaires. D'après les résultats obtenus, on peut observer que pour les BSF exposés à 600°C, l'augmentation de la quantité des SG a entraîné une diminution de la RCR. Pour les BSF exposés à 800°C, la RCR a considérablement diminué plus que dans le cas d'exposition à 600°C.Un effondrement total a été observé pour des éprouvettes exposées à 800°C. Cependant, la RCR de tous les BSF préparés avec le SG était supérieure à celle des échantillons avec 100% de sable, ce qui en déduit que le SG ont contribué à l'amélioration de la RCR.

Concernant l'ajout de PP dans les BSF, et d'après les résultats obtenus, on remarque que les mélanges nommés 5PP, 10PP et 15PP présentent une RCR supérieur à celle du mélange témoin. L'ajout de 15% PP a augmenté la résistance à haute température du

BSFmieux que 5% et 10% en raison de la microstructure dense et de la faible porosité du mélange avec 5% et 10% de PP.Ce résultat confirme que 15% de PP avait une porosité élevée.

Le processus peut être également due à la dés-hydroxylation du $Ca(OH)_2$, de la dissociation de $CaCO_3$ en CaO et le CO_2 accompagné d'une recristallisation des phases non liantes du ciment hydraté, ce qui est connu comme l'effondrement de l'intégrité structurelle et de la perte en résistance à la compression.





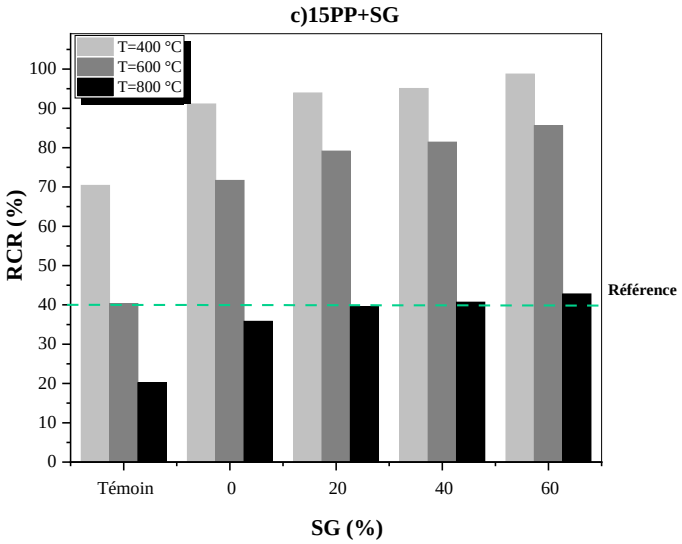


Figure III.13 : RCR pour les différents BSF.

- **Perte de masse**

La figure III.14 (a, b et c) montre les résultats de la variation de la masse des BSF avant et après exposition au chauffage. La figure III.14 montre que quelle que soit la température donnée, la perte de masse de l'échantillon témoin était supérieure à celle des BSF avec SG et la PP. Cet effet est peut être dû à un taux de sortie d'eau plus élevé dans le BSFT. De plus c'était trouvé précédemment que l'absorption d'eau des BSF témoin était plus élevée que celle des BSF à base SG etla PP. Cette perte de masse est attribuée à la décomposition d'autres composés par des processus tels que la décomposition ou la décarbonatation des portlandites.

Dans le cas d'exposition à 800°C, le al mélange composé de 5% de PP est celui qui présente la perte de masse la plus forte (4,5%) ; alors une perte de masse est enregistré d'environ 3.8% et 3% pour Les mélanges 10PP, 15PP respectivement.Lorsque les échantillons sont exposés à des températures plus élevées, la teneur en humidité des pores fins de la pâte de ciment et des granulats sera perdue, ainsi la structure de déshydratation du produit d'hydratation (C-SH) était également un facteur de perte de poids.

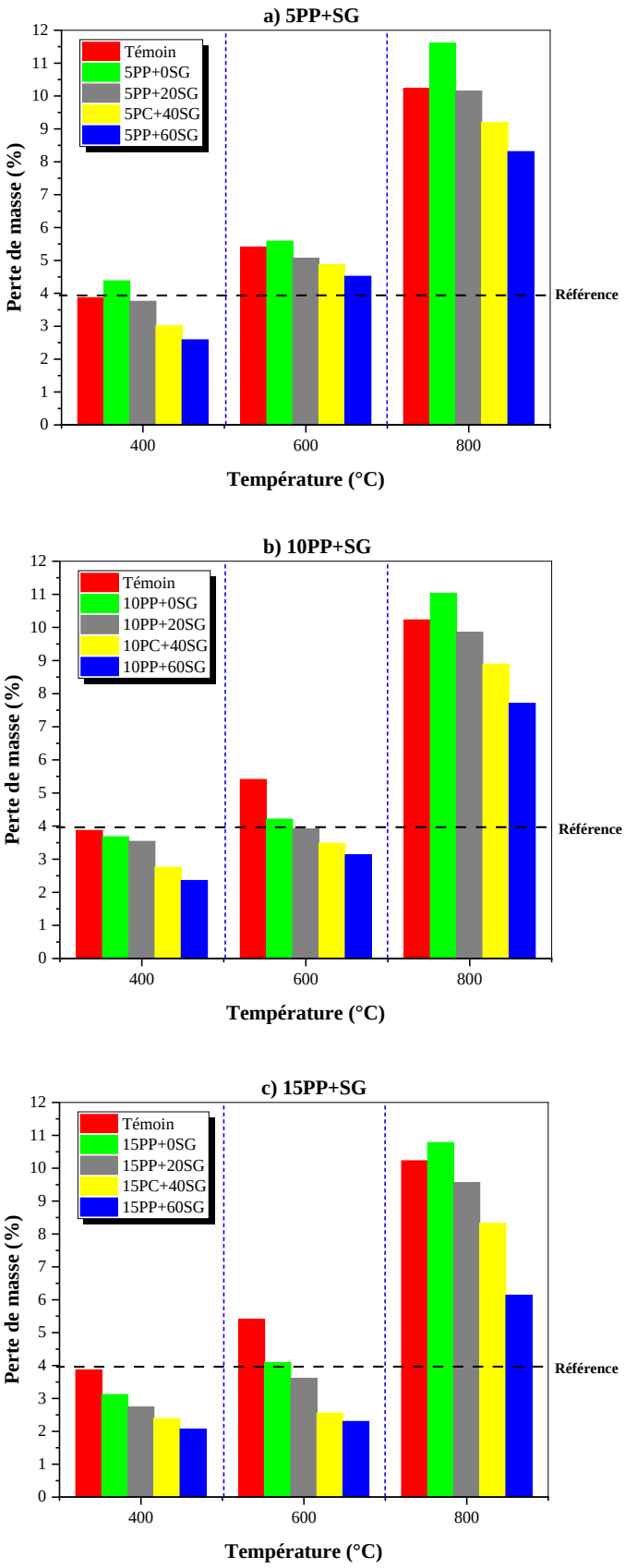


Figure III.14 : Perte de masse pour les différents BSF avant et après le feu.

III.5.Conclusion

- L'étalement de BSF est diminué en fonction d'augmentation de déchet de granite.
- Taux d'écoulement de BSF est augmenté en fonction d'augmentation de déchet de granite.
- La résistance à la compression de BSF est augmentée en fonction d'augmentation de déchets de perlite et de granite.
- La résistance à la flexion de BSF est augmentée en fonction d'augmentation de déchets de perlite et de granite.
- La vitesse ultrasonique de BSF est augmentée en fonction d'augmentation de déchets de perlite et de granite.
- Module d'élasticité de BSF est augmentée en fonction d'augmentation de déchet de perlite et de granite.
- Conductivité thermique de BSF est diminuée en fonction d'augmentation de déchetde perlite.
- La résistance à l'abrasion de BSF est diminuéeà mesure que la substitution de sable de granite et déchet de perlite.
- La porosité accessible à l'eau de BSF est diminuée en fonction d'augmentation de déchet de granite.
- L'absorption d'eau de BSF est diminuée en fonction d'augmentation de déchet de granite et déchet de perlite.
- La résistance à haute température de BSF est augmentée en fonction d'augmentation de déchet de perlite.

Conclusions Générales et Recommandations

Conclusions Générales

Les bétons à base de perlite, dans le domaine de la recherche des matériaux de construction, possèdent un fort potentiel de développement. Il est donc primordial de mener plus d'investigations sur ce type de matériaux. La présente étude dont l'objectif était la valorisation de la perlite de Hammam Boughrara (Maghnia) en vue de son utilisation comme ajout cimentaire pouzzolanique dans les mortiers, a contribué à apporter des réponses à la question posée dans la problématique et ainsi atteindre les objectifs tracés notamment ceux liés à l'environnement et au développement technologique.

Afin de voir la potentialité de ce matériau pouzzolaniques (perlite) en tant que substitut partiel dans les mortiers, des formulations des mortiers ont été développées (un mortier témoin et deux mortiers à base de 5 et 10 et 15% de perlite, un rapport E/L identique et un volume constant), pour mettre en évidence l'influence de la perlite sur le comportement mécanique et les propriétés thermo-physiques des mortiers dans lesquels elle est incorporée.

D'après l'étude expérimentale menée, il apparait d'une façon générale que la quantité d'ajout pouzzolanique, et la composition chimique du ciment sont les principaux paramètres qui influent sur la variation des résistances mécaniques (traction, compression) et thermiques des mortiers testés.

A l'issue des résultats obtenus nous sommes parvenues aux conclusions suivantes :

• A l'échelle de la pâte, nous avons conclu que pour obtenir une consistance normalisée du mélange (ciment, perlite et eau), la quantité d'eau nécessaire augmente proportionnellement avec le dosage de la perlite. Contrairement, nous avons remarqué que le temps de prise diminue avec l'augmentation de pourcentage de perlite, ainsi que l'augmentation de la quantité d'adjuvant nécessaire pour l'obtention de mélanges maniables et ouvrables et ayant une maniabilité plus ou moins constante et équivalente à celle du mortier témoin.

• A l'état durci, il a été conclu que la diminution d'absorption capillaire est parallèle avec l'augmentation de la perlite, et que la substitution de 20 % du ciment par la perlite est le taux le plus intéressant et avantageux, et qu'il offre une possibilité pour améliorer la durabilité des mortiers. Ainsi, on peut dire que la perlite a contribué à sceller les capillaires résultant de l'interaction du ciment, de l'eau et du sable.

• L'étude thermique a abouti à la conclusion que la conductivité thermique du mortier à base de 10 % de perlite est la plus faible comparée à celle du mortier témoin et incorporant 20% d'ajout. Le taux de 10% de perlite substitué au ciment est le taux le plus intéressant ce qui attribue à ce mortier un caractère d'isolant. La perlite peut donc être recommandée pour la fabrication de mortiers faiblement conducteurs de la chaleur d'où l'efficacité énergétique de ces matériaux.

• L'incorporation de la perlite génère une accélération de la résistance mécanique des mortiers dans lesquels elle est incorporée et ce à toutes les échéances.

• Le comportement mécanique du mortier contenant 20% de perlite affiche des résistances élevées, avec une évolution importante à 28 jours par rapport au témoin. Ce qui explique que l'ajout de la perlite naturelle dans le ciment améliore à long terme la résistance mécanique du mortier grâce au déclenchement de l'effet pouzzolanique de la perlite.

• En effet la perlite étant des produits naturels et ne passant donc pas par des processus industriels d'énergie coûteuse. Elles sont beaucoup moins chères que le ciment, qui lui, passe par des processus très coûteux, qui ont tout de même l'avantage d'atteindre des performances acceptables du point de vue de la résistance à la compression, la résistance à la traction et les propriétés thermiques.

Enfin, à travers tous les résultats présentés dans ce travail, nous pouvons conclure que la perlite du Maghnia est un minéral actif et de faible coût qui influe considérablement et positivement sur les propriétés des mortiers. La possibilité de valoriser la perlite et ce à des dosages allant jusqu'à 20% dans le but de diminuer le taux du ciment ainsi que son dégagement de gaz à effet de serre lors de sa fabrication, est un atout économique et écologique non négligeable.

Recommandations

Nous recommandons pour des futurs travaux l'étude :

- Etude le temps de prise du béton de sable fluide.
- Valorisation d'autres types de déches 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 de déchets de granite et de perlite.
- Durabilité de BSF à base de déchets de granite et de perlite.
- Influence de haute température sur le comportement de BSF à base de granite et perlite.

Références bibliographique

Références bibliographiques

[1] : Mathieu Duarand, Yamna Djellouliet et Cyrille Naoarine (dir) « Gestion des déchets » ISBN 978-2-7535-4181-8 Presse université de Rennes ,2015 ; www.pur-edition.fr. Les déchets et leur élimination. « Les déchets en chiffre : Edition 2015 » ADEME. Fiche 25 à 46.

[2] : Les déchets et leur élimination. « Les déchets en chiffre : Edition 2015 » ADEME. Fiche 25 à 46

[3] :https://www.mypaprecsolutions.com/wpcontent/uploads/2019/01/Paprec_IDF_Nord_De % CC%81chets_industriels_Banals_2.jpg.

[4] : https://www.valoservices.suez.fr/conseils/blog/valorisation-des-dechets-tout-savoir

[5] : https://www.dunod.com/sites/default/files/atoms/files/9782100743421/Feuilletage.pdf

[6]: Yang S., Yue X., Liu X., Tong Y., Properties of self-compacting lightweight concrete

containing recycled plastic particles, *Const. Build. Mater.*, 84 (2015) 444–453.

[7]: Asokan P., Osmani M., Price A.D.F., Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete, *Constr. Build. Mater.*, 24 (4) (2010)

448-460

[8]:https://www.g2d2.com/media/widgetkit/slide-traitement-dechet-dangerux-pateuxphytosanitaire-chimique-boule-refrigerateur 980a76f9b1fc46020a6a2624b3dc1a88.JPG

[9]: https://www.unicem.fr/wp-content/uploads/dechets-inertes-fotolia-32165578580x250.jpg

[10]:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3e/Valleyofdrums.jpg

[11]:https://mineralmilling.com/wp-content/uploads/2020/02/AdobeStock_189571266-smaller-1024x683.jpg

Références bibliographiques

[11]:https://www.couleurpigment.fr/WebRoot/ce_fr2/Shops/288750/4BBF/4638/DC1B/67E4/9A55/C0A8/8008/C67C/poudre-de-marbre-impalpable.JPG.

[11] : https://www.kremer-pigmente.com/elements/products/big/58804_3.jpg

[11] : https://www.final-materials.com/c/424-category_default/poudre-ceramique.jpg

[12] : https://im.qccdn.fr/term/dossier-dechet-menager-275/principal-439.jpg

[13] : https://www.actuenvironnement.com/images/illustrations/breve/35459medium.jpg

[14]: Meral Ç., "Use of perlite as a pozzolanic addition in blended cement production", Turkey, Middle East Technical University, 2004.

[15] : BOUCHENAFA, Hafidha, Hayet TERKMANE, and Mohamed GUENDOUZ.

"Elaborationd'unéco-matériaudeconstructionàbasedesisolantsrecyclés."(2021).

[16]: Benaissa, Yasmine, Asma Belkessam, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence couplé de déchets céramiques et coquillages sur les performances de béton de sable fluide." (2021).

[17] :Erdogan S.T et Saglik A.Ü., "Early-age activation of cement pastes and mortars", Cement and Concrete Composites 38: 29–39, 2013.

[18]: Mohamed Guendouz, Djamila Boukhelkhal, and Alexandra Bourdot, Recycling ofFloor Tile Waste as Fine Aggregate in Flowable Sand Concrete, *Advances in Green Energies and Materials Technology*,Springer Proceedings in Energy, https://doi.org/10.1007/978-981-16-0378-5_30

[19] : IMERYS. [Online] Imerys S.A. - 43 Quai de Grenelle, 75015 Paris. https://www.imerys.com/fr/mineraux/perlite.

[20] : Benimam Samir, Debieb Farid,Bentchikou Mohamed et Guendouz Mohamed Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton ,MATEC Web of Conférences,(**2014**)V.11.01033https://doi.org/10.1051/matecconf/20141101033

[21]: BRGM/RP-50469-FR. Momento roches et minéraux industriels, la perlite. P.m.Thibaut .A.coumoul, 2000.

[22]:Weber R.H., and Austin G.S., " Perlite in new mexico", new mexico Bureau of mines and Mineral Resourrces, Vols. G.S.Austln, compiler, pp97-101,1982.

[23]: GUENDOUZ, Mohamed et DEBIEB, Farid. Contribution à la formation et à la Caractérisation d'un éco-materiau de construction à base de déchets Plastiques application au béton de Sable. 2017. Thèse de doctorat.

[24]: HADJADJ, Moussa, Abdelrahman ZANAGUI, and Mohamed GUENDOUZ. "Influence couplé de déchets plastique et de céramique sur les performances du béton autoplacant." (2020).

[25]: DOUIFI, Zakaria, et al. "Etude de l'influence couplée des déchets solides et de fibres métalliques sur les propriétés physico-mécanique d'un écomatériau de construction." (2022).

[26] : San Nicolas R., "Approche performentielle des bétons avec métakaolins obtenus par calcination flash", Thèse de Doctorat Université Toulouse III –Paul Sabatier, 2011.

[27] : Cyr M.,"Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires". Thèse de Doctorat INSA de Toulouse, 1999.

[28] : Ray A., Sriravindrarajah R., Guerbois J. P., Thomas P. S., Border S., Ray H. N., Haggman J., Joyce P., "Evaluation of Waste perlite fines in the production of construction materials". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 88 N° 1: 279–283, 2007.

[29] : Katsioti M., Gkanis D., Pipilikaki P., Sakellariou A., Papathanasiou A., Teas Ch., "Study of the substitution of limestone filler with pozzolanic

additives in mortars", Construction and Building Materials 23: 1960–1965.

[30] : Hamadache M., "Résistances mécaniques, conductivité et résistance à la corrosion des. pouzzolanique", Thèse doctorat en science, Ecole Nationale Polytechnique Mauris Audin , 2018.

[31] : Senhadji Y., « L'influence de la nature du ciment sur le comportement des mortiers vis à- vis des attaques chimiques (acides et sulfates) », Thèse de doctorat, Université de sciences et de la technologie d'Oran MB, Algérie, 2013.

[32] : Guenanou F., "Durabilité des mortiers contenant la perlite vis-à-vis de la corrosion des armatures", Thèse de Doctorat en Sciences, 2018.

[33] : LSUNMA,., "Livret des substances utiles non métalliques de l'Algérie de la Wilaya de Tlemcen", 1999.

[34] : Sardan G., "Les formations volcaniques tertiaires et quaternaires du tell oranais", Publications du service de la carte géologique de l'Algérie, Bulletin N°18: 533. 1958.

[35] : Renac C., Mexias A., Louni-Hacini A., Brouillet S., Cottin J. Y., 2014, "Rhyolite petrogenesis and meteoric–hydrothermal alteration at the Maghnia volcanic massif, Northwest Algeria", Journal of Geochemical Exploration 143: 1-18.

[36]: Dron R., Brivot F., "Bases minéralogiques de sélection des pouzzolanes", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° 92, Rèf.2115: 105-112, 1977.

[37]: AHMEDI, Malika, and Mohamed GUENDOUZ. "Développement d'un nouveaux composite cimentaire à base des déchets industriels combinés avec les déchets de coquillage." (2022).

[38] : BOUCHENAFA, Hafidha, Hayet TERKMANE, and Mohamed GUENDOUZ. "Elaboration d'un éco-matériau de construction à base des isolants recyclés." (2021).

[39] : https://viagallica.com/auvergne/img/granite_007.jpg

[40] : https://eco3e.eu/assets/uploads/2011/09/15-composition1.png

[41] :https://qc-ca.infodoorsandwindows.com/wp-content/uploads/formidable/11/11.jpg

[42]: Sawekchai Tangaramvong, Peem Nuaklong , May Thazin Khine , Pitcha Jongvivatsakul

The influences of granite industry waste on concrete properties

[43] : Houria Hebhoub et Mouloud Belachia [03 Décembre 2010 / Nature & Technologie]

[44] : Naamaoui née Haddadou Naima Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant

fibré avec ajout de poudre de marbre Thèse de Doctorat.

[45]: Taylor et Francis [This article was downloaded by: [University of Boumerdes] On: 20

May 2013, At: 06:40: European Journal of Environmental and Civil Engineering]

[46] : https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Marbre.html

[47] :https://www.researchgate.net/figure/a-Carriere-de-marbre-b-Dechets-de-marbre-a-letatpoudreux-107_fig31_333244852

[47] :https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8d/MarbleUSGOV.jpg/220x

-MarbleUSGOV.jpg

[48] : http://dspace.univ-medea.dz/bitstream/123456789/3177/1/M117027.pdf

[49] : https://legal-marbre-design.fr/26-plan-de-travail-marbre-nuancier

[50] : http://thesis.univ-biskra.dz/2429/4/Chapitre%2002.pdf

[51] : Mohamed Guendouz, Djamila Boukhelkhal, Zakaria Triki, Abdelah Mechantel andTarek Boukerma, Effect of using spent coffee grounds wastes as aggregates on physical andthermal properties of sand concrete.Algerian Journal of Environmental Science andTechnology, Vol.9. N°3. (**2023**).https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/894

[52] : Djamila Boukhelkhal, **Mohamed Guendouz**, Zakaria Triki, Physical and thermalproperties of lightweight self-compacting mortar made with recycled walnut shells as fineagreggrates. Algerian Journal ofEnvironmental Science and Technology, Vol.9. No3. (**2023**).https://www.aljest.net/index.php/aljest/article/view/898

[53] : Mohamed Guendouz, Djamila Boukhelkhal, Abdellah Mechantel, Tarek Boukerma,Valorization of coffee waste as bio-aggregates in crushed sand concrete production,Environmental Engineering and Management Journal., Vol. 22, No. 1, 147-156, (**2023**).http://doi.org/10.30638/eemj.2023.013

[54]: Guendouz Mohamed, Boukhelkhal Djamila, Physical, mechanical and thermalproperties of Crushed Sand Concrete containing Rubber Waste, MATEC Web of Conférences,(**2018**)V.149. 01076.https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901039

[55] : Moussa Hadjadj , Mohamed Guendouz , Djamila Boukhelkhal , The effect of using seashells as cementitious bio-material and granite industrial waste as fine aggregate on mechanical and durability properties of green flowable sand concrete., Journal of building, Journal of Building Engineering 87 (2024) 108968.

https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108968

[56] : Habiba Blaifi, Mohamed Guendouz, Abd-Elmouneïm Belhadj, Djamila Boukhelkhal, Moussa Hadjadj, Sustainable use of recycled plastic and ceramic industrial wastes in ecofriendly construction materials,Environmental Engineering and Management Journal., Vol. 22, No. 8, 1471-1486, (**2023**). http://doi.org/10.30638/eemj.2023.124

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

[58]: Dhouha Ben Hadj Tahar, Zakaria Triki , Mohamed Guendouz , Hichem Tahraoui, Meriem Zamouche ,Mohammed Kebir , Jie Zhang and Abdeltif Amrane , Characterization and Thermal Evaluation of a Novel Bio-Based Natural Insulation Material from Posidonia oceanic Waste: A Sustainable Solution for Building Insulation in Algeria., Chem Engineering 2024, 8, 18.https://doi.org/10.3390/ chemengineering8010018

[59] : Laid Guermiti, Dalila Benamara , Mohamed Guendouz, Experimental and numerical

investigation of the workability and mechanical properties of High-performance fiberreinforced fluid concrete (HPFRFC), International journal of advanced studies in computer science and engineering, IJASCSE, V. 11 N°5, (2022). https://new.ijascse.org/IJASCSEvolume- 11-issue-05.html

[60] : ISO 8497, 1994 Isolation thermique : Détermination des propriétés relatives au

transfert chaleur en régime stationnaire dans les isolants thermiques pour conduites

[61] : NF EN 993-15 .Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle) Octobre2005.

[62]: NF EN 18-459 Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique février 2010

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

[**64]:** BIS, Indian standard non-destructive testing of concrete—Methods of test. Part 1: Ultrasonic pulse velocity, (1992).

ANNEXES



	FICHE TECHNIQUE	N°: FR – 016 A – LAB
S.Cl.Z Groupe LAFARGE CIMENTERIE DE ZAHANA	CIMENT PORTLAND POUR TRAVAUX DANS LES MILIEUX FORTEMENT AGRESSIFS	VERSION 2
		Page 1 sur 2

NORME	NA 442/2013	
DESIGNATION NORMALISEE selon la NA 442 : 2013	CIMENT PORTLAND RESISTANT AUX SULFATES	
IDENTIFICATION	CEM I 42.5 N-LH/SR5	
COMPOSITION	CLINKER = 95 à 100% CONSTITUANTS SECONDAIRES = 0 à 5%	
CARACTERISTIQUES MECANIQUES	Résistances à 02 jours	Résistances à 28 jours
42.5 MPA	≥ 20.00 MPa	≥ 42.50 MPa
CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES	C_3A : 3.00% - 5,00 % Perte au feu : ≤ 1,00 % Résidu insoluble : 0.50 % - 1.00% MgO : 2.00 % - 3.00 % SO_3 : 2.00% - 3.00 % Chlorure : 0,010 % - 0.05% Expansion : 0.00 mm - 5.00 mm Temps de Début de Prise : 60 min – 150 min Surface spécifique de BLAINE : 3000 à 3800 cm^2/gr Refus sue tamis 45 micron : ≥ 20,0 % Densité ciment : 0.950 à 1.10	
. DOSAGE	•A respecter en fonction du béton à confectionner (armé, non armé, précontraint) et de l'environnement existant (sec, humide, faible ou fortement agressif, …)	
USAGE RECOMMANDE	•Travaux pour des milieux Fortement agressifs (terrains gypseux, eaux à haute teneur en sulfates, eaux industrielles, eaux séléniteuses, …	

S.Cl.Z Secretariat Commercial 26 SEP. 2021

CIMENTERIE DE ZAHANA Département Contrôle Qualité S.Cl.Z

SMQ/SCIZ — Ce document est la propriété exclusive de la société «S.Cl.Z» — Edition du 08/10/06

Figure A.1: la fiche technique de ciment.

BUILDING TRUST

NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10

Superplastifiant/Haut réducteur d'eau de nouvelle génération polyvalent

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré, à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 convient pour la confection de béton en préfabrication, béton sur chantier et béton prêt à l'emploi. Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est utilisé pour béton en cas de temps de transport ou délai de mise en oeuvre prolongés.
Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 permet la fabrication des:

- Bétons plastiques à très fluides
- Bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice
- Bétons avec réduction d'eau maximale (jusqu'à 30 %)
- Bétons avec air entraîné

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 combine plusieurs mécanismes d'action. Par adsorption à la surface et le cloisonnement des fines pendant le processus d'hydratation les propriétés suivantes sont atteintes:

- Réduction d'eau extrêmement importante (donc étanchéité et résistances élevées)
- Fluidité élevée (donc moins de travail pour la mise en oeuvre et le compactage)
- Evolution plus rapide des résistances à court terme
- Etanchéité fortement améliorée
- Meilleures caractéristiques de fluage et de retrait
- Carbonatation du béton ralentie

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 ne contient ni chlorures ni autres substances susceptibles de provoquer ou de favoriser la corrosion de l'acier, et peut donc être utilisé sans restrictions pour la construction d'ouvrages en béton armé et précontraint.

AGRÉMENTS / NORMES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 répond aux exigences de la norme NF EN 934-2 tableaux 1, 3.1 & 3.2.
PV CNERIB: DTEM 251/2016.

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	• Fût de 200 kg. • Cubi de 1100 kg.
Aspect / Couleur	Liquide brun clair.
Durée de Conservation	12 mois de la date de production si le produit est stocké correctement en emballage intact.
Conditions de Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 peut geler, mais une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Densité	1.060 ± 0.010

Valeur pH	4.0 ± 1.0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0.1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %

RENSEIGNEMENTS SUR L'APPLICATION

Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3% du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel : 0,4% à 1,5% du poids de liant.
Distribution	Sika® ViscoCrete® TEMPO-10 est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

VALEURS DE BASE

Toutes les valeurs indiquées dans cette Notice Produit sont basées sur des essais effectués en laboratoire. Les valeurs effectives mesurées peuvent varier du fait de circonstances indépendantes de notre contrôle.

ÉCOLOGIE, SANTÉ ET SÉCURITÉ

Pour obtenir des informations et des conseils sur la manipulation, le stockage et l'élimination en toute sécurité des produits chimiques, les utilisateurs doivent consulter la fiche de données de sécurité (FDS) la plus récente contenant les données physiques, écologiques, toxicologiques et autres données relatives à la sécurité.

RESTRICTIONS LOCALES

Veuillez noter que du fait de réglementations locales spécifiques, les données déclarées pour ce produit peuvent varier d'un pays à l'autre. Veuillez consulter la Notice Produit locale pour les données exactes sur le produit.

INFORMATIONS LÉGALES

Les informations, et en particulier les recommandations concernant les modalités d'application et d'utilisation finale des produits Sika sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que Sika a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales, conformément aux recommandations de Sika. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou recommandations écrites, ou autre conseil donné, n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés, ni aucune garantie de conformité à un usage particulier, ni aucune responsabilité découlant de quelque relation juridique que ce soit. L'utilisateur du produit doit vérifier par un essai sur site l'adaptation du produit à l'application et à l'objectif envisagés. Sika se réserve le droit de modifier les propriétés de ses produits. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont soumises à nos conditions générales de vente et de livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice Produit correspondant au produit concerné, accessible sur internet ou qui leur sera remise sur demande.

WPS Office

Sika El Djazair SPA
08 route de Larbaa
16111 Les Eucalyptus
ALGERIE
Tél.: 0 21 50 16 92 à 95
Fax: 0 21 50 22 08
dza.sika.com

Figure A.2 : la fiche technique de l'adjuvent.