UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté de la **T**echnologie

Département du génie civil



Projet de Fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master LMD

Spécialité : Génie Civil

Option : Construction et matériaux

L'effet de haute température sur le comportement du béton de sable à base du Marc de café

Préparé par Mrs :

- **Nékamiche Sarah**
- **Belatrach Ahmed**

Encadré par :

- **Dr. Guendouz Mohamed**
- **M^{elle}. Boukhelkhal Djamila**

juin 2017

Remerciement

Tout d'abord, Nous tenons à remercier ALLAH, le clément et le miséricordieux de nous 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 ou 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 tenons à remercier :

Notre encadreurs ***Dr. GUENDOUZ MOHAMED*** *et* ***M^{elle} BOUKHELKHAL Djamila*** *d'avoir accepté de nous encadrer, et pour leurs conseils précieux pendant la réalisation de ce travail. Pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'encadrer ce travail, pour leur disponibilité, pour leur écoute, pour l'aide très précieux et l'intérêt constant qu'ils ont bien voulu montrer pour ce travail qu'ils ont guidé par de judicieux conseils, qui ont bien su nous communiquer pour mener au mieux cette étude.*

Nous sommes grées au membres de jury, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury de notre travail.

Nous leur exprime notre profonde reconnaissance pour leur lecture critique et éclairante sur ce travail de recherche.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall pour leurs aides et disponibilités.

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

Et nous n'oublions certainement pas nos parents nos amis ainsi tous ceux qui nous ont aidés dans notre tâche, nous leur dirons merci.

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

Sarah/ Ahmed

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs Noor , Sirine et hadjira pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, Med Lamine et Hocine pour leur appui et leur encouragement,

A ma petite nièce qui viendra au monde dans quelques semaines.

A mes chères ami(e)s et collègues de travail.

Mon promoteur Guendouz Med et à Mr Azizi Noureddine, pour leur encouragement.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

SARAH

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين و رسكلة بقايا القهوة و دمجها بشكل حجمي في كتلة الخرسانة الرملية بنسب مختلفة (5٪، 10٪، 15٪، 20٪) على التوالي مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة تحت تأثير ارتفاع درجات الحرارة ، ومقارنتها مع خرسانة رملية عادية .

وقد أظهرت النتائج أن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة الرملية انخفضت بزيادة نسبة بقايا القهوة وارتفاع درجات الحرارة. لذلك فمن الممكن الحصول على مواد البناء الجديدة التي يمكن استخدامها لأنواع مختلفة من عناصر البناء.

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à valoriser et recycler les déchets de café plus précisément le Marc de café et incorporé dans la masse du béton de sable par substituions volumique du sable en différents pourcentage (05% ,10%,15% et 20). Les propriétés à l'état frais et à l'état durci sous l'effet de haute température (200°,400° et 600°) des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées au béton de sable témoin respectif.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés physiques et mécaniques des différents bétons de sable sont diminuées en fonction d'augmentation de pourcentage de marc de café et d'élévation de température. Mais à base de ces résultats, on peut dire qu'il est possible d'obtenir un nouveau matériau de construction utilisable pour différents types d'éléments de construction**.**

Abstract

The main objective of this project is to value and to recycle waste coffee and incorporated into the mass of sand concrete by substituted volumetric sand at different percentage (5%, 10%, 15%, and 20%). The properties in a fresh and a hardened state of the various sand concretes exposed to elevated temperature (200°,400° and 600°) carried out were analyzed and compared with control self compacting sand concretes respective.

The results obtained show that the physical and mechanical properties of the sand concrete are decreased according to increase the percentage of waste coffee and the elevation of temperature. So, it is possible to obtain a new material which allows a use in the various types of structural components**.**

Sommaire

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

Introduction générale.....……..……..……..……02

CHAPITRE 01 : SYNTESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Valorisation des déchets et recyclage en construction 05

1.1.1 Introduction 05

1.1.2 Valorisation des déchets et sous-produit industriels dans le domaine de génie civil 05

1.1.2.1 La valorisation ……...…….....05

a) la valorisation matière ……...…….....05

b) la valorisation organique ……...…….....05

c) la valorisation énergétique ……..……...…….....06

1.1.2.2 Les déchets 06

1.1.2.3 Les types de déchets 06

a) déchets dangereux ……...……...…….....06

b) déchets non dangereux ……...…….....06

c) déchets inertes ……..……...…….....07

d) déchets ménagers et assimilés ……...…….....07

e) Déchet d'activités économiques ……..……...…….....07

f) Biodéchet ……..……...…….....07

g) déchets organiques ……..……...…….....07

h) déchets toxiques ……..……...…….....08

1.1.2.4 Constitution chimique du déchet 08

1.1.2.5 Différents déchets utilisés en génie civil 08

a) Déchets industriels dangereux mais non toxiques 08

b) Déchets inertes 09
c) Déchets toxique 09
d) Déchets industriels dans des conditions spécifiques …..... 09
e) Déchets ménager et assimilés ..... 09 f)
Les déchets industriels banals (D.I.B.)……..……..10
1.1.3 Activité du recyclage des déchets en construction..... 10
1.1.3.1 Recyclage des déchets 10
1.1.3.2 Technique de recyclage…….....11
1.1.3.3 Type de recyclage 12
1.1.3.4 Impacts du recyclage sur l'environnement 12

1.2 Le Marc de café……..…….....13

1.2.1 Définition 13
1.2.2 Historique 13
1.2.3 Composition du marc de café.……14
1.2.4 Propriété du marc de café…….....16
1.2.4.1 Propriétés physiques du marc de café…….....16
1.2.4.2 Propriétés chimiques du marc de café…….....17
1.2.4.3 Propriétés bioactives du marc de café……..19
1.2.5 Les utilisations possibles de marc de café……..…….19
1.2.6 Impacts environnementaux de la récupération du marc de café et de sa mise en valeur……....22
1.2.6.1 Écotoxicité……27
1.2.6.2 Diminution des pressions sur les ressources naturelles……..…...…23
1.2.6.3 Traitement des eaux……..…….23
1.2.7 Impacts économiques de la récupération de la marc de café et de sa mise en valeur…….24
1.2.8 Impacts sociaux de la récupération de la marc de café et de sa mise en valeur……..….24
1.2.8.1 Création d'emploi……..……..24
1.2.8.2 Développement de marque de local……..……..25
1.2.8.3 Santé ……..……...25
1.2.8.4 Image de marque……..…….25

1.3 Béton de sable……..……26
1.3.1 Introduction……...…26

1.3.2 Définition ……..…..…26
1.3.3 Spécificité du béton de sable…….……...….27
1.3.4 Historique du béton de sable……..……..….27
1.3.5 Les composant du béton de sable……..……..29
1.3.5.1 Les sables……..…… …….29
1.3.5.2 Les fines d'ajout…….…….....30
1.3.5.3 Les ciment……...…….…….……...34
1.3.5.4 Adjuvant……..…….…….…...34
1.3.5.5 Eau……...…….……...34
1.3.5.6 Autres ajouts……..……..34
1.3.6 Domaine d'emploi des bétons de sable...……....35
1.3.6.1 Fondation profondes…….....35
1.3.6.2 bâtiment...…….....……..36
1.3.6.3 La préfabrication ……..…..…..……36
1.3.6.4 Routes, chaussé et dallage.…….……..37
1.3.7 Intérêts et limites de béton de sable……38
1.3.7.1 Intérêts des béton de sable.……..38
1.3.7.2. Limite des bétons de sable……...……...39
1.3.8 Méthodes de formulation de bétons de sable……..39
1.3.8.1 Approche théorique de la formulation des béton de sable ……..40
1.3.8.2 Méthode expérimentale de formulation……...……48
1.3.8.2.1 Les déférentes étapes de la formulation……...….48
1.4 Valorisation des déchets de café dans les matériaux a base cimentaire…...……..52
1.4.1 Influence de déchet de café sur les propriétés des matériaux cimentaire.…….…..52
1.4.1.1 États frais……...…52
1.4.1.2 États durci……..…52
1.5 Conclusion…….……54

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction…….……....56
2.2 Matériaux utilisés ……...….57
2.2.1 Les sables……....57
2.2.2 Ciment ……...……....60

2.2.3 Fillers calcaire……..……..……...…….....62
2.2.4 Adjuvant…….....…….....63
2.2.5 Eau……...…….……..…64
2.2.6 Déchets du marc de café……..……...64
2.3 Composition des mélanges ……..…....……...65
2.4 Malaxage et conservation……...…..……...67
2.5. Essais réalisés à l'état frais.…….....68
2.5.1 La maniabilité……...…….……..68
2.5 La densité……...……...…….69
2.6 Fabrication et confection des éprouvettes ……..…….……...69
2.7. Essais sur béton de sable durci……...……...……..…...….70
2.7.1 Essais de compression…….....……..……..……..70
2.7.2 la porosité ……...…….....……..……...…….…….71
2.7.3 la résistance au feu…..……...……...……..…...…….…….73
2.8 Conclusion……...……...……..……...……76

CHAPITRE 03: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

3.1 Introduction 76

3.2 Béton frais 76
3.2.1 La Maniabilité 76

3.3 Béton durci .....…79
3.3.1 la densité 79
3.3.2 la porosité .....…80

3.3 Résistance au feu …….…….....81
3.3.1 la porosité…….……..……..….82
3.3.2 La densité……. ……..……...83
3.4 Conclusion……...……..……..86
Conclusions générale et recommandations……...……....…...…89
Références bibliographiques……..……92
Annexe……....…….98

Liste des Figures

Liste des figures

Fig.1.1 Valorisation des déchets (Clastres, 2004)…… 6
Fig. 1.2 Le marc de café ……...…….…..13
Fig.1.3 Le caféier et la fleur du caféier ……..…….……...15
Fig. 1.4 Molécule de caféine …….....16
Fig. 1.5 Grain de marc à café en microscope à balayage……..……....…….……...16
Fig. 1.6 Possibilités de valorisation du même marc de café …….…...20
Fig. 1.7 Marc de café comme engrais…….…...……...21
Fig. 1.8 Carte de déserts dans le monde …….....26
Fig.1.9 Phare de port Saïd réalisé enbéton aggloméré Coignet (Egypte) ……..….....….28
Fig.1.10 Métro de Saint-Pétersbourg ……..……28
Fig.1.11 Fines anguleuses ……..…….31
Fig.1.12 Fines sphériques …….…….....32
Fig.1.13 Le laitier granulé …….....33
Fig.1.14 Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable (sous bentonite).....35
Fig. 1.15 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable …….....36
Fig.1.16 Moulage d'un élément préfabriqué en béton de sable ……..36
Fig.1.17 Ombrelles d'étanchéité en place …….…...37
Fig.1.18 Tunnel du métro de Leningrad …….…….37
Fig.1.19 Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface ……...37
Fig.1.20 Déroulement d'un film polyane (cure) …….……...……..38
Fig.1.21 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines ……..42
Fig.1.22 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable ……...…...43
Fig.1.23 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée ……..43
Fig.1.24 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) ……..……46

Fig. 1.25 Organigramme de la méthode théorique ……...……...47
Fig.1.26 Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition .……...51
Fig. 1.27 masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition …..……51
Fig.1.28 La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 500°C 53
Fig.1.29 La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 600°C …53
Fig.2.1 L'aspect général des sables utilisées…….....57
Fig. 2.2 Analyse par DRX de sable de BAHBAH…….…….59
Fig. 2.3 Analyse par DRX de sable de Concassage……59
Fig. 2.4 Ciment MATINE…….....60
Fig.2.5 Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 MATINE…….....61
Fig.2.6 La Roche calcaires broyées .....…….……62
Fig. 2.7 Analyse par DRX du filler calcaire utilisé…….…….63
Fig.2.8 Le type d'adjuvant Utilisées……63
Fig.2.9 Marc de café utilise……..64
Fig.2.10 L'analyse granulométriques des sables et Marc de café utilisés…….…….……..65
Fig.2.11 Le malaxage des bétons au laboratoire……..67
Fig. 2.12 Mesure de la maniabilité du béton de sable ……..68
Fig.2.13 Mesure de la densité du béton de sable…….....69
Fig. 2.14 Fabrication des éprouvettes……...70
Fig.2.15 Dispositif de rupture à la compression…….……..70
Fig.2.16 Essais de compression……71
Fig.2.17 Mesure de la porosité accessible à l'eau …….....73
Fig.2.18 Echauffement des éprouvettes dans un four à moufle …….…….……74
Fig.2.19 Courbe de chauffage des éprouvettes ……...…….....74
Fig.2.20 Variables étudiées …….……...…….....75
Fig. 3.1 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café ..…….....78
Fig. 3.2 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café après réglage .....…79
Fig. 3.3 La densité des Bétons de sable à base du Marc de café …..…….…….....79
Fig.3.4 Porosité des bétons de sable à base du Marc de café ……..……80
Fig.3.5 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSCN MC……....81

Fig. 3.6 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSCN MC ..……..…....81

Fig. 3.7 Porosité des bétons de sable à base du Marc de café chauffé à haute température 82

Fig .3.8 Porosité des bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de température……..82

Fig.3.9 densité des bétons de sable à base du Marc de café chauffé à haute température ……...83

Fig.3.10 densité des bétons de sable à base du Marc de café chauffé à haute température ……..…84

Fig.3.11 Rc des bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de température …..85

Fig. 3.12 Rc des bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de température…...85

Fig.A 1. Ciment MATINE……...98

Fig.A 2. La fiche technique ciment. ……..……...99

Fig.A.3 . Tamiseuse électrique ……..……...100

Fig. A.4 . Malaxeur ……..……...100

Fig.A.5 . Essais d'équivalent de sable……...100

Fig.A.6 . Séchage a l'étuve de calcaire…….100

Fig. A.7.broyage par broyeur…….101

Fig .A.8 . Essais de la maniabilité…….101

Fig. A.9. Eprouvettes chauffées dans différents température. …….102

Fig. A.10. Echauffement des éprouvettes…….103

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Le pouvoir calorifique de divers résidus de biomasse ……..……..…17
Tableau 1.2 Composition élémentaire du marc de café **……**……..17
Tableau 1.3 Les principaux composés du marc de café **……**……18
Tableau 1.4 Composition des principaux minéraux du marc de café ……..19
Tableau 1.5 Activité radicalaire du marc de café ...……...……..19
Tableau 1.6 Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment ……..31
Tableau 2.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés ...……..58
Tableau 2.2 Composition chimique des ciments MATINE ...……61
Tableau 2.3 Composition minéralogique des ciments MATINE……61
Tableau 2.4 Essai physiques sur le ciment MATINE…….……..…...61
Tableau 2.5 Caractéristiques physiques des fillers calcaire utilisées……...……..….62
Tableau 2.6 L'analyse chimique des fillers calcaire utilisées…….62
Tableau 2.7 Caractéristiques des déchets de marc de café utilisées ……..65
Tableau 2.8 Composition des mélanges réalisés (pour 1 m³)..……...…….…66
Tableau 2.9 Essais sur bétons frais ...…….……..….....68

Liste des symboles et Abréviations

Liste des Symboles et des Abréviations

FFOM : Fraction fermentescible des ordures ménagères

DIS : Déchets industriels spéciaux

DMS : Déchets ménagers spéciaux

D.I.B. : Les déchets industriels banals

PS : Polystyrène

PVC : Chlorure de polyvinyle

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PEBD : Polyéthylène basse densité

PEHD : Polyéthylène haute densité

PET : polyéthylène téréphtalate

PC : Polycarbonate

POM : Polyacétals ou polyoxyméthylène

PA : Les polyamides

PUR : Polyuréthanes

PF *:* Phénoplastes

MF : Aminoplastes

PMMA : poly (méthacrylate de méthyle)

PTFE : polytétrafluoréthylène

PCB : polychlorobiphényles

COV : Composés organiques volatils

BS : Béton de sable

E/C : Eau/Ciment

C : Dosage en ciment

C_2S : Silicate bicalcique (belite)

C_3A : Aluminate tricalcique

C_3S : Silicate tricalcique (alite)

C_4AF : Aluminate-ferrite tétracalcique

$CaCO_3$: Carbonate de calcium

Al_2O_3 : Oxyde d'Aluminium

Fe_2O_3 : Oxyde de fer

Cao : Oxyde de calcium

S_iO_2 : Silicium

MgO : Magnésium

Dmax **:** Diamétre maximale des granulats

G/S: Gravillons sur sable

ES : Equivalent de sable

R7j : Résistance à 7 jours

R28j : Résistance à 28 jours

R90j : Résistance à 90 jours

DRX : Diffractomètre au rayon X

MEB: Microscope électronique à balayage

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

V_0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

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

M sable: masse nécessaire pour 1 m^3 du béton de sable.

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

S_i : dosage en sable après correction

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

MV sable : masse volumique absolue du sable

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

CPA CEM I 42.5 : Ciment Portland ordinaire de Classe 42,5

ρ : masse volumique apparente (kg.m-3)

ρs : masse volumique absolue (kg.m-3)

λ : Conductivité thermique (W/m°C)

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

I : Moment d'inertie de la section transversale

v : La distance de la fibre la plus éloignée

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

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

b: Côte de l'éprouvette

ε : porosité totale (%)

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

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

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

BSBHT : Béton de sable de BAHBAH témoin (sans poudre plastique)

BSBH MC : Béton de sable BAHBAH à base du Marc de café

BSCNT : Béton de sable de Concassage témoin

BSCN MC : Béton de sable de Concassage à base du Marc de café.

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

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

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

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

Introduction générale

Introduction générale

La protection de l'environnement devient de plus en plus une préoccupation collective. La question des déchets est quotidienne et touche chaque être humain tant sur le plan professionnel que familial. En qualité de consommateur, producteur, usager du ramassage des ordures et trieur de déchets recyclables, citoyen ou contribuable, chacun peut et doit être acteur d'une meilleure gestion des déchets. Dans une vision intégrée de développement durable, la problématique des déchets ne peut pas être traitée comme un objet isolé, ni même se limiter aux seuls aspects de valorisation et d'élimination. Elle doit être placée dans une perspective holistique de gestion des risques et des ressources, qui couvre tout le cycle de vie du déchet, depuis sa génération jusqu'au traitement ultime. Elle anticipe le déchet dès le stade projet, inclut les stratégies de réduction à la source, de valorisation et d'élimination et vise à la maîtrise des flux tout au long du procédé aboutissant au déchet. On évitera dans la mesure du possible de produire des déchets à la source. Pour ce faire, on doit privilégier les procédés de production générant peu de déchets, fabriquer des biens à longue durée de vie et optimiser les emballages. On doit éviter ou limiter dans la mesure du possible le recours aux substances polluantes, dans les produits comme dans les procédés de recherche et de fabrication, afin de faciliter les étapes ultérieures du traitement et de la valorisation des déchets.

Aujourd'hui le café est devenu une richesse économique majeure et présente la première denrée agricole échangée en volume, et la deuxième matière première commercialisée dans le monde après le pétrole. Sa production mondiale annuelle est en augmentation continue et elle dépasse 8 millions de tonnes par an .Prés de 50% du café produit dans le monde est destiné à la préparation du café moulu, ce qui génère par sa consommation des quantités importantes d'un résidu solide qu'on appel le marc de café. Ce dernier est généralement évacué vers des décharges avec les conséquences environnementales et économiques que cela comporte.
Cependant, la quantité moyenne de déchets de café quotidiens produite au niveau de la wilaya de Médéa est estimée à 11784Kg/jour pour 1473 Cafétéria .

Ce travail consiste donc à récupérer du Marc de café, rejetées dans la nature, après avoir étaient trier, sécher puis extrudés sous forme de poudre, puis incorporé dans la masse de deux familles du béton de sable par substitution volumiques du sable avec de pourcentage de (5%,10%15% et 20%).

Le composite ainsi envisagé est, alors, ***un béton de sable à base du Marc de café***. A part le ciment, chaque matériau de base constituant ce matériau entre soit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, soit dans le cadre de la réutilisation des déchets industriels. Ces matériaux sont :

- Deux types de sables de différentes natures se trouvant en grandes quantités dans l'Algérie : un ***sable dunaire,*** et un ***sable de concassage.***
- Deux déchets industriels d'origines différentes : Des ***fillers calcaires*** provenant des déchets de concassage et des ***déchets de café (Marc de café)*** provenant de récupération de café utilise.

Pour atteindre ces objectifs, le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des quatre parties principales suivantes :

Nous présentons tout d'abord une synthèse bibliographie regroupant la valorisation des déchets et activité de recyclage en construction, de la Marc de café , le béton de sable et quelque travaux de recherches effectuer dans les sens de la valorisation du Marc du café dans les matériaux à base cimentaire.

Dans le chapitre, nous présentons une synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable (définitions, constituants, méthodes de formulations, caractéristiques, utilisations…etc.) et la comparaison entre le béton de sable et le béton ordinaire.

Le douzième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux de base, les formulations des composites, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (maniabilité, densité), et à l'état durci (porosité, densité, et résistance à la compression) des BS chauffé à haute température)).

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

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur nos travaux ainsi que d'éventuelles perspectives et recommandations.

Chapitre 01 :
Synthèse bibliographique

1.1 Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction

1.1.1 Introduction

Les déchets sont une problématique récente. Les déchets des hommes de la préhistoire étaient composés uniquement de matières naturelles. Quand les hommes les jetaient dans la nature, ils étaient naturellement décomposés. [1]

1.1.2 Valorisation des déchets et sous produits industriels dans le domaine génie civil

1.1.2.1 La Valorisation

La valorisation est la réutilisation d'un déchet dans un nouveau cycle de production. Le déchet peut remplacer totalement ou partiellement une matière première, par exemple utiliser des bouteilles en verre cassées pour en produire des nouvelles [2].

La valorisation apporte une nouvelle valeur aux déchets, en les sortants du circuit de collecte et de traitement. La valorisation s'oppose à l'élimination. Elle permet de faire des économies de matières premières et contribue au respect de la planète et à son développement durable.

On comptabilise trois types de valorisation :

- la valorisation matière.
- la valorisation organique.
- la valorisation énergétique.

a) La valorisation matière

C'est, utiliser une partie ou la totalité de la matière du déchet dans un nouveau processus de production. La valorisation de matière peut être assimilée au recyclage et au réemploi.

b) La valorisation organique

La valorisation organique repose sur le compostage et la méthanisation. Le compost créé à l'issue du compostage sert à la régénération des sols. La méthanisation est comme le compostage, c'est un procédé de fermentation qui créé du méthane. L'utilisation du méthane est la même que le gaz naturel, il s'utilise dans les mêmes applications.

c) La valorisation énergétique

La valorisation énergétique se fait via l'incinération des déchets, à l'aide de fours spécifiques. L'incinération des déchets permet de créer de la chaleur qui permet d'alimenter les systèmes d'électricité et de chauffage. Il existe un nouveau système appelé : pyrolyse. Les déchets sont chauffés entre 400 à 600°C, les déchets sont alors soumis à une réaction thermique et se décomposent. Les déchets sont alors utilisés en tant que combustible liquide, solide ou gazeux.

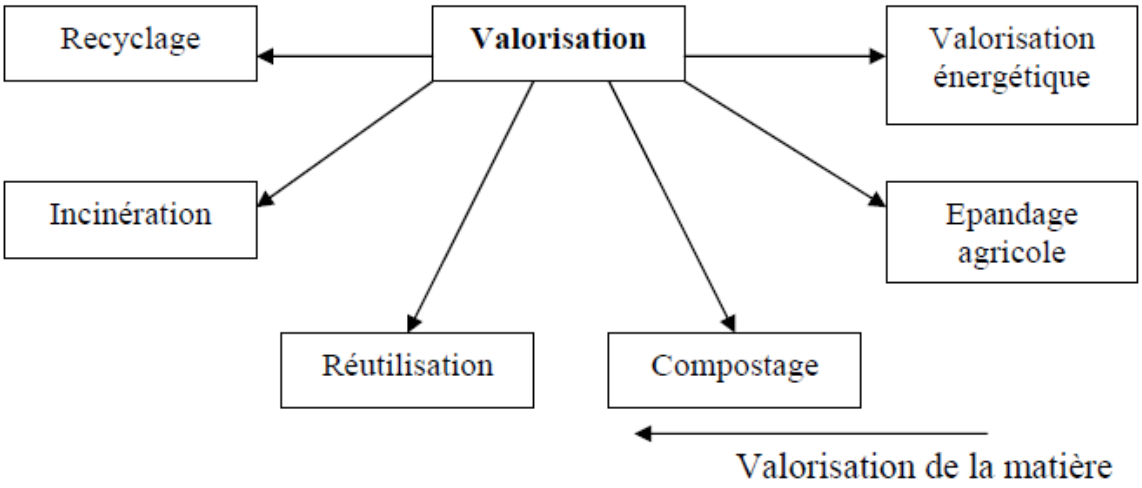


Fig. 1.1. Valorisation des déchets (Clastres, 2004).

1.1.2.2 Les déchets

Un déchet c'est un "débris" nous dit le dictionnaire. C'est un reste sans valeur de quelque chose. Un déchet, c'est donc ce qui est jeté dans la poubelle ?
Oui, mais certains déchets sont trop gros pour rentrer dans la poubelle, Par exemple, les vieux matelas ou les télévisions hors d'usage. En fait, il existe plusieurs catégories de déchets...

1.1.2.3 Types des déchets

a) Déchet dangereux

Tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangerosité.

b) Déchet non dangereux

Tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux.

c) Déchet inerte

Tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.

d) Déchet ménager et assimilé

Les déchets ménagers sont les déchets issus de la consommation des ménages. La nature de ces déchets est variée : déchets organiques issus de l'alimentation tel que le pain, le marc de café …. Etc, qui peuvent être valorisés en compost plastiques, verres, papier, carton qui peuvent être triés et recyclés piles, huiles usagées, produits toxiques, qui doivent être amenés en déchèterie dans des conteneurs adaptés : ces déchets sont toxiques pour l'environnement et la santé Les déchets ménagers deviennent problématiques pour l'environnement de part leur augmentation en poids et en volume constante. Des coûts considérables et des difficultés de traitement, d'instauration du tri et de la valorisation sont générés par ces gros volumes, accentués par la non-recyclabilité et la toxicité de certains déchets.

e)Déchet d'activités économiques

Tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage.

f) Biodéchet

Tout déchet non dangereux biodégradable de jardin ou de parc, tout déchet non dangereux alimentaire ou de cuisine issu notamment des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires.

g) Déchets organiques

Les déchets organiques sont des déchets provenant de matières d'origine animale ou végétale. Les déchets organiques sont des déchets alimentaires, déchets verts, déchets agricoles, déchets issus des industries agroalimentaires ou de la restauration, et composent une grande partie des déchets ménagers : déchets verts feuilles mortes tonte de gazon taille de haie fleurs fanées mousses fumier paille foin fougères sèches écorces broyées aiguilles de conifère sciure de

bois cendres de bois déchets alimentaires coquilles d'œufs épluchures ,fruits et légumes même abimés, marc de café avec filtre ,thé, pain ,déchets de maison, cheveux, ongles, plumes, poils cendres de tabac papier journal mouchoirs en papier coton sachets d'emballage en papier litière d'animaux .

h) Les déchets toxiques

Sont des déchets qui vont avoir un impact négatif sur l'environnement et sur la santé humaine. Ce sont des objets usagés ou périmés, des substances toxiques, des rejets nocifs dans l'air, dans l'eau ou la terre et des restes de produits dangereux... Les déchets toxiques sont nombreux, variés, et peuvent être des déchets ménagers, des déchets industriels, des déchets radioactifs ou des déchets issus des activités de soins : Les acides : chlorhydrique, sulfurique, nitrique, fluorhydrique...

1.1.2.4 Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux. [3]

1.1.2.5 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 déchets en sous produits industriels dans des conditions spécifiques [4].

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 à caractère industriel.

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 [1].

Ce type de déchets regroupe :

•Des déchets solides de construction et de démolition des bâtiments à caractère d'habitation situé ou non sur un site industriel.

•Des déchets solides et inertes de travaux routiers,

•Des éléments en béton, mortier de ciment et béton,

•Des terres de déblais non contaminées.

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 [2].

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.) [4].

E. Déchets ménager et assimilés

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 de matière alimentaire (Déchets de café).

• Déchets ménagers spéciaux (DMS), ne pouvant en raison de leur danger être éliminés sans risques avec les déchets ménagers.

• 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**.** 5]

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.

1.1.3 Activité du recyclage des déchets en construction

1.1.3.1 Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus, dans un nouveau cycle de vie. L'un des exemples les plus connus illustrant ce procédé est celui de la fabrication de bouteilles en verre grâce aux bouteilles usagées. Le verre est recyclable à l'infini.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume des déchets, et donc de la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voire des siècles à se dégrader) et la préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire. [6]

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- ❖ réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets.
- ❖ réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- ❖ recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

1.1.3.2 Technique de recyclage

A. Procédés du recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « **chimique** » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage dit « **mécanique** » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage dit« **organique** » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

B. La chaîne du recyclage

B.1 Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement technique.
Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. [7]
À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

B.2 Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

B.3 Commercialisation et consommation

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés. Pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés.

1.1.3.3 Type de recyclage

On peut distinguer trois types de recyclage :

- **le recyclage in situ** : les installations de recyclage sont mobiles et il s'effectue sur le chantier de démolition ;
- **le recyclage sélectif** : il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ;
- **le recyclage en site fixe** : les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site. [8]

1.1.3.4 Impacts du recyclage sur l'environnement

La récupération des déchets touche deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [8].

Le recyclage de déchets permet de :

- ✓ Réduire l'extraction de matières premières.
- ✓ Réduire des pollutions et nuisances
- ✓ Préservé de la diversité biologique et des espaces naturels
- ✓ Protection des recoures naturels
- ✓ La protection de l'atmosphère
- ✓ Contrôle et déduire des déchets dangereux

Par exemple:

• l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
• chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
• le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
• l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
• chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
• chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois.

1.2 Le Marc de café

1.2.1 Définition

Le marc de café, Ce résidu de l'infusion du café, celui que vous buvez tous les matins et qu'il serait bête de continuer de jeter, quand on connaît tous ses principes actifs ou ses propriétés.

Il peut servir d'engrais, car riche en azote, phosphore et potassium. On peut l'ajouter à la terre de rempotage des plantes, il est un apport d'éléments nutritifs supplémentaire. On peut aussi l'épandre à la surface de la terre, et finir par un arrosage qui fera petit à petit descendre les éléments nutritifs vers les racines. [9]



Fig.1.2 : Le marc de café [9]

1.2.2 Historique

D'après une légende chinoise populaire, l'empereur de Chine Shennong a accidentellement découvert que, quand des feuilles étaient plongées dans de l'eau bouillante, une boisson caféine, parfumée et reconstituante en résultait.

La première référence au café dans la littérature apparaîtrait dans les écrits du médecin perse al-Razi, datés du ixe siècle. À cette époque, les grains de café n'étaient disponibles que dans leur région d'origine, l'Éthiopie. Une légende populaire attribue sa découverte à un gardien de chèvre nommé Kaldi, qui observa que ses chèvres devenaient euphoriques et restaient éveillées la nuit après avoir brouté des caféiers. Essayant à son tour les baies que les chèvres avaient consommées, il ressentit la même vitalité. En 1587, Malaye Jaziri retrace dans un ouvrage l'histoire et les controverses sur le café, intitulé « Undat al safwa fi hill al-qahwa ». Jaziri y relate qu'un cheikh, Jamal-al-DIN al-Dhabhani, mufti d'Aden, fut le premier à adopter

l'usage du café en 1454, et qu'au xve siècle, les soufis du Yémen utilisaient couramment du café pour rester éveillés pendant les prières.

Vers la fin du xvie siècle, l'utilisation du café était rapportée par un européen habitant l'Égypte et c'est à cette époque que son usage se généralisa au Moyen-Orient. L'apparition du café comme boisson en Europe, où il fut d'abord connu en tant que « vin arabe » date du xviie siècle. Durant cette période des cafés ont été créés, les premiers étant ouverts à Constantinople et Venise.

En Grande-Bretagne, les premiers cafés ont ouvert à Londres en 1652, sur la St Michael's Alley. En France, la première « maison de café » est ouverte en 1671 à Marseille, port doté de liaisons régulières avec l'Orient, puis le phénomène s'étend rapidement à Paris où on compte en 1723, selon le « Dictionnaire du commerce », 380 cafés « ouverts à la causerie ». Les cafés sont rapidement devenus populaires dans l'ensemble de l'Europe de l'Ouest et jouèrent un rôle important dans les relations sociales du xviie et du xviiie siècle.

1.2.3 Composition du marc de café

Le café vient de l'arbre qui s'appel **Le caféier**, qui vit environ 50 ans dont une trentaine d'année de pleine production. Il peut atteindre la taille de 12 m, mais dans les plantations, il est taillé de façon à ne pas dépasser 2- 3 mètres pour faciliter sa culture et la cueillette. Ses fruits, de couleur rouge, sont appelés " drupes " ou " cerises ". Un arbre produit de 2 à 5 Kg de cerise par an. Il possède des racines profondes qui épuisent rapidement le sol [10].

La 1ère floraison intervient la 4ième année, les fleurs sont blanches et naissent en grappes axillaires avec un parfum intense proche du jasmin ou de l'oranger. Au 17ième, on appelait le caféier le "jasmin d'Arabie" .Il fleurit plusieurs fois par an.

Les fleurs de l'espèce Arabique, ont 5 pétales et sont capables de pratiquer une auto pollinisation, celles de l'espèce Robusta ont 6 pétales et ont besoin de l'aide des insectes pour la pollinisation. Il n'y a pas de floraison en dessous de 15°C. Leur durée de vie n'est que de quelques heures, mais elles se renouvellent en continu, un arbre produisant environ 30000 fleurs par an.

Le Robusta, par rapport à l'Arabica, tolère des températures plus élevées, des pluies plus abondantes et est plus résistant aux maladies.

Le marc de café c'est le résidu du café qui est composé essentiellement de la caféine — C8H10N4O2, qui est une molécule de la famille des méthylxanthines, qui comprend également la théophylline et la théobromine. Sous sa forme pure, elle consiste en une poudre blanche d'un goût extrêmement amer. La caféine est modérément soluble dans l'eau et les solvants organiques. À haute température, la solubilité de la caféine dans l'eau augmente. La caféine, stable dans les milieux relativement acide et basique, est une base faible et peut réagir avec des acides pour donner des sels. Cependant dans une solution aqueuse normale, elle n'est pas ionisée. Dissoute, elle peut être présente sous forme de dimères ainsi que de polymères. La caféine est une substance absorbant dans l'UV avec un maximum à la longueur d'onde de 274 nm.

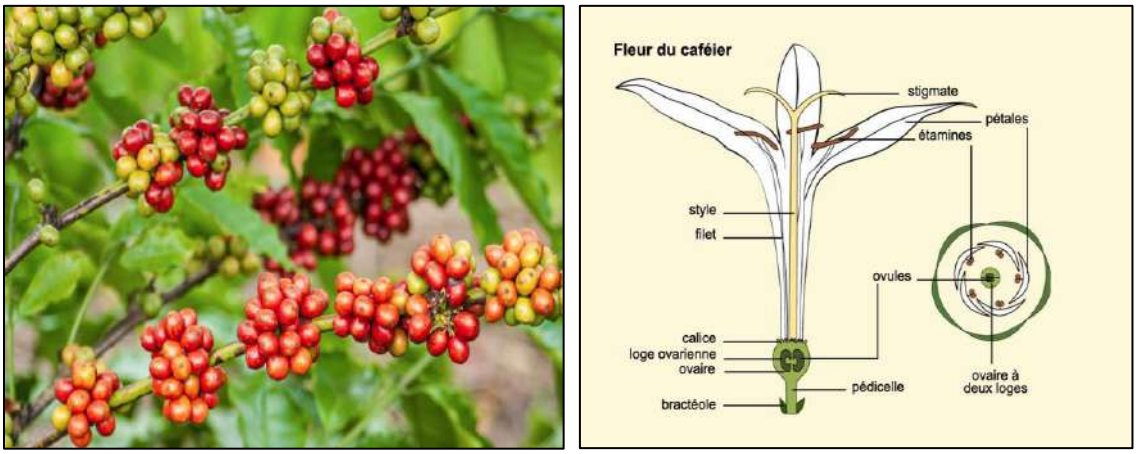


Fig. 1.3 : Le caféier et la fleur du caféier [12]

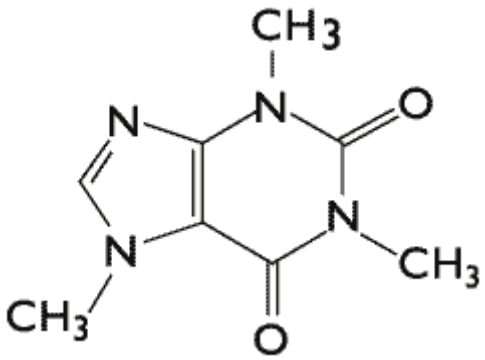


Fig. 1.4 : Molécule de caféine

1.2.4 Propriété du marc de café

Le marc de café a des propriétés physiques, chimiques et bioactives. Qui sont cités ci-dessous comme suit :

1.2.4.1 Propriétés physiques du marc de café :

a) l'humidité : l'humidité du Marc de Café varie entre 55 et 80%, il y'a une proportion directe entre l'humidité du marc de café et les microbes, donc une conservation optimale est nécessaire pour la morphologie des grains de marc de café, la figure ci dessous illustre un grain de marc de sous un microscope électronique à balayage [12]

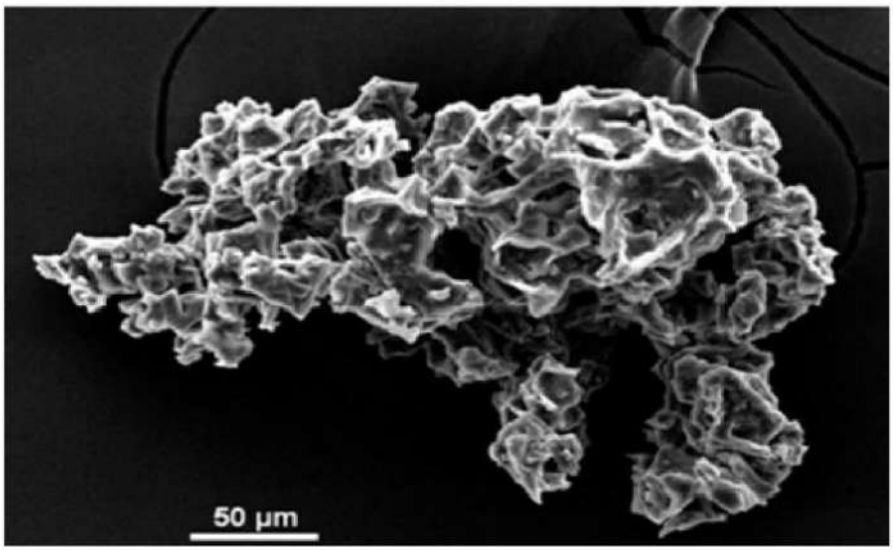


Fig 1.5 : Grain de marc à café en microscope à balayage [13]

b) L'angle de talus

C'est une donnée utile pour déterminer les superficies nécessaires des aires d'entreposage du marc de café après l'avoir récupéré. Et qui ne change pas en fonction de l'humidité.

c)La densité apparente

La densité apparente du marc de café est environ de 0,42 g/cm^3.

e) la densité réelle

On trouve que la densité réelle de l'arc du café est d'environ 1,16 g/cm^3.

f) La porosité

Il n'y a pas de micropores dans les grains de marc de café. En générale la porosité est de 0,63 peu importe le taux d'humidité. [14]

g) La taille des pores

Les pores du marc de café sont à 10 µm . [15]

h) Le pouvoir calorifique du marc de café est le même que celui du charbon et est supérieur aux autres biomasses citées dans l'histogramme suivant alors qu'il diminue lorsque le taux d'humidité du marc de café augmente (Tableau 1.1) .

i) La température de combustion du marc de café est de 460 °C. Qui dépend de la concentration en oxygène et du taux d'humidité du marc de café.

Tableau 1.1 Le pouvoir calorifique de divers résidus de biomasse [16]

Matières	Pouvoir calorifique (kcal/kg de matière sèche)
Tiges de jute	4619
Enveloppes de riz	3805
Fibre de coco	4707
Paille de blé	4185
Brindilles de coton	3750
Épis de maïs	3804
Bagasse de canne à sucre	4470
Bois	5450
Marc de café	5700

1.2.4.2 Propriétés chimiques du marc de café

Parmi les compositions élémentaires du marc de café on trouve que le carbone est l'élément majoritaire. Le tableau suivant présente la composition élémentaire du marc de café.

Tableau 1.2 Composition élémentaire du marc de café [17]

Éléments	Quantités
Carbone (C)	49,7 %
Hydrogène (H)	s.d.
Azote (N)	2,3 %
Oxygène (O)	s.d.
Ratio H/C	s.d.
C/N	22

]
]

Tableau 1.3 Les principaux composés du marc de café [17]

Éléments	Quantités
Glucides	45,3 %
Lipides	9,3-16,2 %
Protéines	14 %
Minéraux	6800 mg/kg de matière sèche
Polyphénols	13-18 mg acide gallique éq.

- **Les glucides** : sont les éléments les plus majoritaires dans le marc de café. Plus précisément, le marc de café contient 46,8 % de mannose, 30,4 % de galactose, 19 % de glucose et 3,8 % d'arabinose. Ces données varient d'une étude à l'autre, cela pouvant être dû à la variété des grains de café utilisés. [14]

- **Les lipides :** les données varient principalement entre 9,3 % et 16,2 %, parfois aux alentours de 20. La part de lipides dans les grains café, varie entre 11 % et 20 %. Les lipides n'étant pas extraits de manière efficiente dans un milieu aqueux. Une part de lipide relativement similaire dans les différents types de marc de café facilite la récupération du café et sa réutilisation. En effet, la matière récupérée peut ainsi être un mélange des différents marcs de café.

- **Les Protéines :** le marc de café contient entre 6,7 et 14 % de protéines selon les études. Cependant, il se peut que ces estimations soient surévaluées à cause de la présence d'autres composés contenant de l'azote tel que la caféine ainsi que plusieurs acides aminés.

- **Les minéraux** : sont en plus grande quantité dans le marc de café à expresso, que dans le marc de café filtre.

Tableau 1.4. Composition des principaux minéraux du marc de café [19]

Minéraux	Quantités (mg/kg)
Potassium	8824 ± 4662
Phosphore	1534 ± 503
Magnésium	2201 ± 1341
Calcium	349 ± 122
Fer	46 ± 21
Manganèse	27 ± 10
Cuivre	25 ± 12

1.2.4.3 Propriétés bioactives du marc de café

Le marc de café a des propriétés bioactives. Comme le montre le tableau suivant, le marc de café a une activité anti-radicalaire semblable selon l'espèce de café.

Tableau 1.5. Activité radicalaire du marc de café [20]

Concentration	200 ppm	100 ppm	50 ppm
Marc de café arabica	89,2 ± 4,5	87,9 ± 4,1	86,9 ± 5,0
Marc de café robusta	84,3 ± 5,9	83,8 ± 5,1	82,0 ± 5,0

En conclusion, on remarque que la composition chimique du marc de café est très variée, elle contient des glucides, lipides en passant par les protéines, les minéraux et les antioxydants. Cette variété de matériaux présents dans le marc de café, laisse de nombreuses possibilités de valorisation et d'utilisation.

1.2.5 Les utilisations possibles du marc de café

De multiples voies de valorisation et d'utilisations sont possibles avec le marc de café. Parmi celles-ci se retrouvent les productions d'éthanol, de biodiesel, de combustibles pour les fours industriels et de granules de combustion pour les fours résidentiels. Le marc de café peut aussi être utilisé comme substrat pour la culture de micro-organismes, comme compost, peut être utilisé dans l'industrie alimentaire, dans la production de biomatériaux, dans la production de charbon actif, dans le traitement des eaux usées des industries et de l'eau potable, etc. Pour toutes les voies de valorisation qui sont discutées, l'utilisation du marc de café arabica ou robusta est possible, aucune distinction n'a été faite par les études.

- **Production de biocarburants**

Les productions successives de différents biocarburants sont possibles avec le marc de café. Cependant, certaines étapes sont nécessaires afin d'obtenir un rendement optimal. De plus, l'utilisation directe du marc de café comme granule de combustion nécessite la recherche d'un équilibre d'humidité afin d'améliorer les paramètres énergétiques du biocarburant.

- **La production d'éthanol**

Comme mentionnée précédemment, la production de bioéthanol et de biodiesel est possible avec les mêmes grains de marc de café. En effet, la production d'éthanol correspond à l'exploitation des sucres et la production de biodiesel correspond à l'exploitation des lipides. [22] La production d'éthanol directement à partir de marc de café n'est pas une méthode viable, car la présence des lipides ralentit la réaction enzymatique de saccharification.

- **Production de biodiesel**

Les lipides extraits du marc de café peuvent servir de matières premières pour la production de biodiesel [22]. Le marc de café peut ainsi produire une multitude de combustibles. À la suite de ces productions, le marc de café peut encore être utilisé en pyrolyse pour fabriquer du biochar.

Le biochar produit peut ainsi être utilisé notamment pour l'amendement de sol et la séquestration du dioxyde de carbone (CO2). Cependant, les résultats des études sur le biochar sont parfois négatifs et démontrent un manque de connaissance sur ce produit

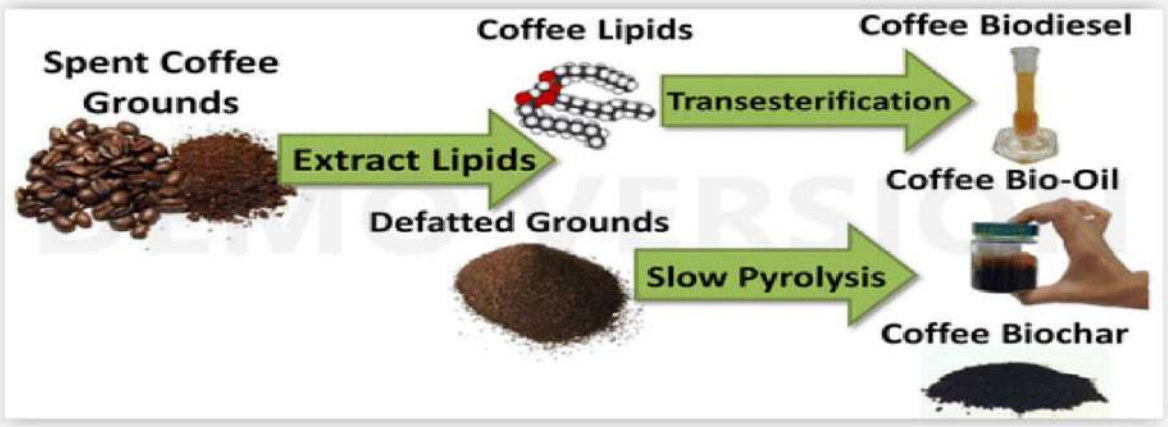


Fig. 1.6. Possibilités de valorisation du même marc de café [23]

- **Production de compost**

Avec un bon ratio C/N, le marc de café peut être utilisé comme fertilisant. Ainsi, trois méthodes de compostage avec du marc de café ont été comparées, soit le vermicompostage, le compostage en cuve et le compostage en andain. Le compostage en cuve présente des résultats plus rapides, mais montre une plus grande perte en azote. Or le compostage en andain montre une plus grande augmentation en azote à hauteur de 75 %. [10]

- **Domaine d'agriculture**

L'intérêt du marc de café dans le domaine de l'agriculture réside d'abord dans sa teneur importante en potassium et magnésium immédiatement assimilables, puis dans celle également importante de phosphore et de cuivre qui sont pour moitié immédiatement assimilable. En revanche, il est trop pauvre en calcium, zinc, manganèse et fer pour compenser des carences de ces éléments.



Fig. 1.7. Marc de café comme engrais [10]

- **Substrat pour la culture de micro-organismes et de champignons comestibles**

Le marc de café peut être utilisé comme substrat pour la production de caroténoïde grâce à la culture de levure. Les caroténoïdes sont utilisés dans les industries agroalimentaires (colorant), cosmétiques et pharmaceutiques et sont donc des composés d'intérêts.

- **Industrie alimentaire**

De nombreux constituants du marc de café cités précédemment peuvent être utilisés dans l'industrie de l'alimentation. En effet, le marc de café peut, par exemple, être utilisé pour la fabrication de spiritueux à saveur de café .

- **Production de charbon actif**

Le marc de café peut être transformé en charbon actif. Le charbon actif ainsi produit possède une performance comparable ou meilleure que les charbons actifs commercialisés sur le marché actuel. Dans l'optique de produire du charbon actif à partir de marc de café, ce dernier ne doit pas être exploité au préalable pour sa caféine. En effet, la caféine joue un rôle important dans la préparation du charbon actif en tant que catalyseur. [10]

- **Utilisation comme remblai pour les abords des routes**

Les propriétés mécaniques du marc de café sont propices à son utilisation comme remblai pour les abords des routes, mais ne le sont pas pour le remblai des routes elles-mêmes. L'utilisation du marc de café comme remblai ne semble poser aucun problème environnemental selon une étude. Cette dernière affirme que la concentration des composants du marc de café est inférieure aux limites de l'Agence de protection de l'environnement (EPA) des États-Unis, dans la désignation d'un déchet dangereux. [10]

- **Autres utilisations**

La composition chimique du marc de café ouvre la porte de beaucoup d'industries. Par exemple, les antioxydants sont des composés très prisés dans l'industrie du cosmétique et de la pharmaceutique et la cellulose est un produit utilisé dans la fabrication du papier. Aussi, la capacité actuelle de transformer la cellulose en glucose permet la synthèse de nombreux autres composés chimiques d'intérêts (éthanol, butanol, hydrogène, acide organique, glycérol, etc.). Ainsi, l'industrie de la chimie peut être sollicitée.

1.2.6 Impacts environnementaux de la récupération du marc de café et de sa mise en valeur

Comme dit précédemment, le marc de café est un produit contenant beaucoup de composés, dont la caféine, des tanins et des polyphénols. Ces composés à caractère écotoxique ne doivent pas se retrouver dans la nature, particulièrement dans les cours d’eau. En effet, le marc de café crée alors une forte demande en oxygène.

1.2.6.1 Écotoxicité

Le marc de café présente une certaine écotoxicité à cause de la présence de caféine, de polyphénols et de tanins. De plus, cette matière possède une forte demande biologique en oxygène et ne peut être rejetée dans la nature telle quelle. Par conséquent, il est fort probable qu'une grande quantité de marc de café soit envoyée à l'enfouissement. Ainsi, le marc de café participe à la consommation du territoire, à la production de biogaz et à la production de lixiviat en remplissant les sites d'enfouissement. Même si les sites d'enfouissements au Québec récupèrent et traitent maintenant les biogaz et le lixivixat, les pressions n'ont pas pour autant disparu. Une récupération spécifique du marc de café diminuerait les pressions dans les sites d'enfouissement. [10]

1.2.6.2 Diminution des pressions sur les ressources naturelles

La récupération spécifique du marc de café et sa valorisation diminuerait les pressions mises sur les ressources naturelles dépendamment de la mise en valeur effectuée. Par exemple, la production de biocarburant à partir d'une matière résiduelle qu'est le marc de café évite les conflits apportés par les biocarburants de première génération, soit entre les besoins alimentaires et énergétiques. Aussi, le biodiesel est un carburant biodégradable et se décompose plus rapidement que le diesel pétrolier. (Canada, 2006) La production de papier et de granules de combustion avec 50 % de marc de café diminuerait la quantité de bois qui devrait être utilisée pour répondre aux mêmes besoins.

Ensuite, la combustion du marc de café dans les fours industriels pourrait diminuer la quantité de charbon ou d'autres matières résiduelles utilisée par certaines industries. Le pouvoir calorifique du charbon est de 25 MJ/kg et celui d'un pneu est de 35 MJ/kg. Or, celui du marc de café est de 23,72 MJ/kg (ce qui correspond au 5700 kcal/kg donné plus haut). Ainsi, le pouvoir calorifique du marc de café est presque identique à celui du charbon, mais inférieur à celui des pneus. Son utilisation dans certains fours existants, notamment en Europe, démontre quand même son efficacité. [10]

1.2.6.3 Traitement des eaux

L'utilisation du marc de café dans la décoloration, notamment dans l'industrie textile, de l'alimentaire et du papier aurait un grand impact environnemental sur les cours d'eau du Québec. Les rejets dans l'environnement de colorants ont de très gros impacts, notamment en augmentant la toxicité des cours d'eau, la demande chimique en oxygène et en empêchant la

photosynthèse à cause d'une réduction de la pénétration de la lumière. Certains produits, dont le bleu de méthylène, sont difficiles à enlever des eaux usées avec les techniques habituelles, dont les traitements biologiques et les précipitations chimiques. En parallèle, d'autres méthodes comme l'utilisation de charbon activé sont efficaces, mais coûteuses. Ainsi, il a été montré que le marc de café est un candidat de choix dans l'adsorption de colorant cationique de telles industries.

1.2.7 Impacts économiques de la récupération du marc de café et de sa mise en valeur

Le marc de café possède de nombreuses voies de mise en valeur. Plusieurs produits peuvent être créés en valorisant cette matière. Les figures 1.8 et 1.9 résument, de manière non exhaustive, les différentes voies possibles de création de produits et ainsi de valeur.

Toutes ces voies sont des opportunités pour le développement de nouvelles entreprises et le développement de nouvelles expertises. La récupération spécifique du marc de café dans mande entier a le potentiel de développer un marché local, la production de produits locaux et l'innovation de la part d'entrepreneurs. [10]

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les meilleures méthodes d'extraction des différents composants du marc de café ce qui favorise la création de nouvelles entreprises. De plus, les méthodes étudiées ont souvent été considérées comme peu dispendieuses. Certaines entreprises proposent des équipements pour valoriser le marc de café, telles que des machines à fabriquer des granules de bois.

1.2.8 Impacts sociaux de la récupération du marc de café et de sa mise en valeur

La récupération spécifique du marc de café a plusieurs impacts sociaux, soit la création d'emploi, le développement de marques locales, la santé et l'amélioration de l'image de marque de l'agglomération de la vie. [10]

1.2.8 1 Création d'emploi

Le développement de marché, de nouvelles entreprises engendre la création de nouveaux emplois. La multitude d’avenues de valorisation du marc de café offre ainsi plusieurs possibilités de création d'emploi. [10]

1.2.8.2 Développement de marque locale

La valorisation du marc de café peut engendrer la création de nombreux produits locaux ce qui favorise le sentiment de communauté au sein d'une ville. Le développement de marque locale peut également développer un sentiment de fierté chez les citoyens (Made in NY, s.d.). Ce sentiment de fierté est d'autant plus grand si la marque locale respecte l'environnement, car la population à besoin de plus en plus de se sentir contributeur à la protection de l'environnement.

1.2.8.3 Santé

Comme mentionné précédemment, le marc de café possède plusieurs propriétés bioactives. La récupération spécifique du marc de café permettrait l'utilisation de ces bioactifs dans l'alimentation et ainsi améliorer la santé des consommateurs. En outre, certains antioxydants présents dans la nourriture humaine sont synthétiques et leur sécurité est mise en doute. Ainsi, les antioxydants présents dans le marc de café peuvent servir de substitut aux synthétiques en raison de leur bénéfice dans la santé. [10]

1.2.8.4 Image de marque

La récupération spécifique du marc de café donnerait à cette dernière une image positive sur la scène internationale. De plus, par exemple la Ville de Montréal a reçu très récemment la certification de ville écoresponsable d'iCompli Sustainability. Cette certification vise l'efficacité énergétique, la qualité de l'air, de l'eau et aussi le gaspillage. [37] Ainsi, une récupération spécifique du marc de café participerait à l'image positive .En somme, le marc de café est composé de beaucoup d'éléments d'intérêts. Plusieurs études ont démontré que ces éléments peuvent être extraits du marc de café. Aussi, les possibilités d'utilisation du marc de café sont très nombreuses.

1.3 Le béton de sable

1.3.1 Introduction

Dans cette dernière décennie, Le besoin en granulats a connu une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement qui ont été lancés en Algérie. Dans le sud d'Algérie, où les gros granulats sont peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions, une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire [24].

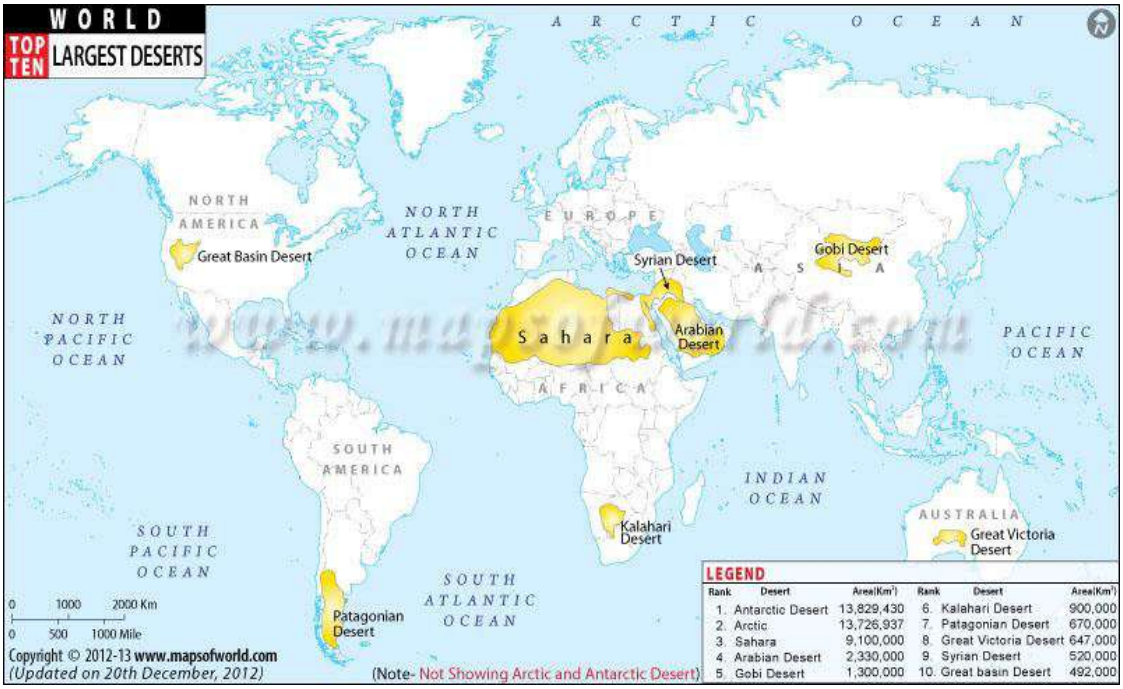


Fig.1.8. Carte de déserts dans le monde [25]

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

1.3.2 Définition

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside

essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø<10mm.

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable (Dmax = 5mm), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimal étant atteinte par un ajout complémentaire de fines 3(fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400à 600) Kg/m^3.

1.3.3 Spécificité du béton de sable

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

Le béton de sable se distingue d'un mortier par sa composition, le mortier est en général fortement dosé en ciment et ne comporte pas systématiquement d'addition, et surtout par la destination : les bétons de sable sont essentiellement destinés aux usages traditionnels du béton. [26]

1.3.4 Historique des bétons de sable

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

Vers les années 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut construit en béton aggloméré et sert à relier Fontainebleu à Orléans. Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui correspond à un dosage en liant de 400 kg/m3; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers. [27]

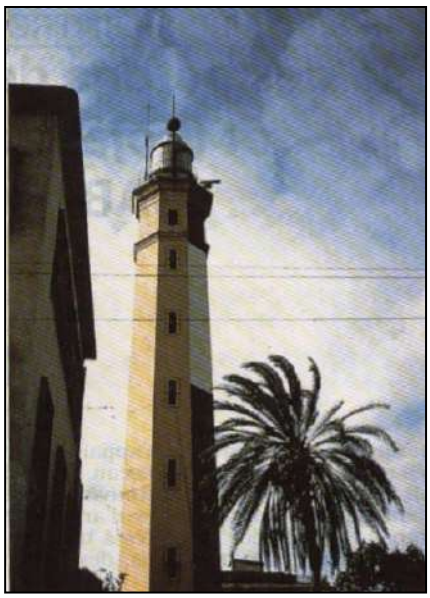


Fig.1.9. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) [27]

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



Fig.1.10. Métro de Saint-Pétersbourg [27]

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

1.3.5 Les composants du béton de sable

Le béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certain usage, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants [27]

1.3.5.1 Les sables

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

sables. Les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau de gâchage, ce qui entraîne une chute de la résistance.

a) Classification des sables selon leurs provenances.

On peut classer les sables selon leurs provenances comme suit :

- **Sable de rivière :** il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- **Sable de mer :** il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- **Sable de carrière :** Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.
- **Sable artificiel :** il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré …). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.
- **Sable de dune :** c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara.

1.3.5.2 Les fines d'ajout (ou addition)

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

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

La granulométrie joue un rôle essentiel pour la différence entre le béton classique et le béton de sable. La compacité en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Dans le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 20 mm) [27]; ils créent des macrovides que l'on peut remplir par des sables et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle

qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre le besoin en fines et le dosage en ciment est interprétée par la règle suivante:

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

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

Tableau 1.6. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [27]

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

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

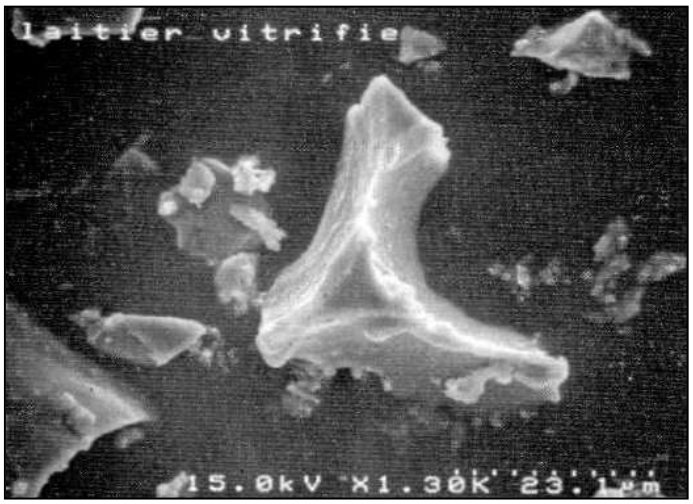


Fig.1.11. Fines anguleuses [27]

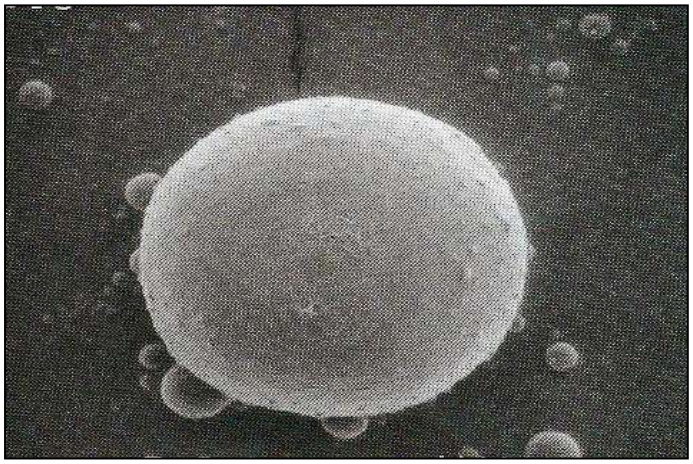


Fig.1.12. Fines sphériques [27]

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

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

Il y a deux types de fines (fillers) que nous allons utiliser dans notre étude : les fillers calcaires (fines inertes) et la fumée de silice (fines actives). Les normes françaises (1979) définissent les fillers de la façon suivante : produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte, laitiers, 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 0.2 mm. L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse [42]. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

- **Les fillers calcaire**

Le filler calcaire est un matériau très fin broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 µm, ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables. Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif.

L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la

granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable, les filler peuvent également influencer l'hydratation, être présents dans les pores capillaires (ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau) et influencer les paramètres rhéologiques du béton .

- **Fumé de silice**

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages.

Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique.Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment).Leur couleur est le plus souvent gris clair.

- **Laitier**

Les laitiers du haut fourneau sont des co-produits de la fabrication de la fonte des usines sidérurgiques (la production des laitiers est liée à celle des fontes).

Ils sont formés par la majeure partie de la gangue du minerai de fer et par la majeure partie des impuretés du coke et des fondants ajoutés, ce qui est illustré à la figure 1.4 :



Figure 1.13 : Le laitier granulé.

- **Cendres volantes**

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

1.3.5.3 Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu…et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine [27].

1.3.5.4 L'eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18-303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables [27].

1.3.5.5 Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires. Les adjuvants employés pour le cas de béton de sable devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103 [27].

1.3.5.6 Autres ajouts

- **Les fibres**

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout. On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe [27].

- **Les gravillons**

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70 (**G/S< 0,70**) [27].

- **Les colorants**

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier

dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps [27].

1.3.6 Domaines d'emploi des bétons de sable

Le béton de sable est un matériau ancien utilisé bien avant le béton traditionnel et présente sous sa forme actuelle certaines propriétés spécifiques par rapport au béton classique, et peut procurer des économies dans certaines régions et pour certains usages.
Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable, établis sur ces données sont les suivants :

1.3.6.1 Fondations profondes

Le béton utilisé dans le bétonnage des pieux profonds doit présenter des spécificités par rapport au béton traditionnel utilisé dans les fondations superficielles. Ainsi, des règles et recommandations énoncent les caractéristiques fondamentales suivantes des bétons pour pieux exécutés en place [27].



Fig.1.14.Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré
en béton de sable (sous bentonite) [27]

1.3.6.2 Bâtiment

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique [27].

1.3.6.3 La préfabrication

Le béton de sable est plus adapté à la préfabrication, on constate que les performances recherchées en préfabrication sont réunies dans le béton de sable (facilité en moulage, la montée en résistance, démoulage rapide, aspect de surface exceptionnel) [27].

- **Toiture à plis**

Ces éléments préfabriqués ont une épaisseur de 5 cm, une hauteur de 2 m et une longueur pouvant atteindre 32m (Fig.1.16 et 1.17).

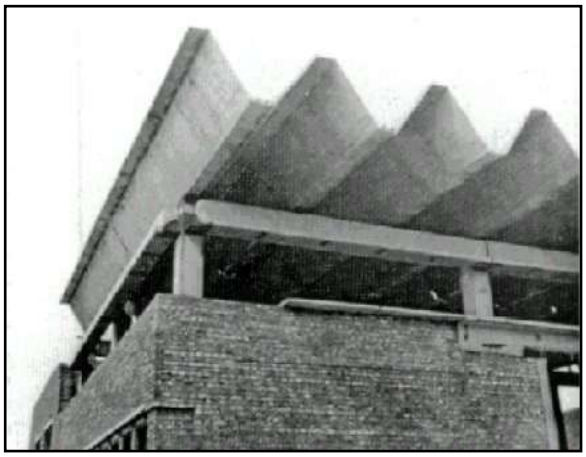


Fig .1.15 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable

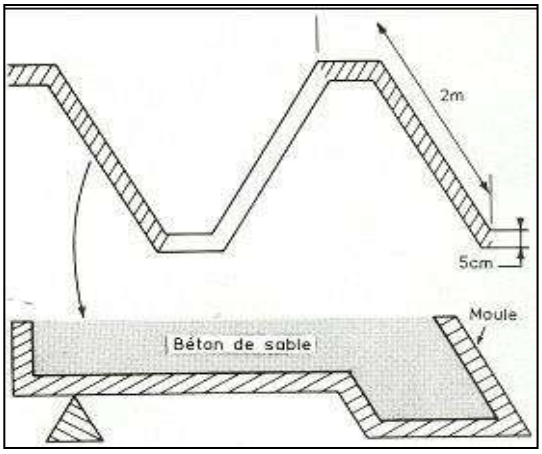


Fig. 1.16. Moulage d'un élément préfabriqué en béton de sable

- **Ombrelles d'étanchéité**

La finition du métro de Leningrad en Russie est assurée par la mise en place d'une ombrelle d'étanchéité (Fig.1.18) ; il s'agit d'une voûte à caractère autoporteur constituée de plusieurs éléments (généralement trois) assemblés sur place et réalisés dans une usine de préfabrication (Fig.1.19).

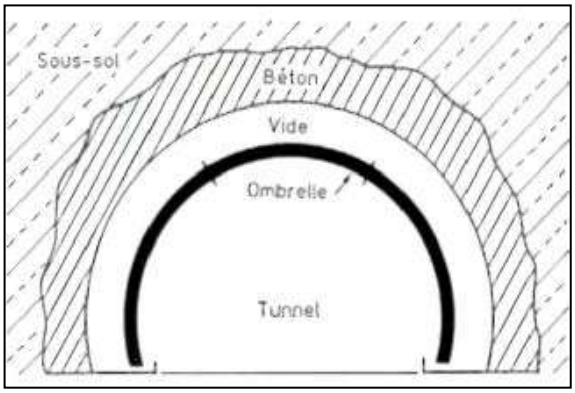




Fig. 1.17. Ombrelles d'étanchéité en place [27] **Fig.1.18.** Tunnel du métro de Leningrad [27]

1.3.6.4 Routes, chaussé et dallage

Dans le domaine des routes et autoroutes (Fig.1.20 et 1.21), dans les aérodromes et en bâtiment, les BS peuvent être utilisés dans la réalisation des structures de chaussées pour améliorer leur résistance à l'usure et dans la production des équipements de voirie extrudés (ex : caniveaux, bordures, séparateurs, etc.).

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



Fig. 1.19. Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface [27]

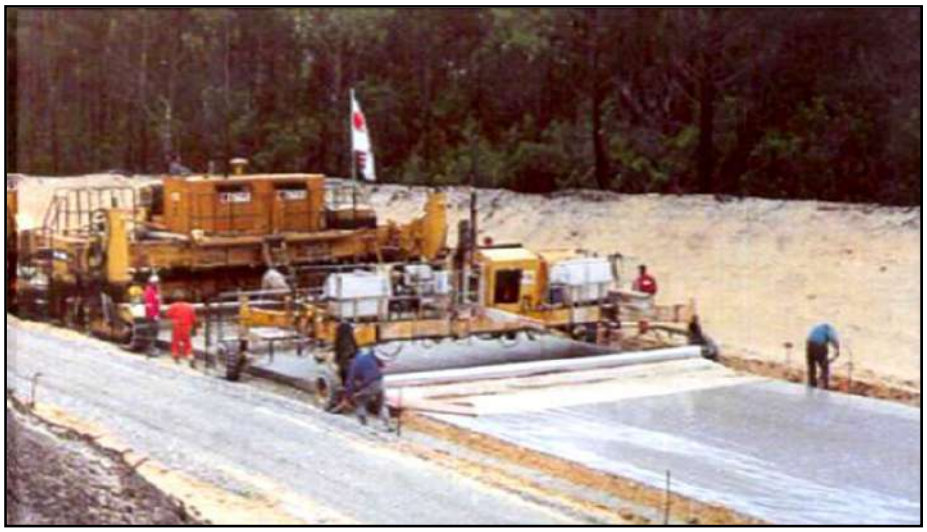


Fig.1.20. Déroulement d'un film polyane (cure) [27]

1.3.7 Intérêts et limites des bétons de sables

1.3.7.1 Intérêt des bétons de sable

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

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

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

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

1.3.7.2 Limites des bétons de sable

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques [30].

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

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

1.3.8 Méthodes de formulation des bétons de sable

Dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement d'obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques. [27]

Dans le cas du BS (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très

élevés en ciment. A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants, afin de minimiser le dosage de ciment.
Deux types d'approches de formulation sont présentées : une approche théorique, basée essentiellement sur l'optimisation de la compacité du BS en partant de la relation de Caquot et une méthode expérimentale, basée sur la réalisation de gâchées.

1.3.8.1 Approche théorique de la formulation des bétons de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci.
Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité. Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot [59] a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/Dmax).

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

V : Volume des vides du mélange granulaire ;
V_0 : 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 a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

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

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

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

2. Toute l'étendue du sable comprise entre 80m m et le diamètre maximal du sable Dmax , ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 µm provenant des fines d'ajout.

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

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

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

Dmax : Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

La constante expérimentale (V0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7÷0.8).

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80m m, et à combler la porosité du sable ainsi calculée.

En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires. En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80m m) et le volume des vides associé a l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout.

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

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

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente (Fig.1.22).

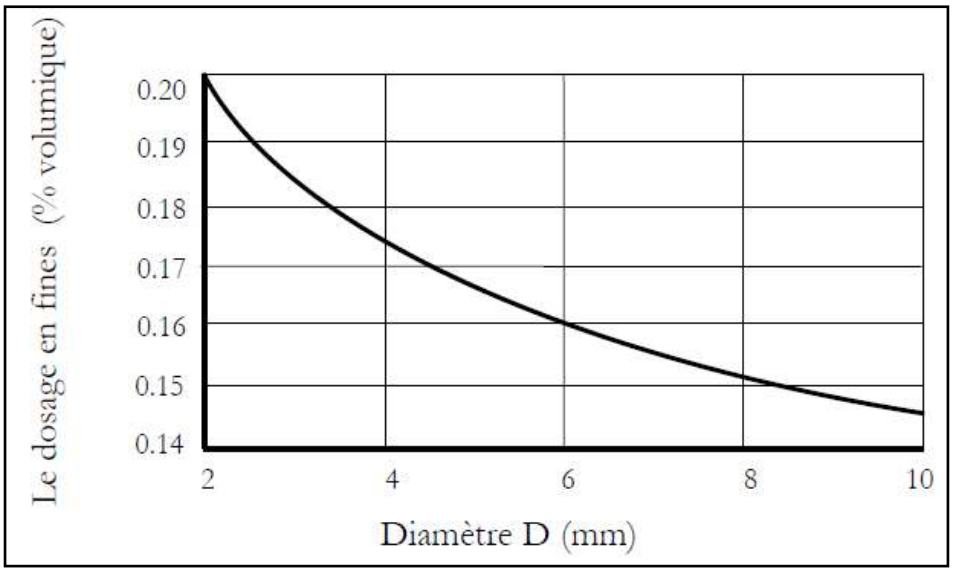


Fig.1.21. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines

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

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

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

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

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

Avec:

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

d : Densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 mm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme la Figure 1.23 le montre :

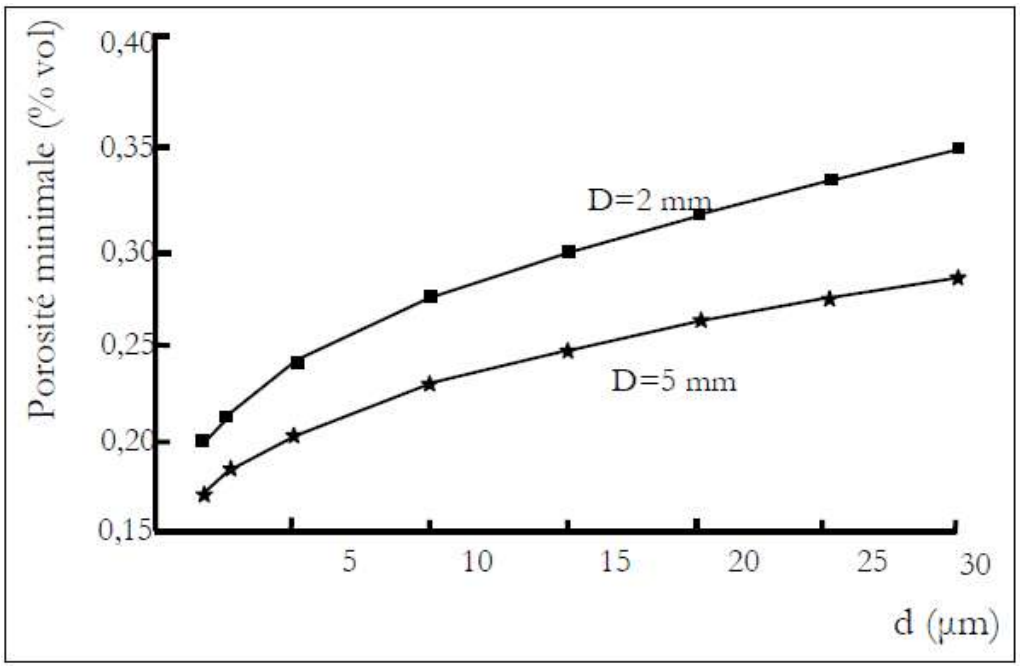


Fig.1.22.Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [27]

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

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; la Figure 1.24 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

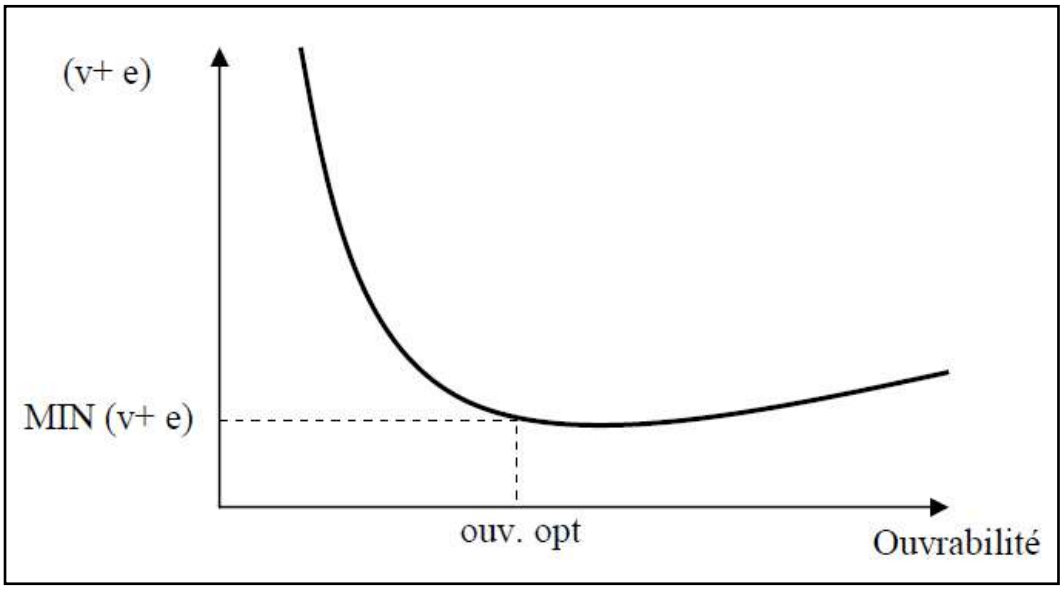


Fig.1.23: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [27]

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

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

Dans les bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

[Vides] = K [eau] …… (Equation 2.6)

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

- **Dosage en sable**

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

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

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

- **Estimation de la résistance en compression**

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.

Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET [55] a été proposée récemment.

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

Avec:

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5 ;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;
E : dosage en eau total (l/m^3) ;
V : air piégé (l/m^3) ;
C : dosage en ciment (kg/m^3) ;
Rb : résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa).

Avec :

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

0.2< Kcv<0.4 2< Kfs<3.3 K1 £ 0.5
K2= Kfil (Fil/C) ;
0< Kfil £ 0.4 K1<0.2
K1 : coefficient pouzzolanique
K2 : coefficient d'activité du filler calcaire
Kcv, Kfs, Kfill : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.
CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente, alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Cette activité pour chaque type de filler présente un optimum au-delà duquel elle ne développe plus des performances mécaniques.

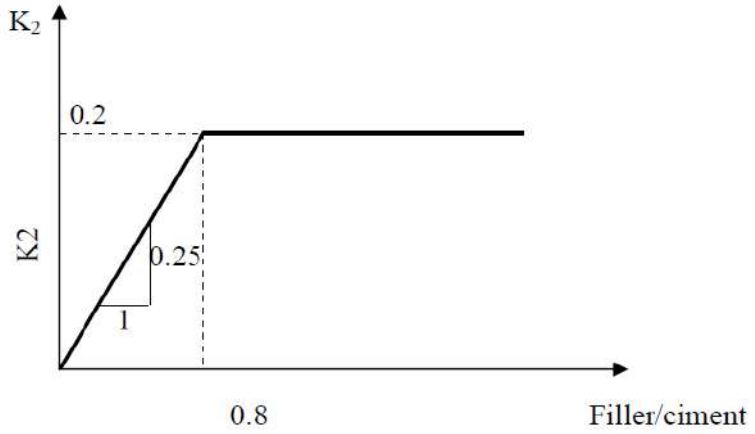


Fig.1.24. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [27]

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

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

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

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable.

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

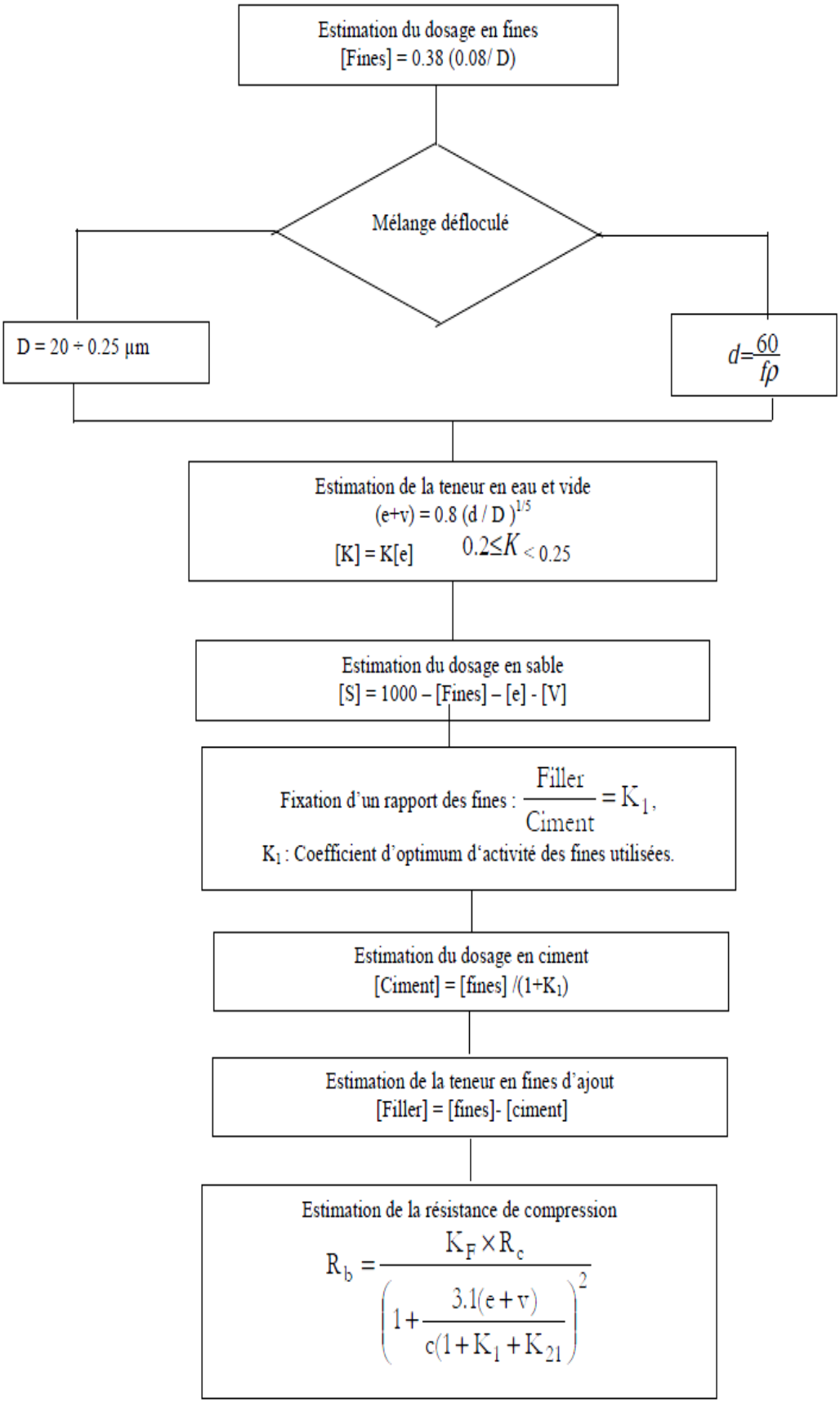


Fig.1.25. Organigramme de la méthode théorique

1.3.8.2 Méthode expérimentale de formulation

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

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

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

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

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction [27] .

1.3.8.2.1 Les différentes étapes de la formulation

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

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

a) Dosage en ciment

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

b) Dosage en eau

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

c) Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, Vair, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

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

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

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

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

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

MVA sable : masse volumique absolue du sable.

V sable : volume du sable. Après détermination des différentes proportions des constituants, cette formulation permet de calculer la masse volumique apparente théorique (MVAT) en sommant l'ensemble des masses ainsi calculées pour le volume unitaire (1 m^3).

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

d) Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

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

- La masse volumique apparente réelle doit être égale à la masse volumique apparente théorique calculée par la formule (1)
- La maniabilité du mélange sera comprise entre 7 et 10 s selon le maniabilimètre LCPC.

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

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

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

Où

S_i : dosage en sable après correction

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

MV sable : masse volumique absolue du sable

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

Il sera rajouté si 1'écoulement au maniabilimètre est supérieur à 10s (-V dans la formule précédente n° 2). Il sera retranché si 1'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7s (+V dans la formule n° 2) Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle. En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- **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.

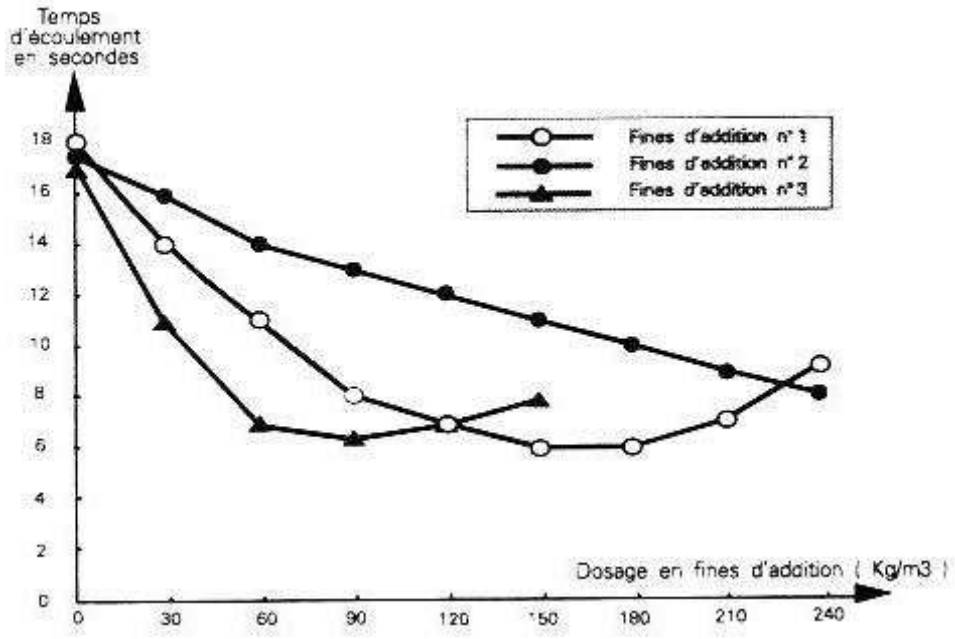


Fig.1.26. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition [27]

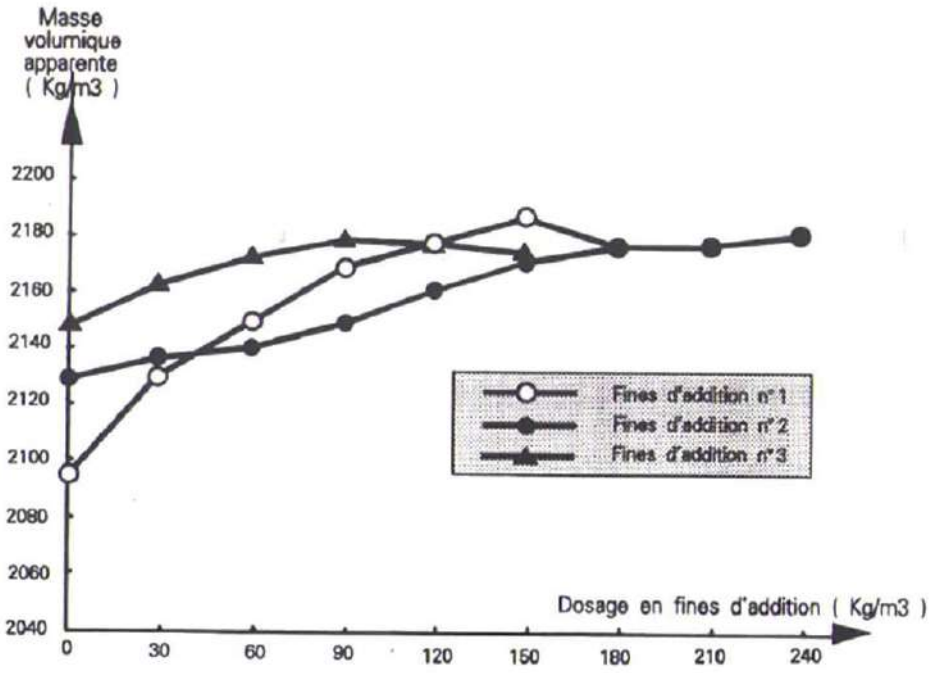


Fig.1.27. masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition [27]

1.4. Valorisation des déchets de café dans les matériaux a base cimentaire

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières, marc de café représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants. Des études antérieures [60-62] ont montré qu'il était possible d'utiliser les déchets de café dans les bétons et le mortier.

1.4.1 Influence de déchet de café sur les propriétés des matériaux cimentaire

1.4.1.1 Etats frais

a) L'ouvrabilité et maniabilité

Lee et al [31] ont étudié l'influence de substitution (0%,2%,3% ,10% et 15%) du ciment par des déchets de café traité (chauffé au 500 et 600°C) et non traité sur la maniabilité de mortier de ciment. Ils ont constaté que quelque sois le type de déchets de café utilisés la maniabilité de mortier est diminuer en fonction de pourcentage de déchets de café.

Lin LK et al [32] Ont aussi étudié l'influence de substitution du sable par les déchets de café sur la maniabilité du béton ordinaire. Ils ont trouvé que l'incorporation de déchets de café à la masse du béton influe négativement sur sa maniabilité.

b) La densité

Lin LK et al [32] Ont étudié l'influence de substitution du sable par les déchets de café sur la densité du béton ordinaire. Ils ont trouvé que l'incorporation de déchets de café à la masse du béton influe négativement sur sa densité.

1.4.1.2 Etats durci

Les études réalisées jusqu'à maintenant sur l'influence des déchets de café sur les performances mécaniques des mortiers ou béton sont uniquement les résistances à la compression.

Lee et al [31] ont étudié l'influence de substitution (0%,2%,3% ,10% et 15%) du ciment par des déchets de café traité (chauffé au 500 et 600°C) sur la résistance à la compression de mortier de ciment. Ils ont trouvés que quelque sois le types de déchets utilisés, la résistance à la compression est diminue en fonction d'augmentation de pourcentage du déchet de café .

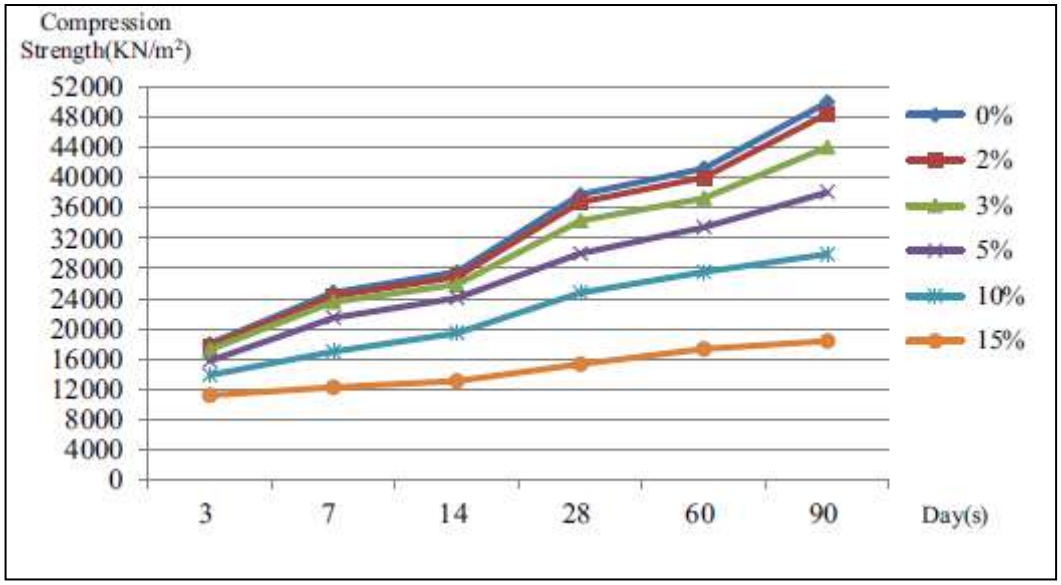


Fig1.28. La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 500°C [31]

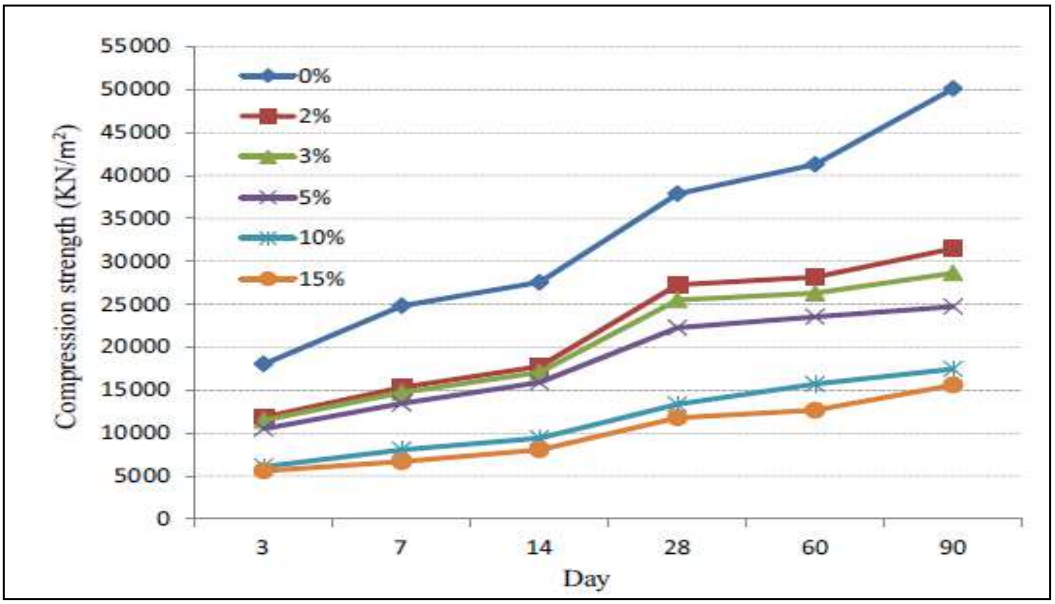


Fig1.29. La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 600°C [31]

1.5 Conclusion

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

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 marc du café. Ces derniers présentent une gêne environnementale et sanitaire de leurs durées de vie et de leurs grandes quantités. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Les matériaux de construction peuvent représenter un débouché intéressant.

Par ailleurs, Malgré l'insuffisance des résultats auxquels ont aboutissent les différentes recherches, nous pouvons dire que les bétons de sable pourront remplacer les bétons classiques dans certains éléments porteurs. Des applications très diverses ont déjà été réalisées avec succès. Pour avoir une maniabilité convenable, l'utilisation des adjuvants s'impose alors pour réduire le dosage en eau et augmenter la résistance.

Chapitre 02 :

Matériaux et Essais

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents matériaux 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 mortiers et les composites obtenus à l'état frais et à l'état durci.

Le béton de sable est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants :

- La maniabilité
- La densité

A l'état durci nous avons évalué l'absorption capillaire.

En ce qui concerne l'étude de l'influence de haute température sur les propriétés De différents BS, nous avons réalisé les essais suivants :

- La perte de masse.
- La densité
- l'absorption capillaire
- La résistance à la compression

2.2 Matériaux utilisés

Les caractéristiques des matières premières utilisées pour la confection des bétons de sable sont présentées ci-après.

2.2.1 Les sables

Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, deux sables différents ont été séparément utilisés :

a) Sable de BAHBAH

Le premier type de sable utilisé au court de ce travail est un sable de dune provient de la région de HASSI BAHBAH située au nord de la wilaya à 50 km de Djelfa à plus de 250 km au sud d'Alger.

b) Sable de concassage

Le deuxième type sable est un sable concassé provient de la région de BOUIRA, située à 90 km au sud d'Alger.

La Figure 2.1 suivante donne un aperçu général sur la nature des sables utilisées.



Fig. 2.1: L'aspect général des sables utilisées

La Figure 2.1 illustrant l'analyse granulométrique réalisée sur les sables utilisés selon la norme NF EN 933-1[33], montre que le sable de dune est un sable fin présentant une granulométrie serrée, par contre le sable de concassage est un sable relativement grossier et présentant une granulométrie étalée.

Les caractéristiques physiques des sables utilisés sont regroupées dans le tableau 2.1 ci-dessous. Les valeurs moyennes des masses volumiques apparentes montrent que le sable de dune est plus dense, les valeurs des modules de finesse confirment que sable de dune sont plus fin et les valeurs de l'équivalent de sable (selon la norme NF EN 933-8[34]) mettent en évidence la propreté des sables utilisé (pauvres en éléments fins).

Tableau 2.1. Caractéristiques physiques des sables utilisés

Caractéristiques	Sable de BAHBAH	Sable de Concassage	Normes
Module de finesse	0.87	3.18	NF EN 933-1 [33]
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.58	2.50	NF EN 1097-6 [35]
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.42	1.40	NF EN 1097-3 [36]
Equivalent de sable (%)	65.00	75.00	NF EN 933-8 [34]
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.5	1.5	NF EN 1097-6 [35]
La compacité (%)	55.03	56	NF EN 1097-3 [36]
La porosité (%)	44.97	44	NF EN 1097-3 [36]

L'analyse chimique des sables utilisés, menée par rayon X, révèle que le sable concassé est riche en calcite ($CaCO_3$). Pour les sables dunaire la silice (Quartz) (S_iO_2) est l'élément le plus prépondérant dans la composition chimique de ces sables (Fig.2.2 à Fig. 2.3)

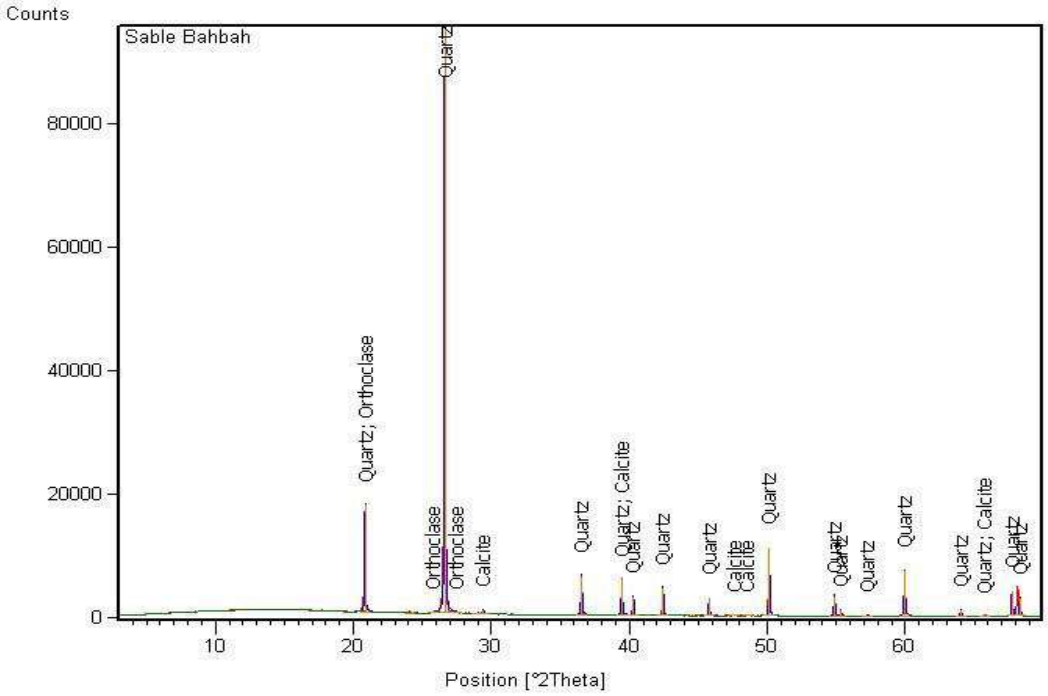


Fig. 2.2. Analyse par DRX de sable de BAHBAH

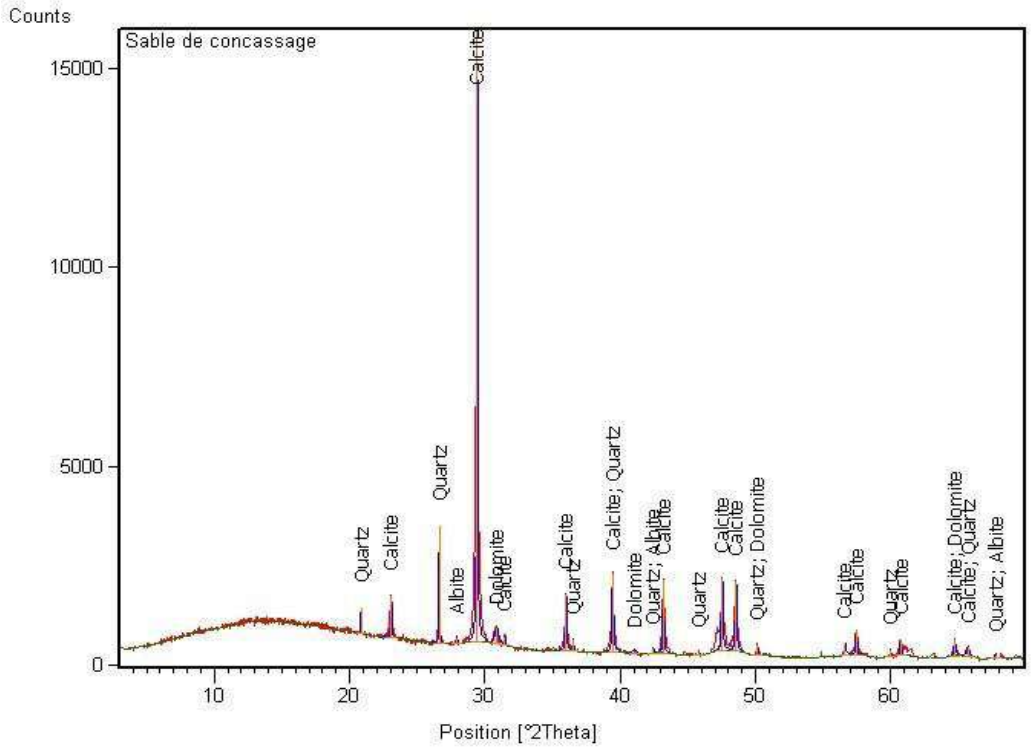


Fig. 2.3. Analyse par DRX de sable de Concassage

2.2.2 Ciment

Il s'agit de ciment de ''MATINE '' CPJ-CEM II/A 42.5, qui a une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa (Fig 2.4), une masse spécifique de 3,1 g/cm^3, et une finesse de 3964 cm^2/g produit par la cimenterie d'Oggaz (Mascara) dont l'ajout est le calcaire. MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3). Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C.

En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physicochimiques conforment à la norme NA 442 [37].



Fig. 2.4 : Ciment MATINE

Le tableau 2.2 résume la composition chimique et le tableau 2.3 représente la composition minéralogique du ciment utilisé. Les caractéristiques physicomécaniques sont représentées dans le tableau 2.4. L'analyse chimique du ciment menée par rayon X met en évidence l'existence des éléments de la composition minéralogique Fig. 2.5.Néanmoins, cette analyse a un aspect qualitatif et non quantitatif. Cette analyse confirme l'existence des C_3S, C_2S, C_3A et C_4AF.

Tableau 2.2. Composition chimique des ciments MATINE

SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	SO3	CaO_{libre}	Cl	R_{inso}	PF
23.83	6.05	4.66	56.35	2.44	0.83	0.58	2.37	0.76	0.035	6.51	2.23

Tableau 2.3. Composition minéralogique des ciments MATINE

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	CaO libre	Gypse	Ajout
59	16	7	12	1	5	17 % calcaire

Tableau 2.4 : Essai physiques sur le ciment MATINE

Essais	**Norme**
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1000
Expansion (mm)	0.50 – 2.50
Début de prise (min)	120 – 180
Fin de prise (min)	210-280

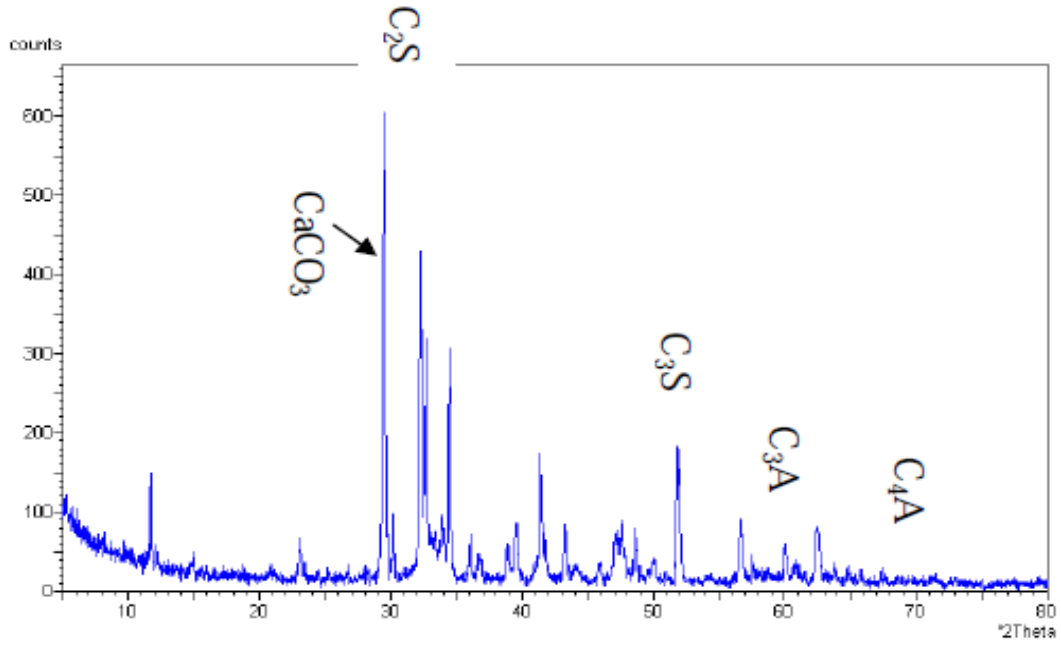


Fig.2.5: Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 MATINE.

2.2.3 Filler calcaire

Les fillers utilisées au court de ce travail sont de nature calcaire. Ils sont obtenus par le broyage de roche calcaire (Fig. 2.6). Leurs caractéristiques physico-chimique sont mentionnées dans le tableau 2.5 et 2.6 respectivement.

Tableau 2.5. Caractéristiques physiques des fillers calcaire utilisées

Caractéristiques	**Valeurs**
Densité apparente (Kg/m^3)	1.14
Densité absolue (Kg/ m^3)	2.66
Surface spécifique du Blaine (Cm^2/g)	2423

Tableau 2.6 : L'analyse chimique des fillers calcaire utilisées

$CaCO_3$	**Fe_2O_3**	**$CaSO_4$**	**SO_3**	**% Insoluble**
97.50	00.74	00.67	00.83	00.59



Fig.2.6: La Roche calcaires broyées

Le difractogramme DRX présenté dans la Figure 2.7, montre que le filler calcaire utilisé contient principalement de la calcite ($CaCO_3$).

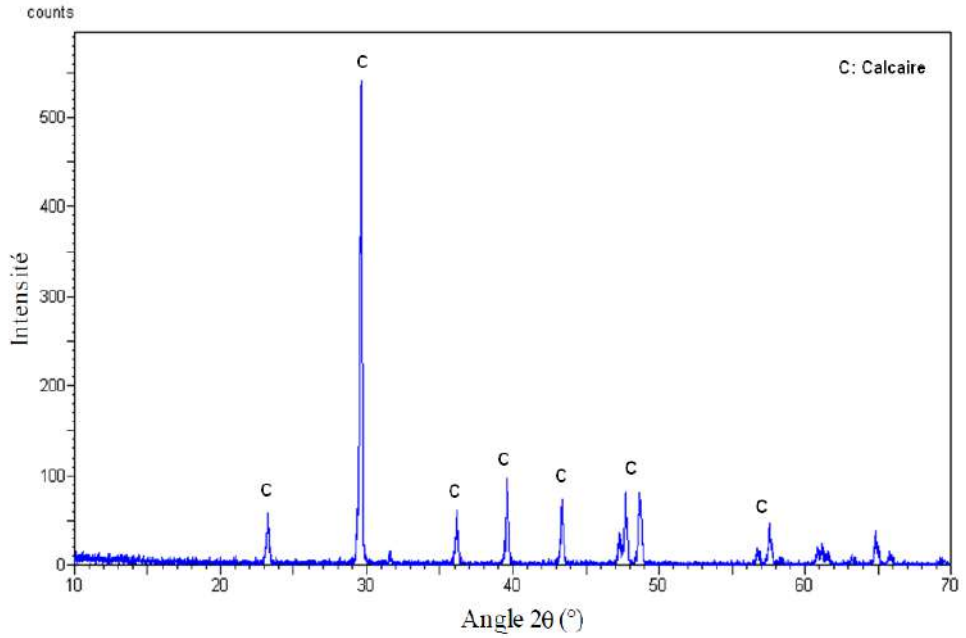


Fig. 2.7. Analyse par DRX du filler calcaire utilisé

2.2.4 Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un plastifiant réducteur d'eau fabriqué par la société Algérienne GRANITEX, commercialisé sous l'appellation MEDAFLUID 104 de forme liquide de couleur marron, d'un PH égal à 6, de densité 1,04 ± 0,01 et d'une teneur en chlore < 1g/L.



Fig.2.8: Le type d'adjuvant utilisé

2.2.5 Eau de gâchage

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

2.2.6 Déchets du Marc de café

Ce sont des déchets recyclés sous forme d'une poudre (Fig. 2.9) légère, leur densité est inférieure à celle de l'eau, obtenus par le recyclage manuel de déchets de café « après leur usage » , après avoir étaient récupérée (triée) ,puis séchés dans le four puis extrudés sous forme de poudre et incorporé dans la masse du béton de sable par substitution volumique du sable avec des pourcentage de 05%,10%,15% et 20%.La granulométrie de cette poudre est représenté dans la figures 2.10, et leurs caractéristiques physiques, et thermiques sont donné dans le tableau 2.7. La Figure 2.9 présenté ci-dessous donne une idée sur l'aspect général et la forme de poudre du Marc de café.



Avant séchage Après séchage

Fig.2.9 Marc de café utilisés

Tableau 2.7. Caractéristiques des déchets de marc de café utilisées

Caractéristiques	Déchets de Marc de café
Module de finesse	2.9
La masse volumique absolue (Kg/m^3)	0.8
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	0.387
La porosité (%)	51.62
La compacité (%)	48.38
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.9
Conductivité thermique (W/m°C)	0.3

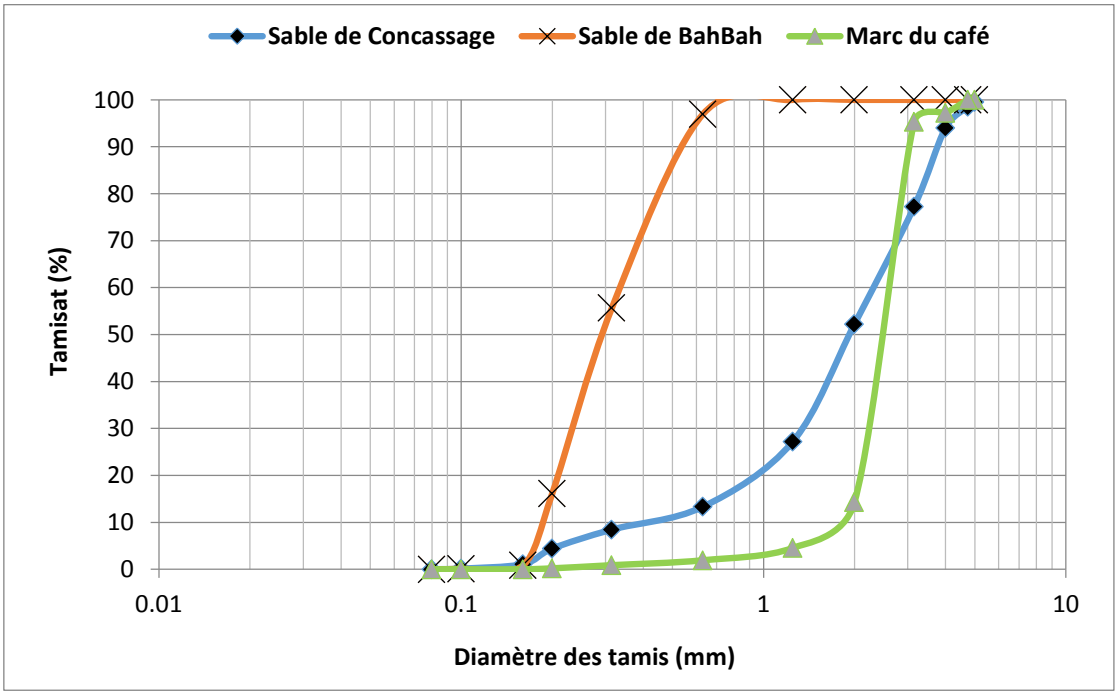


Fig.2.10 L'analyse granulométriques des sables et Marc de café utilisés

2.3 Composition des mélanges

La composition du béton de sable pour la confection des éprouvettes est basée sur la méthode expérimentale de projet de SABLOCRETE 1994 [27]. Le Marc de café est incorporé dans la masse du béton de sable par substitution volumique du sable avec de pourcentage de 05% ,10%,15% et 20%. Les familles du béton de sable obtenus sont répertoriées comme suit:

BSBHT : Béton de sable Bahbah témoin.

BSCNT : Béton de sable Concasse témoin.

BSBH MC : Béton de sable de BAHBAH à base du Marc de café.

BSCN MC : Béton de sable de concassage à base du Marc de café.

La composition de chaque famille du béton est codifiée et mentionné dans le tableau 2.8 suivant :

Tableau 2.8. Composition des mélanges réalisés (pour 1 m³)

Béton de Sable Bahbah					
	BSBHT	**BSBH MC**			
		5%	10%	15%	20%
Sable (Kg/m^3)	1320	1254	1188	1122	1056
Ciment (Kg/m^3)	350				
Fillers calcaire (Kg/m^3)	200				
Déchet MC (Kg/m^3)	0	19.34	38.64	58.02	77.36
Adjuvant (%)*	1	1.3	1.35	1.86	2
Eau (Kg/m^3)	302.5				
Béton de Sable de Concassage					
BSCNT		**BSCNMC**			
		5%	10%	15%	20%
Sable (Kg/m^3)	1560	1537.31	1514.62	1491.94	1469.24
Ciment (Kg/m^3)	350				
Fillers calcaire (Kg/m^3)	140				
Adjuvant (%)*	1%	1.25	1.55	1.9	2
Déchet MC (Kg/m^3)	0	22.69	45.38	68.07	90.76
Eau (Kg/m^3)	252,5				

(* % par rapport à la masse du ciment)

2.4 Malaxage et conservation

Le malaxage des bétons de sable se fait en malaxeur à mortier d'une capacité de 5 L (Fig.2.11). L'introduction des constituants se fait du plus gros au plus fin. Le but recherché est de répartir, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin d'assurer un mélange homogène et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés. Le malaxage de chaque mélange se fait de la manière suivante :

- on verse les gros grains (le sable);
- puis en verse les fines et le ciment;
- on malaxe pendant 2 minutes;
- on verse de l'eau et la moitie de la quantité d'adjuvant et on continue le malaxage pendant 2 minutes;
- on verse le reste de l'adjuvant et on mélange pendant 1 minute.

-L'introduction du Marc de café à été effectué au départ (après l'introduction du sable et avant l'introduction du ciment).



Fig.2.11. Le malaxage des bétons au laboratoire

2.5 Essai réalisé à l'état frais

Juste après chaque malaxage, deux essais sur béton de sable frais ont été réalisés :

Tableau 2.9. Essais sur bétons frais.

	Essais	Appareil	Nombre d'essaie
BSBHT	**Maniabilimètre**	Maniabilimètre Type B	12
BSCNT			
BSBH MC			
BSBH MC			
BSBHT	**Densité**	Moule (1L) + balance	12
BSCNT			
BSBH MC			
BSBH MC			

2.5.1 La maniabilité

Le mniablimétre LCL (B) nous permis d'apprécier la fluidité d'un béton de sable qu'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18 - 452 [37].

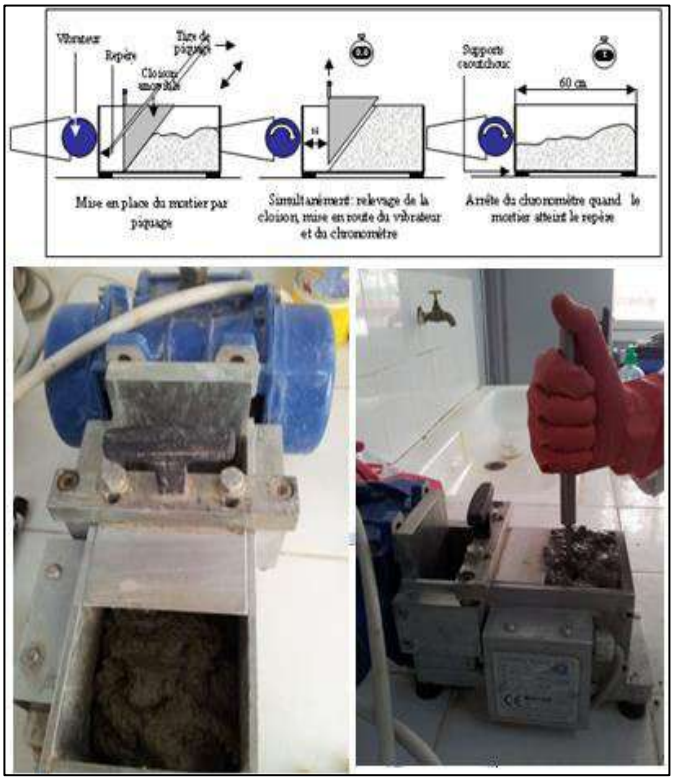


Fig. 2.12: Mesure de la maniabilité du béton de sable

2.5.2 La densité

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 [38] (Fig.2.13).



Fig.2.13 : Mesure de la densité du béton de sable.

2.6 Fabrication et confection des éprouvettes

Les différents types de bétons de sable sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le béton a été coulé dans des moules prismatiques 4x4x16 cm conformément à la norme NF EN 12390-2 [39] (Fig.2.14). Les éprouvettes confectionnées sont au nombre total de 100, et elles ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibration manuelle. Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. 24 heures après la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon deux modes différents : dans l'eau à 20°C ± 2°C et à l'air libre d'un climat moyen (laboratoire)

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



Fig. 2.14 : Fabrication des éprouvettes

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

2.7. Essais sur béton de sable durci

2.7.1 Essais de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] [41] par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm (Fig. 2.19), à l'âge 7, 28 et 90 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN conforme a la norme [NF P 18-412] [42].

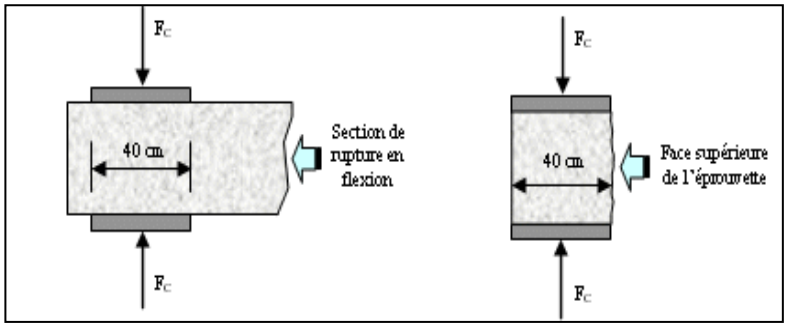


Fig.2.15. Dispositif de rupture à la compression

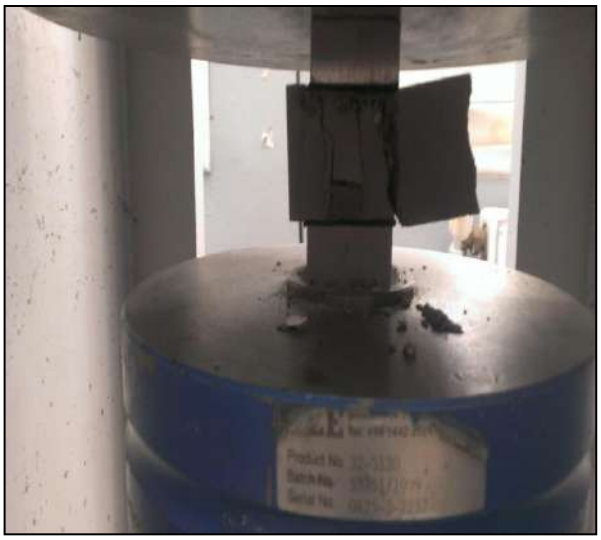
Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la Figure 2.19, la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_C = \frac{F_C}{b^2} \quad \text{..... (Equation 4.7)}$$

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

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





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

Fig.2.16. Essais de compression

2.7.2 La porosité

La porosité, qui par définition représente le taux de présence des pores (vides) dans un matériau, est une caractéristique très importante qui détermine avec une certaine mesure les propriétés mécaniques de ce matériau. Les vides qui sont généralement de différentes formes et de différentes dimensions se repartissent aléatoirement et contribuent à l'hétérogénéité de la matière.

Une porosité élevée est fortement nuisible à la résistance et a la perméabilité d'un matériau de construction en général. La détermination de la structure des pores d'un matériau à l'état durci est basée sur des approches directes ou indirectes.

Dans les méthodes de mesure directe, l'essai microscopique par optique ou par microscopique électronique de scanner est éventuellement complète par une analyse d'image par ordinateur. Mais, la complexité des formes des pores dans la matrice ne facilite pas cette tache.

À la fin de la cure, le demi-prisme d'éprouvette 4x4x16cm sont séchées dans une étuve ventilée à 40 ± 5 °C jusqu'à poids constant ; elles sont ensuite prolongé dans l'eau, jusqu'à poids constant (Fig.4.40).

L'éprouvette est passée ensuite à imbibition sous vide, et après saturation une pesée sous eau (Meau) et une autre dans l'air (Mair) sont réalisées. Ensuite, l'éprouvette est séchée dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à poids constant et à nouveau, une mesure de masse (Msec) est réalisée selon la recommandation l'AFPC-AFREM.

La porosité volumique accessible à l'eau,ε , exprimé en pourcentage en volume, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon\,(\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad \text{..... (Equation 4.8)}$$

ε (%) : La porosité totale

M_{air} : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air

M_{sec} : La masse d'éprouvette sec

M_{eau} : La masse d'éprouvette immergée dans l'eau



Fig.2.17. Mesure de la porosité accessible à l'eau

2.7.3 Résistance au feu

Cet essai consiste à préparé des demis prismes d'éprouvettes $4\times4\times16cm^3$ pour le traitement thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant 6 jours puis étuvées à 105°C pendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle (Fig. 2.22) à différentes températures 200°C, 400°C ,600°C et 800°C avec une vitesse de chauffage égale à 10°C/min (Fig. 2.23) maintenues température constante dans le four pendant une heure conformément à la norme ISO 834 [44]. Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont ensuite refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis

écrasées. Pour chaque température, des mesures de pertes de masse ont été effectuées. Le degré de déshydratation [Perte de masse (%) est évalué par la relation suivante :

$$[\text{Perte de masse } (\%)] = [(M_1-M_2)/M_1)] \times 100 \quad \text{(Equation 4.12)}$$

Avec M_1, M_2 les masses des éprouvettes avant et après chauffage respectivement



Fig.2.18. Echauffement des éprouvettes dans un four à moufle

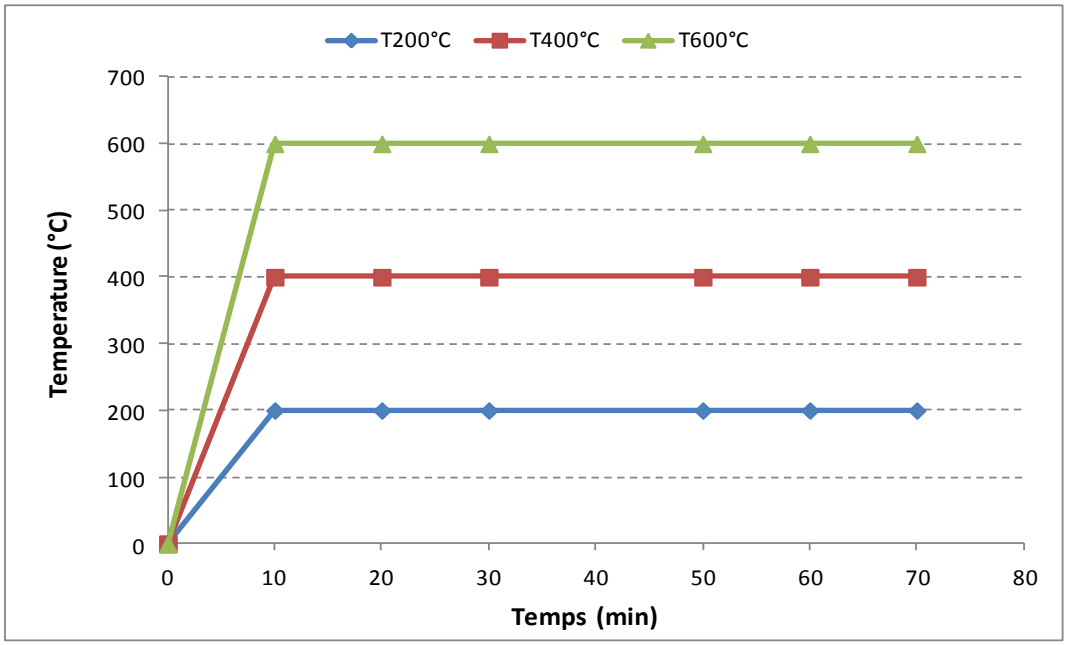


Fig. 2.19. Courbe de chauffage des éprouvettes

2.9 Variables étudiées

Les variables d'étude utilisés au cours de ce travail sont résumés dans la Figure suivante :

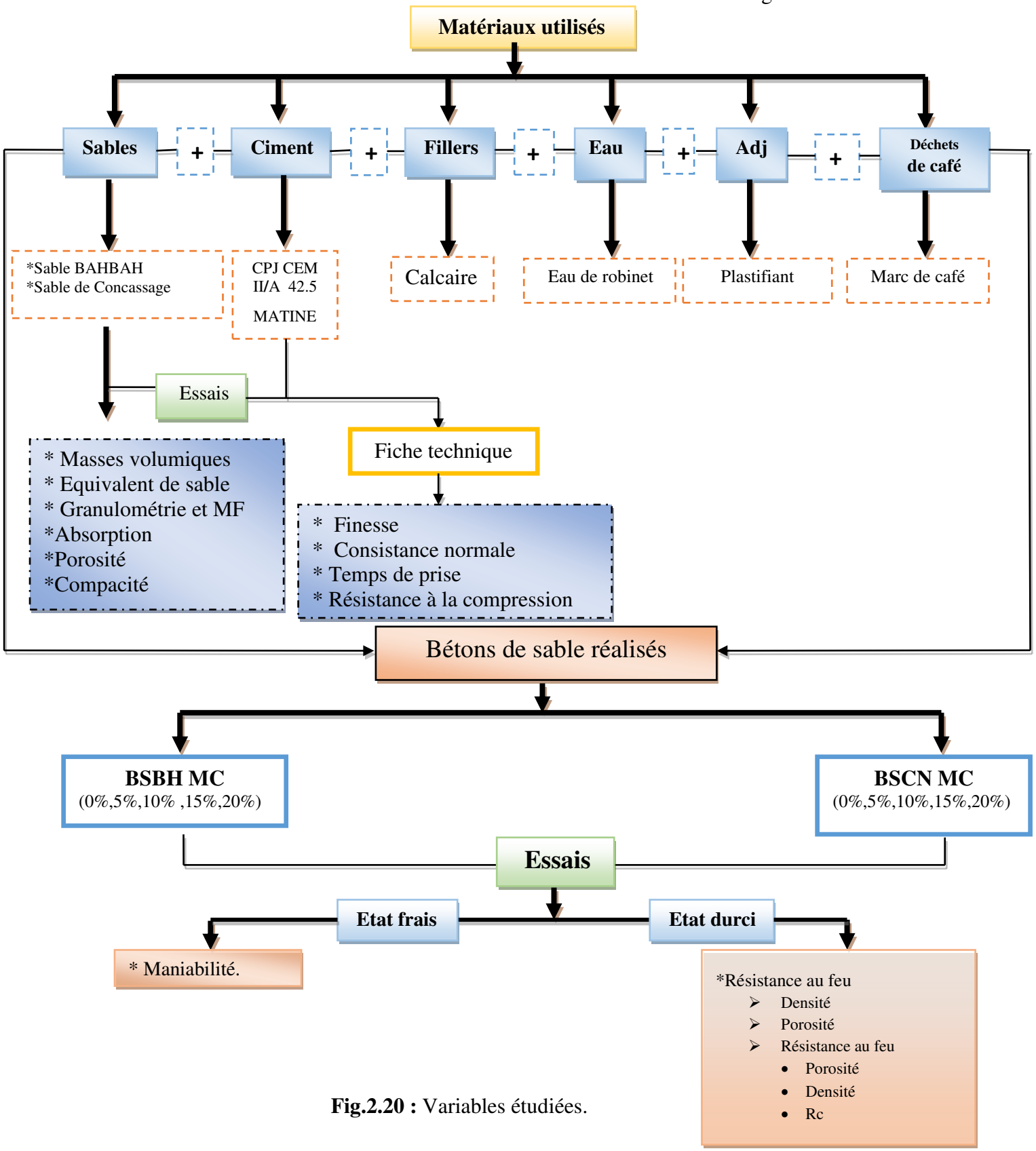


Fig.2.20 : Variables étudiées.

2.8 Conclusion

Les déchets organiques soulèvent actuellement des nombreux problèmes particulièrement difficiles à résoudre. Or leurs réutilisation pourraient résoudre un triple problème : problèmes techniques, économiques et environnementaux. Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet des déchets de café sur les propriétés rhéologique, mécaniques et la durabilité des bétons de sables. Deux types de sables de nature et de morphologie différente, ont été utilisé, il s'agit des sables de dune, et sable concassage.

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

- Caractérisation physico-chimique des matériaux utilisés dans les compositions des BS ;

- La méthode de formulation utilisée, cette méthode appelée méthode expérimentale SABLOCRETE.;

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

Chapitre 03 :

Résultats et Interpétations

3.1 Introduction

Les résultats des différents essais fait sur béton de sable frais et durci sont rassemblés ci -après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

3.2 Béton frais

3.2.1 La Maniabilité

Pendant la confection des éprouvettes, nous avons remarqué que tous les bétons de sable à base du Marc de café (BS MC), sont peut compacts par rapport au béton de sable de référence et présentent une difficulté de mélange en fonction d'augmentation de pourcentage du Marc du café (Fig. 3.1). Ce dernier joue un rôle d'obstacle dans le mélange grâce à sa forme angulaire et aussi à sa forte absorption d'eau l'hors du malaxage ce qui mène à la diminution de la maniabilité. Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [31] dans ce domaine, qui ont trouvé que l'incorporation de déchets de café entraîne une diminution de la maniabilité.

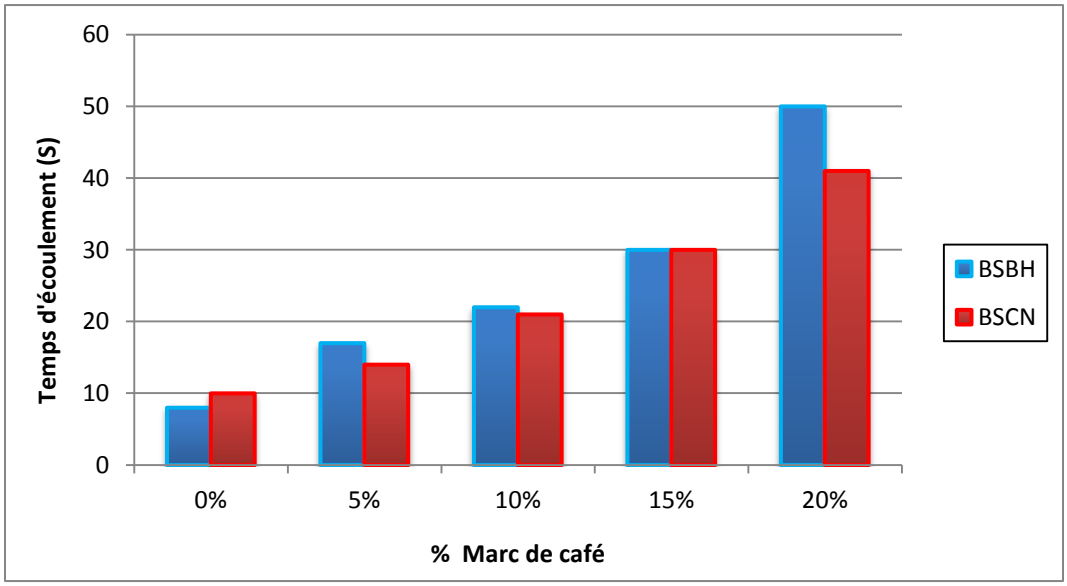


Fig. 3.1 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café

Pour pouvoir comparer les résultats à l'état durci, nous avons varie la quantité d'adjuvant pour tous les types des bétons de sable suivant le cas (voir tableau de formulation chapitre 02) pour avoir une maniabilité constante (temps d'écoulement compris entre 7(s) et 10 (s) (Fig .3.2).

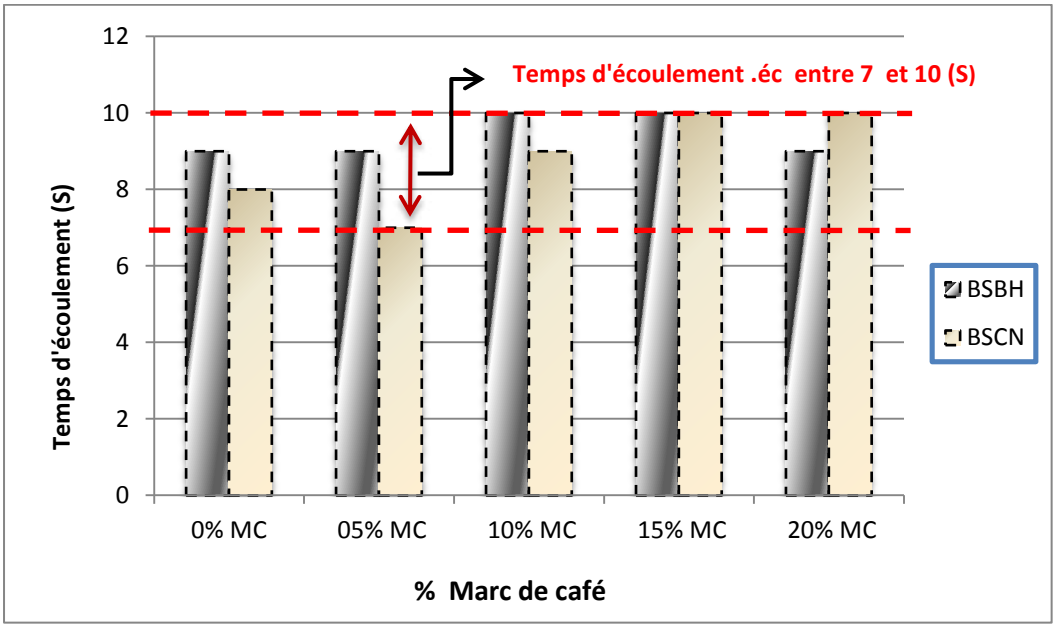


Fig. 3.2 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café après réglage

3.3 Béton durci

3.3.1 La densité

La densité des différents bétons de sable obtenus à l'état durci est résumée dans la figure suivante :

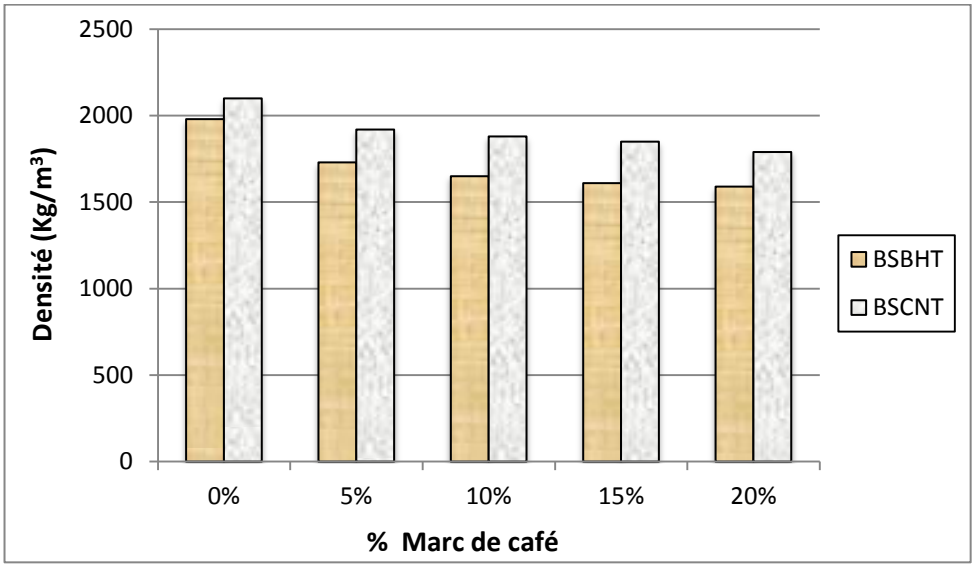


Fig. 3.3 La densité des Bétons de sable à base du Marc de café

Les résultats obtenus montrent que la substitution du sable par le Marc de café influé négativement sur la densité de béton de sable. On remarque aussi que quelque soit le types du sable, la densité est diminué en fonction d'augmentation de MC. La dégression est estimé à 15% pour les BSCN et 20% pour les BSBH. Ce résultat est logique et attendu, parce que la densité du Marc de café est plus faible que celle du sable substitué, et ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [31].Link et al [32] ont aussi trouvé que la densité du béton ordinaire est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets de café incorporés.

3.2.2 La porosité

La porosité des différents mélanges obtenus est résumée dans la figure 3.4 suivantes :

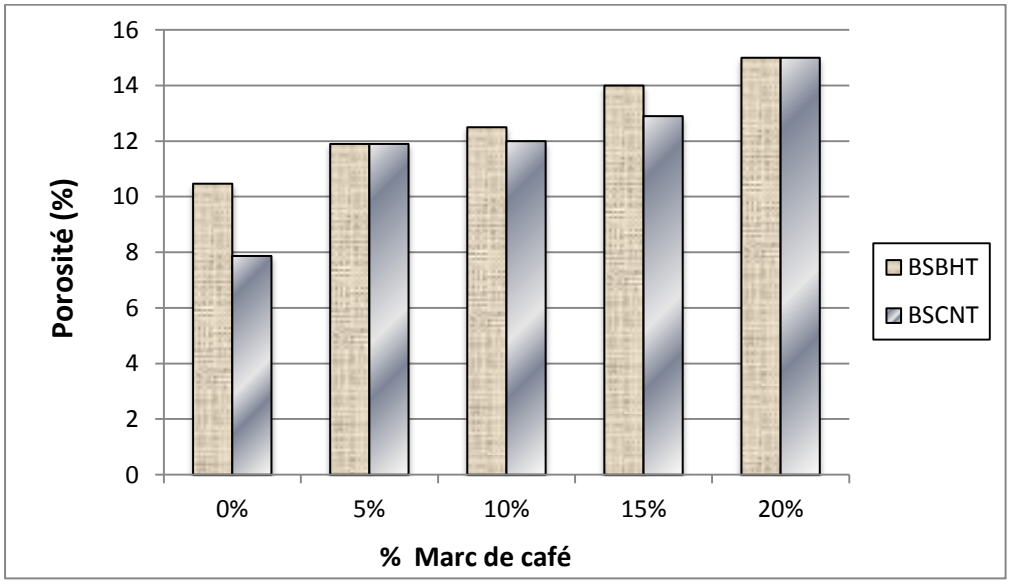


Fig. 3.4 Porosité des bétons de sable à base du Marc de café

D'après les figures ci-dessus on remarque que quelque soit le type de sable la porosité augmente en fonction d'augmentation de pourcentage du marc de café. Les résultats obtenus montrent aussi que la porosité est augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de MC. Cela est dû au défaut d'adhérence entre la matrice cimentaire et le grain du MC. Cette constatation est en accord avec les résultats de plusieurs chercheurs [31.32], qui affirment que l'incorporation des déchets café dans la masse du mortier engendre une augmentation de la porosité. Nous avons trouvé une bonne corrélation (R≈1) entre la porosité et la densité avec une relation polynomiale représenté sur les Figures 3.5 et 3.6.

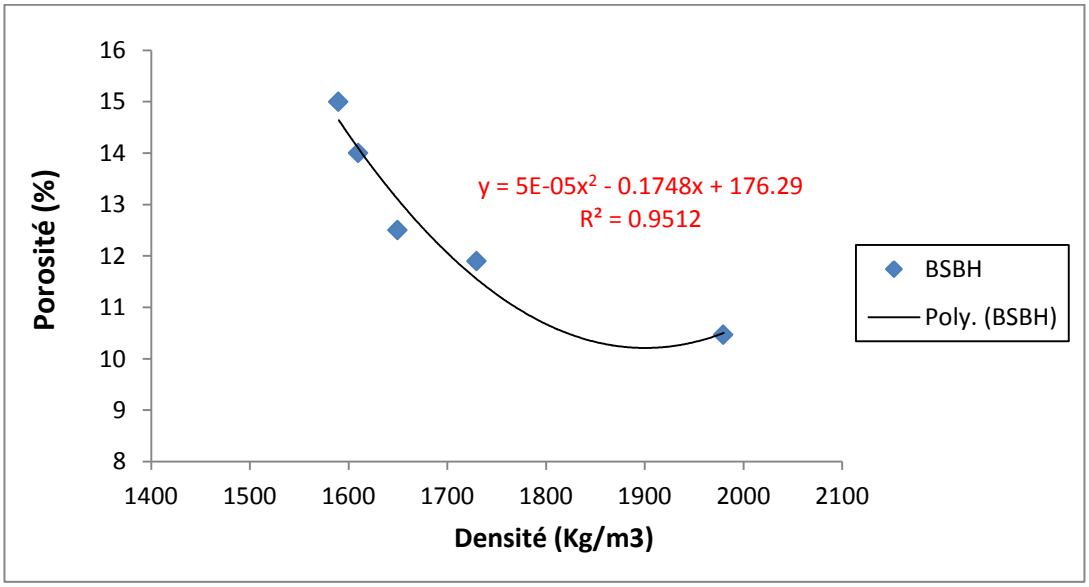


Fig. 3.5. Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSCN MC

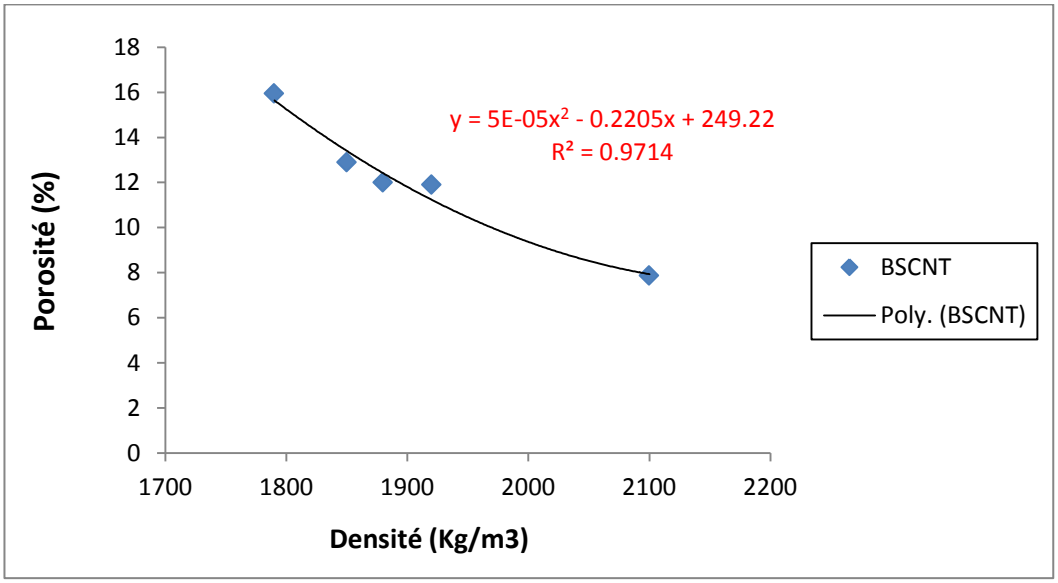


Fig. 3.6 . Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSCN MC

3.3. Résistance au feu

Les résultats des différents essais réalisés sur les BS chauffées à 200, 400 et 600 à l'âge de 28 jours sont représentés ci-dessous.

3.3.1 La porosité

La porosité des différents BS chauffés à 200, 400 et 600 à l'âge de 28 jours sont représentés sur les figures suivantes :

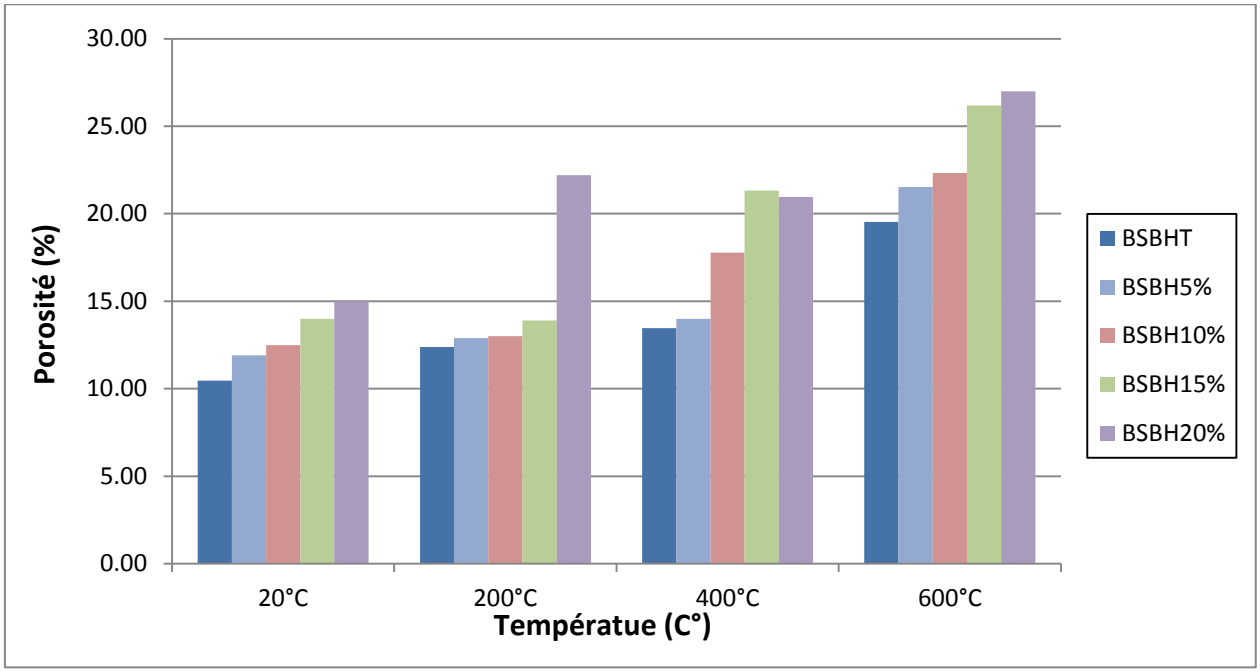


Fig. 3.7 Porosité des bétons de sable à base du Marc de café chauffé à haute température

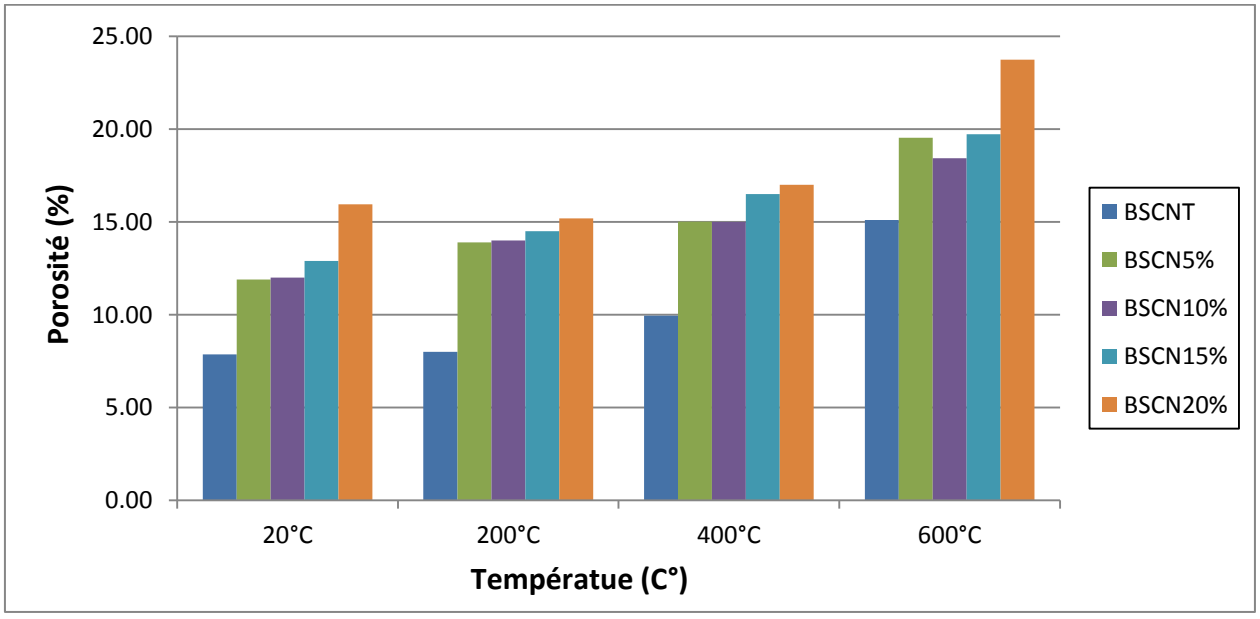


Fig. 3.8 Porosité des bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de température

Les figures précédentes représentent l'évolution de la porosité des différents bétons de sable à base du marc de café en fonction de l'élévation de la température. On remarque d'après ces résultats quel que soit le type du sable utilisé, quelque soit sa nature, la porosité est toujours permanente durant l'échauffement des éprouvettes. On observe aussi que la porosité des bétons de sable à base du Marc de café est toujours plus importante que celle du béton de sable de référence. Ces porosités sont dues à la déshydratation progressive du béton, et la combustion du Marc de café. Jusqu'à la température de 200°C, l'eau libre et une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'étrangéité s'évapore et les pores capillaires sont asséchés. À 600°C il ne reste qu'une petite quantité d'eau 0,2 % dans l'éprouvette de béton, cette eau est absorbée par les granulats et le grain du marc de café. Ce confirme les résultats de d'autres chercheurs [47,48] qui ont constaté que la porosité du béton dans les éprouvettes est toujours augmente avec l'augmentation de la température.

3.3.2 La densité

La densité des différents bétons de sable obtenus chauffés à 200, 400 et 600 à l'âge de 28 jours sont représentés ci-dessous :

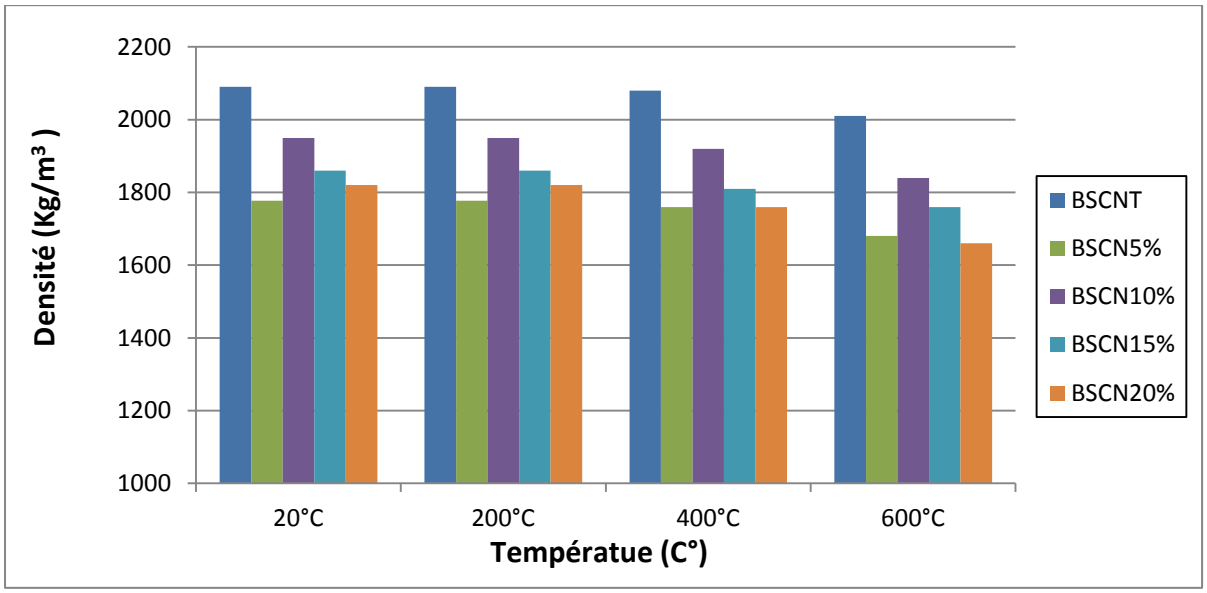


Fig. 3.9 densité des bétons de sable à base du Marc de café chauffé à haute température

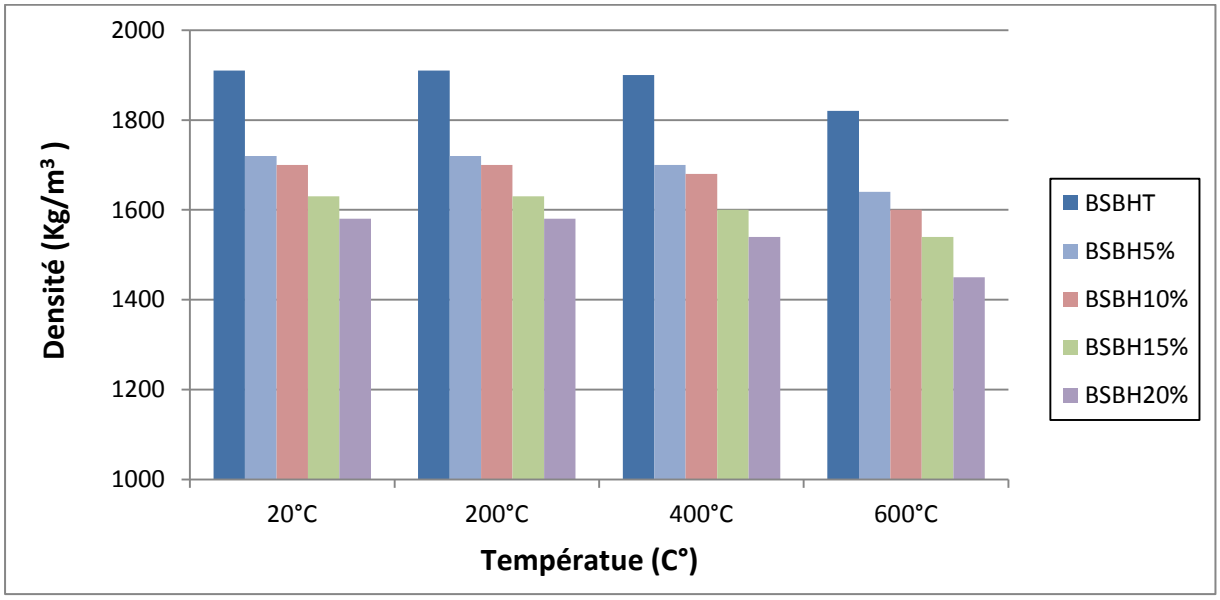


Fig. 3.10 densité des bétons de sable à base du Marc de café chauffé à haute température

Les figures ci-dessous représentent l'évolution de la densité des différents bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de la température. On remarque que quel que soit le type du sable utilisé, quelque soit sa nature, la densité est diminué durant l'échauffement des éprouvettes et surtout sous 400 C° et 600C°. On observe aussi que la densité des bétons de sable à base de Marc du café est toujours plus faible que celle du béton de sable de référence. Ces dégressions sont dues à l'élévation de la porosité induite par le séchage progressive d'eau qui reste chimiquement lié au hydrates et aussi à la perte de masse des différents BS en fonction de l' élévation de température. Ce résultat confirme les résultats de d'autres chercheurs [47,48] qui ont constaté que la masse du béton dans les éprouvettes est toujours diminuée avec l'augmentation de la température.

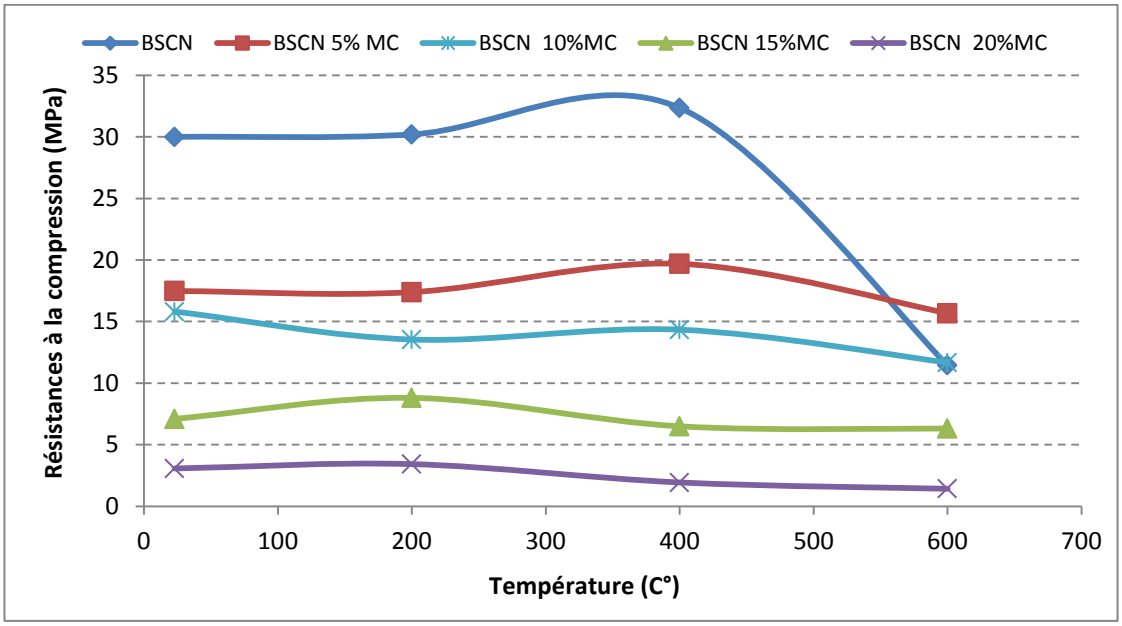


Fig. 3.11. Rc des bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de température

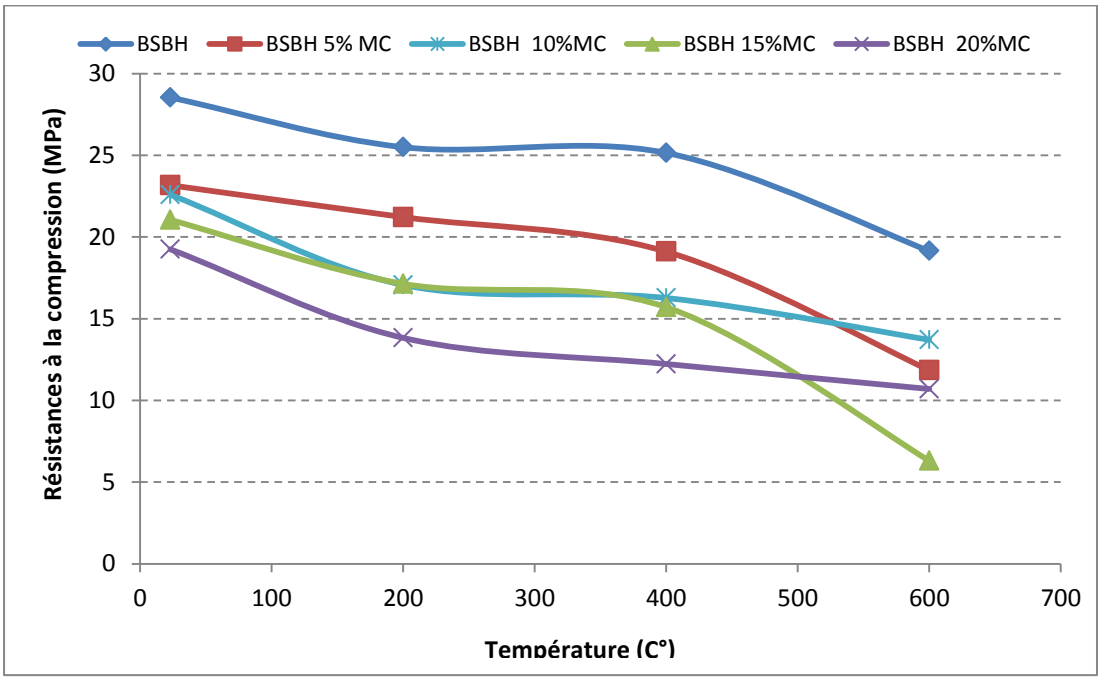


Fig. 3.12. Rc des bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de température

Les figures ci-dessous représentent l'évolution de la résistance à la compression des différents bétons de sable à base du Marc de café en fonction de l'élévation de la température. On enregistre toujours une chute de résistance en fonction de l'élévation de la température quelque soit le type du sable utilisé. Les résultats obtenus montrent aussi que la résistance à la compression des bétons de sable à base du marc de café est nettement moins importante que celle du béton de sable de référence. Cette dégression est liés à l'augmentation de la porosité des différents BS en fonction de l'élévation de la température. Ce résultats confirme les résultats trouvé par plusieurs chercheurs dans le domaine [45,46,47,48].Sur la base de ces résultats on recommande l'utilisation de ces types de bétons pour les éléments moins importance (béton légers ,Panneaux de sandwich, élément préfabriqué de séparation, ouvrage d'art)

3.6 Conclusion

Dans le cadre de cette partie d'étude, l'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- Quelque soit le type du sable utilisé, la maniabilité du BS est diminué en fonction d'augmentation de pourcentage du Marc de café
- La densité du béton de sable est diminuée en fonction de substitution du sable par le Marc du café.
- La porosité du BS augmente en fonction de substitution du sable par le Marc de café.
- Quelque soit le type du sable utilisés et quelque soit sa nature, la porosité est augmenté en fonction de l'élévation de température et de marc de café.
- La densité de tous les bétons de sable diminue en fonction d'échauffement des éprouvettes.
- La résistance à la compression de béton de sable est diminue considérablement en fonction de l'élévation de la température.

Finalement, si on compare les résultats qu'on a trouvés dans cette partie d'étude et quelques résultats trouvés par déférents chercheurs (citées dans la bibliographie) on peut dire qu'il y a une nette concordance entre les deux.

Conslusions générales et Recommandations

Conclusions générales

L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions, car on remarque d'après notre étude que quelque soit le type du sable, la maniabilité du BS est diminué en fonction d'augmentation de pourcentage du Marc de café, aussi la densité du béton de sable diminue en fonction de substitution du sable par le Marc du café.

En ce qui concerne la porosité du BS, on remarque qu'elle augmente en fonction de substitution du sable par le Marc de café et aussi en fonction de l'élévation de température du marc de café.

La densité de tous les bétons de sable diminue en fonction d'échauffement des éprouvettes tel que la résistance à la compression de béton de sable qui diminue considérablement en fonction de l'élévation de la température.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation de marc de café constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays malgré sa faible résistance. L'utilisation de ces types de béton (BS à base de déchets de marc de café) est conseillée pour les différentes voies de construction (panneau sandwich, séparations, éléments préfabriqués …).

Recommandations

Nous recommandons ce qui suit :

- Etude de la rhéologie du béton de sable auto plaçant à base du Marc de café

- Etude de l'effet du mode et du retard de la cure sur les différentes caractéristiques des BSAP à base de déchets de café.

- Etude du pompage de BSAP à base de déchets de Marc de café.

-Influence d'autres types de déchets de construction sur le comportement de BS.

-Influence de fibres (métallique, végétale, de verre, de carbone,….) sur le Béton de sable.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] Debieb F. Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et sulfates. Thèse PhD, Departement génie civil, Université Houari Boumediene Algies ;2007.

[2] PIMIENTA. P & REMOND. ‘‘Bétons de déchets : prévenir les risques’’, CSTB magazine, n° 109, novembre 1997, pp. 28-30

[3] SPERANDIO K : identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en oeuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.

[4] Courard L., ‘*Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil*’, Notes de cours (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998), 195 p.

[5]Politique de gestion de déchets en Algérie : http://maghrebemergent.info/politiques-publiques/algerie/l-algerie-veut-recycler-40-de-ses-dechets-en-2016.html

[6] Caractérisation de la longévité des briques brutes et très bien écrasées réutilisées d'employer de bétons et des agrégats, des matériaux et du RILEM concrets (2011).
http ://www.rilem.net/ms.php.

[7] Propriétés mécaniques et de longévité des agrégats réutilisés souillés employant béton.Ciment et composé concret, 32(2010) 421-426.Elsevier, la science directe.

[8] Quebaud M., ‘Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats’, Thèse de doctorat, Université d’Artois, France, décembre 1996.

[9] Francky carassou , une récupération spécifique du marc de café aurait-elle une plus-value pour la communauté? Cas de l’île de montréal, université de sherbrooke .2015.

[10] Zamora, A.J., Pastoriza, S. et Henares, J.A.R (2015) Revalorization of coffee by-products. Prebiotic, antimicrobialand antioxidant properties. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 61, p. 12-18. www.elsevier.com/locate/lwt (Page consultée le 12 juin 2015)

[11] Gomez-de la Cruz, F.J.,Cruz-Peragon, F., Casanova-Pelaez, P.J. et Palomar-Carnicero, J.M. (2015) A vital stage in the large-scale production of biofuels from spent coffee grounds: The drying kinetics. *Fuel Processing Technology*, vol. 130, p. 188-196. www.elsevier.com/ locate/fuproc (Page consultée le 6 juin 2015).

[12] Cruz, R., Cardoso, M.M., Fernandes, L. et Oliveira, M.. (2009). Espresso Coffee Residues: A Valuable Source of Unextracted Compounds. *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 60, p. 7777-7784. . http://pubs.acs.org/journal/jafcau (Page consultée le 6 juin 2015).

[13] Chen, K.I., Lo, Y.C., Liu, C.W., Chou,C.C. et Cheng, K.C. (2013) Enrichment of two isoflavone aglycones in black soymilk by using spent coffee grounds as an immobiliser for b-glucosidase. *Food Chemistry*, vol. 139, p. 79-85. www.elsevier.com/locate/foodchem (Page consultée le 12 juin 2015).

[14] Ballesteros, L.F., Teixeira, J.A et Mussatto, S.I. (2010) Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food Bioprocess Technol*, vol. 7, p. 3493-3503.

[15] Shen, K. et Gondal, M.A. (2013) Removal of hazardous Rhodamine dye from water by adsorption onto exhausted coffee ground. *Journal of Saudi Chemical Society*. www.sciencedirect.com (Page consultée le 12 juin 2015).

[16] Silva, M.A., Nebra, S.A., Machado, M.J.M et Sanchez, C.G. (2012) The use of biomass residues in the brazilian soluble coffee industry. *Biomass and bioenergy*, vol. 14, p. 457-467. http://www.journals.elsevier.com/biomass-and-bioenergy/(Page consultée le 6 juin 2015).

[17] Limousy, L., Jeguirim, M., Dutournié, P., Kraiem, N., Lajili, M et Said, R. (2013) Gaseous products and particulate matter emissions of biomass residential boiler fired with spent coffee grounds pellets. *Fuel*, vol. 107, p. 323-329. www.elsevier.com/locate/fuel (Page consultée le 12 juin 2015).

[18] Zuorro,A. et Lavecchia, R.(2012) Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy. *Journal of Cleaner Production*, vol. 34, p. 49-56. www.elsevier.com/ locate/jlcepro (Page consultée le 6 juin 2015).

[19] Mussatto, S.I., Carneiro, L.M., Silva, J.P.A, Roberto, I.C. et Teixeira, J.A. (2011a). A study on chemical constituents and sugars extraction from spent coffee grounds. *Carbohydrate Polymers*, vol. 83. www.elsevier.com/locate/carbpol (Page consultée le 6 juin 2015).

[20] Bravo, J., Monente, C., Juaniz, I. et De Pena, M.P. (2013) Influence of extraction process on antioxidant capacity of spent coffee. *Food Research International*, vol. 50, p. 610-616. www.elsevier.com/ locate/foodres (Page consultée le 6 juin 2015).

[21] Belviso, S., Ghirardello, D., Rantsiou, K., Giordanoa, M., Bertolino, M., Borgogna, D., Cavallero, M.C., Dal Bello, B., Cena, C., Rolle, L., Zeppa, G. et Gerbi, V. (2014) Phytochemical and microbiological stability of spent espresso coffeegrounds in capsules. *Food Research International*, vol. 148, p. 294-299. www.elsevier.com/locate/foodres (Page consultée le 12 juin 2015).

[22] Kwon, E.E., Yi, H. et Jeon, Y.J. (2013) Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Food Research International*, vol. 136, p. 475-480. www.elsevier.com/locate/biortech (Page consultée le 12 juin 2015)

[23] Vardon, D.R., Moser, B.R., Zheng, W., Witkin, K., Evangelista, R.L., Strathmann, T.J., Rajagopalan, K. et Sharma, B.K. (2013). Complete Utilization of Spent Coffee Grounds To Produce Biodiesel, Bio-Oil, and Biochar. *In* ACS Sustainable Chemistry and. Engineering. *ACS Publications*. http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/sc400145w (Page consultée le 7 juin 2012).

[24] CNERIB, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment, " Bétons de Sable ", Rapport de recherches. Tipaza, Algérie, Décembre 1992.

[39] Desert-Map, 2012 Carte des déserts du monde, téléchargeable du site Internet: http://fr.mapsofworld.com/world-desert-map.htm#

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

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

[28]Sandrine Catinard, « Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines ».Thèse (P.H.D), Université LAVAL (Québec) CANADA (2000).

[29]Yanéric Roussel, « Béton autoplaçant avec fibres comme matériau de réparation du béton » Mémoire de maîtrise ès science appliquées, Université Sherbrooke (Québec) CANADA (2000).

[30] Chanvillard G. et Basuyaux O., "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées", Bulletin de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris, 205 (1996): 49-63.

[31] Lee-Kuo Lin ,Tsung-Min Kuo , Yi-Shu Hsu (2015), The application and evaluation research of coffee residue ash into mortar, J Mater Cycles Waste Manag.

[32]. Lin LK, Yu SI (2010) The possibility research of applying coffee residue into concrete material. J Taiwan Environ Eng Assoc 21(2):1–14

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

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

[35] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

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

[37] NF P 18- 452, Normes AFNOR : « Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètre », Mai 1988.

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

[40] NF EN 12390-2, 2001, « *Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes* », AFNOR.

[41]CEN EN 196-1, Normes AFNOR : « *Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15- 471)* », Aout 1995.

[42 Norme Francaise, NF P 18-412 « *Béton : Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs*», Norme enregistrée, Déc. 1981.

[43] 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.

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

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

[46] Mehta, P.K., 1989. Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – another look. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Proceedings of Third International Conference, ACI SP-114, Trondheim, Norway, vol. 1, pp. 1–43.

[47] Kameche , Z.E. 2008 « *Effets de la température sur le comportement du béton : cas des revetements des tunnels routiers* » Mémoire de Magister de l'ENSET d'Oran .

[48] O.Arioz, Effects of elevated temperature on properties of concrete, Fire Safety J.42, 2007, 516 – 522.

Annex

ANNEX A

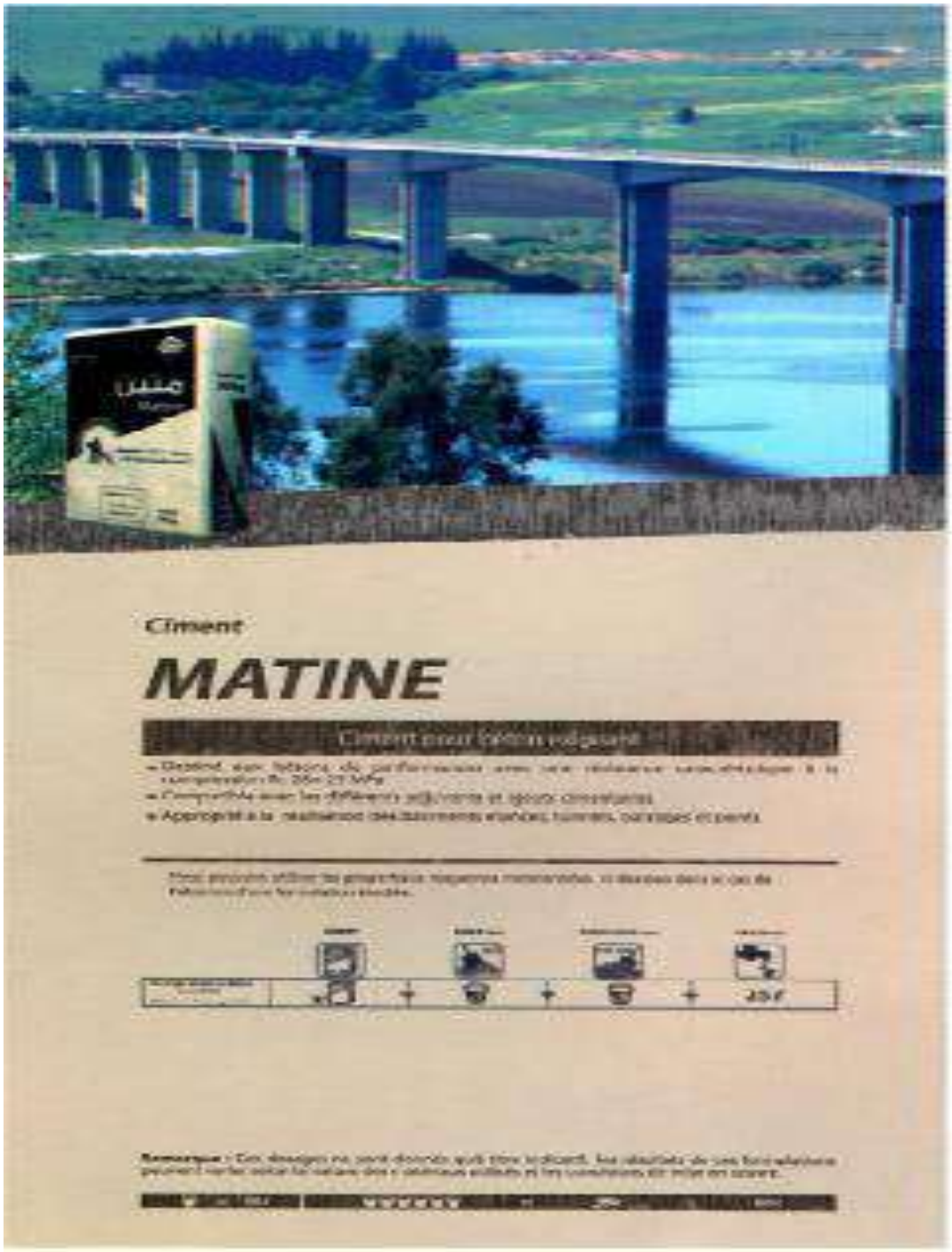


Fig.A 1. Ciment MATINE

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42,5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

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

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

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

Domaine d'utilisation :

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

Les principales applications de ce ciment sont :

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

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

Fig.A 2. La fiche technique ciment.



Fig.A.3 . Tamiseuse électrique



Fig. A.4 . Malaxeur



Fig.A.5 . Essais d'équivalent de sable



Fig.A.6 . Séchage a l'étuve de calcaire



Fig. A.7.broyage par broyeur



Fig .A.8 . Essais de la maniabilité.



Fig. A.9. Eprouvettes chauffées dans différents température.



Fig. A.10. Echauffement des éprouvettes