UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté des **S**ciences et de la **T**echnologie

Département génie de la matière

Filière Génie civil

Projet de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master LMD

Spécialité : Génie Civil

Option : Construction et matériaux

Le Béton de sable à base du Marc de café

Par

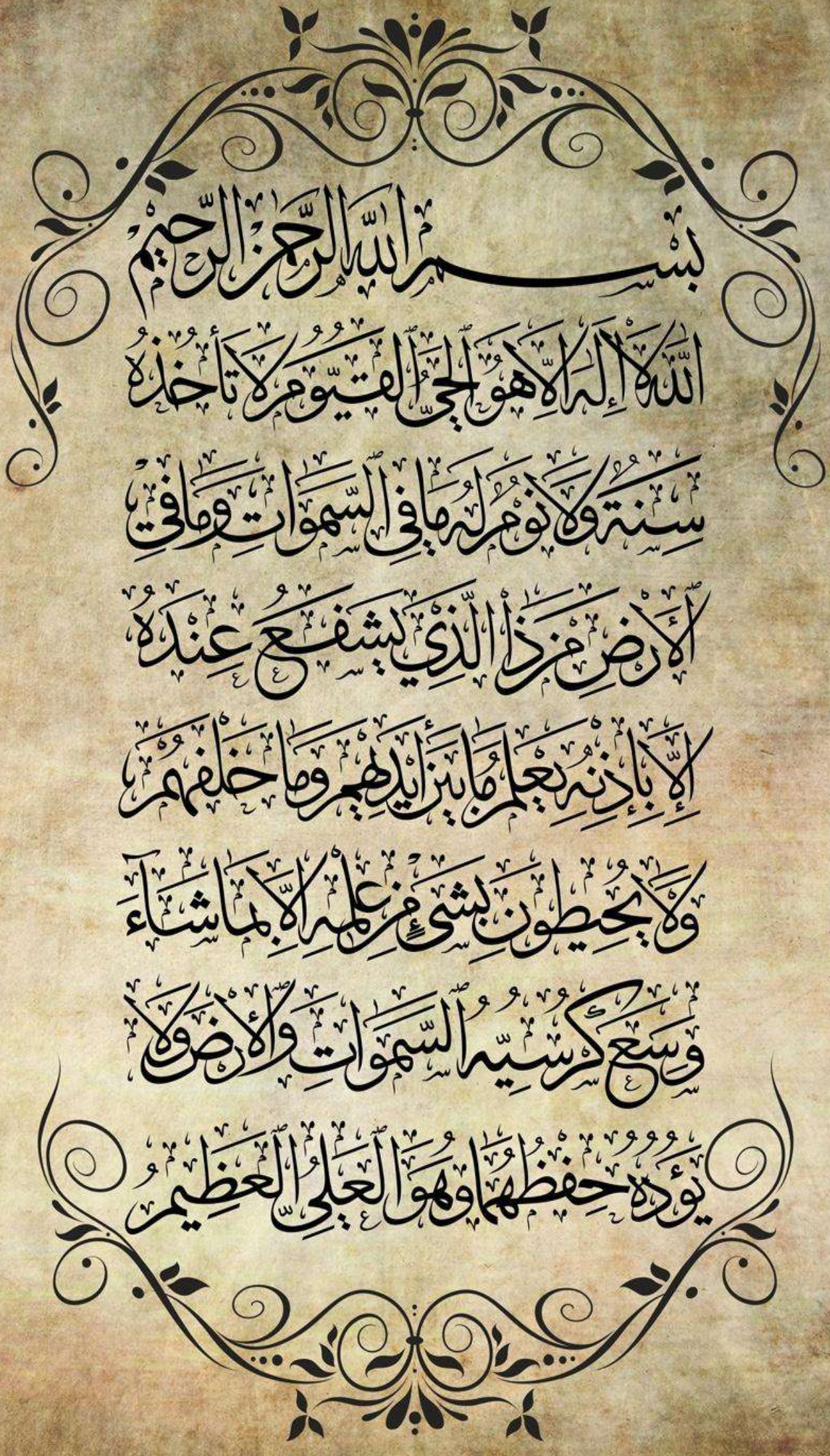
Boukerma Tarek & Mechentel Abdellah

Devant le jury composé de :

Pr. Debieb Farid	**Professeur**	**Univ. de Médéa**	**Président**
Mr. Guendouz Mohamed	**Doctorant**	**Univ. de Médéa**	**Rapporteur**
Mr. Ben Yamina Ismail	**MAA**	**Univ. de Khemis Meliana**	**Co-rapporteur**
M^{elle}.Heriheri Widad	**MAA**	**Univ. de Médéa**	**Examinatrice**

juin 2016


بسم الله الرحمن الرحيم


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

Remerciement

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

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de prés 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 tiens à remercier :

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

Nous sommes grées au Professeur ***Debieb Farid****, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury de ma thèse. Mademoiselle* ***Heriheri Widad****, Maitre assistante à l'université de Médéa, ont accepté de juger et d'être les examinateurs de cette thèse.*

Je leur exprime ma 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 etdisponibilités.

Mes 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.

ABDELLAH /TAREK

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

C’est avce trés grand honeur que je dédie ce modeste travail à :

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

Pour terminer ce travail .

Voici ma mére écrit beaux mots et expressions et formulé la meilllure à la veille s’il vous plait briser stylos et les pleurer pour son incapacité à concervoir votre droite.

Voici mon pére chaque goutte de seurer est venu à vous et votre peine sur les paumes de mon éducation et a toujours tendu une main secourable à moi à tout moment et faire pas des phrase exprime l’tendue de mon amour et de gratitude.

A mes grande parents que je la souhaite une longue vie.

A ma chère sœur SAMIHA, qui toujour tendu une main secourable à moi tout temps et nos frérs dans le champs de fleur et des sourires pour toutes les saisons et aveugle sur le sens de la vie est belle je vous sohaite beaucoup de succés dans votr vie,et votre marie SLIMANE .

A ma chère sœur KHADIDJA ,qui se réjouit mon cœur toujour frais et j’espére que ses paroles d’ALAH tout puissant qui le protège et l’aider dans ses études.

A mon chère frère HOUCIN ,qui m’a toujours en seigné qu la vie est belle et la substance beau sourire et qui ne laisse pas de votre visage et j’espére ètre toujours le meilleur.

A toute la famille « BOUKERMA »Sans exception.

Je remercie mon ami et collège dans ce travail, ABDOU qui a contribué à la réalisation de ce Modeste travail et à toute son famille.

A mes amies : kader, othman, abd nour, walid, younes, ,leila ,nousaiba kouathar , ……. et tous mes amis qui on partagé avec moi Les bonnes et les mauvais moments à l’université.

A tous mes collègues de 2éme années Master génie civil « Matériaux de construction, Géotechnique, Structure ».

Enfin ; Je dédie : A tous ceux que j’aime et qui m’aiment.

Tarek

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

C’est avce trés grand honeur que je dédie ce modeste travail à :

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

Pour terminer ce travail .

Voici ma mére écrit beaux mots et expressions et formulé la meilllure à la veille s’il vous plait briser stylos et les pleurer pour son incapacité à concervoir votre droite.

Voici mon pére chaque goutte de seurer est venu à vous et votre peine sur les paumes de mon éducation et a toujours tendu une main secourable à moi à tout moment et faire pas des phrase exprime l’tendue de mon amour et de gratitude.

A mes grande parents que je la souhaite une longue vie.

A ma chère sœurs fatima elzohra , qui toujour tendu une main secourable à moi tout temps et nos frérs dans le champs de fleur et des sourires pour toutes les saisons et aveugle sur le sens de la vie est belle je vous sohaite beaucoup de succés dans votr vie .

A mes chèree sœurs sarah amina safia ,qui se réjouit mon cœur toujour frais et j’espére que ses paroles d’ALAH tout puissant qui le protège et l’aider dans ses études.

A mon chère frère islem ,qui m’a toujours en seigné qu la vie est belle et la substance beau sourire et qui ne laisse pas de votre visage et j’espére ètre toujours le meilleur.

A toute la famille « BOUKERMA »Sans exception.

Je remercie mon ami et collège dans ce travail, tarek qui a contribué à la réalisation de ce Modeste travail et à toute son famille.

A mes amies : kader, othman, abd nour, walid, abdellkader, ,leila ,nousaiba kouathar , ……. et tous mes amis qui on partagé avec moi Les bonnes et les mauvais moments à l’université.

A tous mes collègues de 2éme années Master génie civil « Matériaux de construction, Géotechnique, Structure ».

Enfin ; Je dédie : A tous ceux que j’aime et qui m’aiment.

Abdellah

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين و رسكلة نفايات القهوة.ولهذا تم دمج هذه النفايات بشكل حجمي في كتلة الخرسانة الرملية بنسب مختلفة (5٪، 10٪، 15٪ و 20٪) و دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة.

وقد أظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية انخفضت بزيادة نسبة نفايات القهوة.في حين أن استبدال 15٪ و 20٪ من الرمل بنفايات القهوة قد أدى إلى تحسين خصائصها الحرارية. لذلك فمن الممكن استخدام هذه النفايات الحصول على مادة عازلة،التي تسمح باستخدامها في أنواع مختلفة عناصر البناء.

الكلمات المفتاحية: النفايات. القهوة. الخرسانة الرملية. خصائص

Résumé

L'objectif principal de ce projet consiste à valoriser et recycler les déchets de café plus précisément le Marc du café et incorporé dans la masse du béton de sable par substituions volumétrique du sable en différents pourcentage (5%,10%,15% et 20%). Les propriétés à l'état frais et à l'état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux bétons de sable témoin respectifs.

Les résultats obtenus montrent que la performance mécanique du béton de sable est diminuée en fonction d'augmentation de pourcentage du Marc de café. Cependant, les caractéristiques thermiques sont améliorées et surtout pour une substitution de 15% et 20%.Donc, il est possible d'obtenir un matériau isolant utilisable pour différents types d'éléments de construction**.**

Mots clés : Déchets ; Marc de café ; Béton de sable ; propriétés.

Abstract

The main objective of this project is to value and to recycle the coffee waste more precisely the coffee grounds and built in the mass of the sand concrete by substituted volumetric sand into different percentage (5%, 10%, 15% and 20%).The properties in a fresh and a hardened state of the various sand concretes carried out were analyzed and compared with pilot sand concretes the respective.

The results obtained show that the mechanical performance of the sand concrete is decreased according to increase in percentage of the Coffee grounds. However, the thermal characteristics are improved and especially for a substitution of 15% and 20%.So, it is possible to obtain an insulating material which allows a use in the various types of structural components.

Key words: Waste; Coffee grounds; Sand concrete; properties.

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

1.1.2.2 Les déchets 05

1.1.2.3 Constitution chimique du déchet 06

1.1.2.4 Les types de déchets 06

1.1.2.5 Différents déchets utilisés en génie civil 08

1.1.3 Activité du recyclage des déchets en construction..... 11

1.1.3.1 Recyclage des déchets 11

1.1.3.2 Technique de recyclage…….....12

1.1.3.3 Type de recyclage 13

1.1.3.4 Impacts du recyclage sur l'environnement 14

1.2 Le Marc de café……..…….....14

1.2.1 Définition 14

1.2.2 Historique 15

1.2.3 Composition du marc de café.……16

1.2.4 Propriété du marc de café…….....17

1.2.4.1 Propriétés physiques du marc de café…….....17
1.2.4.2 Propriétés chimiques du marc de café…….....19
1.2.4.3 Propriétés bioactives du marc de café……..…....21
1.2.5 Les utilisations possibles de marc de café……..…….22
1.2.6.1 Écotoxicité……27
1.2.6.2 Diminution des pressions sur les ressources naturelles……...…27
1.2.6.3 Alternative au plastique……...…28
1.2.6.4 Traitement des eaux…….28
1.2.7 Impacts économiques de la récupération de la marc de café et de sa mise en valeur…….29
1.2.8 Impacts sociaux de la récupération de la marc de café et de sa mise en valeur…….30
1.2.8.1 Création d'emploi……..……..30
1.2.8.2 Développement de marque de local……..……..30
1.2.8.3 Santé ……..……...30
1.2.8.4 Image de marque…….…….31

1.3 Béton de sable……...……31
1.3.1 Introduction……...…31
1.3.2 Définition ……...…32
1.3.3 Spécificité du béton de sable…….……...….33
1.3.4 Historique du béton de sable……..…..….33
1.3.5 Les composant du béton de sable……..…..36
1.3.5.1 Les sables……..…….…… ……36
1.3.5.2 Les fines d'ajout…….…….....37
1.3.5.3 Les ciment……...…….…….……...41
1.3.5.4 Adjuvant……..…….…….…...41
1.3.5.5 Eau……...…….……...41
1.3.5.6 Autres ajouts……..……..42
1.3.6 Propriétés essentielles du béton de sable……..……..42
1.3.6.1 Propriété général……..……..…….…….42
1.3.6.2 Propriété spécifique…….……..…….....47
1.3.7 Domaine d'emploi des bétons de sable...……...55
1.3.7.1 Fondation profondes…….....55
1.3.7.2 bâtiment...…….....……..55
1.3.7.3 La préfabrication ……..…..…..……56

1.3.7.4 Routes, chaussé et dallage……..……..57
1.3.7.5 Autres application……...…….....…….58
1.3.7.6 Techniques particulières……..59
1.3.7.6.1 Béton de sable projeté ……59
1.3.7.6.2 Béton de sable fluides…….....60
1.3.8 Intérêts et limites de béton de sable……62
1.3.8.1 Intérêts des béton de sable.……..62
1.3.8.2. Limite des bétons de sable……...……...62
1.3.9 Méthodes de formulation de bétons de sable……..63
1.3.9.1 Approche théorique de la formulation des béton de sable ……..63
1.3.9.2 Méthode expérimentale de formulation……...……71
1.3.9.2.1 Les déférentes étapes de la formulation……...…71
1.4Valorisation des déchets de café dans les matériaux a base cimentaire…...……...75
1.4.1 Influence de déchet de café sur les propriétés des matériaux cimentaire.……..75
1.4.1.1 États frais……75
1.5 Conclusion…….……77

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET ESSAIS

2.1. Introduction…….……....79
2.2 Matériaux utilisés ……...….80
2.2.1 Les sables……....80
2.2.2 Ciment ……...…….....83
2.2.3 Fillers calcaire……..…….....…….....85
2.2.4 Adjuvant…….....…….....86
2.2.5 Eau……...…….…….87
2.2.6 Déchets du marc de café……..……...87
2.3 Composition des mélanges ……..…....……...88
2.4 Malaxage et conservation……...…..……...90
2.5. Essais réalisés à l'état frais.…….....91
2.5.1 La maniabilité……...……..91
2.5 La densité……...……...…….92
2.6 Fabrication et confection des éprouvettes ……..…….……...92

2.7. Essais sur béton de sable durci……..……..……..…..94
2.7.1 Essais de traction par flexion ……..……..……94
2.7.2 Essais de compression……..……..……..……..96
2.7.3 Propriétés thermique……..……..……..……..……97
2.8. Essais sur l'approche de durabilité……..……..…..……..99
2.9. Variable étudiées ……..…..…..…..…103
2.10 Conclusion……..……..…..…..…….104

CHAPITRE 03: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

3.1 Introduction 106

3.2 Béton frais 106
3.2.1 La Maniabilité 106
3.2.2 La densité 107

3.3 Béton durci 108
3.3.1 Résistances à la compression 108
3.3.2 Résistances à la traction 113

3.4 Approche de durabilité 116
3.4.1 L'absorption capillaire……..……..……..….116
3.4.2 Mesure des variations de longueur ……..……...117
a) Retrait……..……..……..….117
b) Gonflement…….....119
3.4.3 Mesure des variations de masse ……..……..……...120
a) Perte de masse ……..……..……120
b) Gain de masse……..…….122

3.5 Propriétés thermique……..…123
3.5.1 La conductivité thermique……123
3.5.2 La chaleur spécifique……..……..……..126
3.5.3 La diffusion thermique……..127

3.6 Conclusion……..……..……..130

Conclusions générale et recommandations……...…….....…....…132

Références bibliographiques…….…….....…..…….136

Annexe…….....…….145

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Quantités de déchets industriels produits : évolution 2008……11
Tableau 1.2 Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité……..18
Tableau 1.3 Le pouvoir calorifique de divers résidus de biomasse……19
Tableau 1.4 Composition élémentaire du marc de café……..19
Tableau 1.5 Les principaux composés du marc de café……..19
Tableau 1.6 Composition des principaux minéraux du marc de café……..21
Tableau 1.7 Activité radicalaire du marc de café……21
Tableau 1.8 Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment……...38
Tableau 2.1 Caractéristiques physiques des sables utilisés……81
Tableau 2.2 Composition chimique des ciments MATINE……84
Tableau 2.3 Composition minéralogique des ciments MATINE……84
Tableau 2.4 Essai physiques sur le ciment MATINE…….……..…...84
Tableau 2.5 Caractéristiques physiques des fillers calcaire utilisées……...……..….85
Tableau 2.6 L'analyse chimique des fillers calcaire utilisées…….85
Tableau 2.7 Caractéristiques des déchets de caoutchouc utilisées……..88
Tableau 2.8 Composition des mélanges réalisé (pour 1 m³)……...……89
Tableau 2.9 Essais sur bétons frais…….…….…....91
Tableau 2.10 Essais sur bétons de sable durci…….....94

Liste des Figures

Liste des figures

Fig.1.1 Composition des déchets ménagers en Algérie (2010)…….……...10
Fig.1.2 Le marc de café…….…..15
Fig. 1.3 Le caféier et la fleur du caféier…….…..16
Fig.1.4 Composition chimique de café……...17
Fig. 1.5 Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage…….....17
Fig. 1.6 Possibilités de valorisation du même marc de café…….....…….…...24
Fig. 1.7 Marc de café comme engrais……...24
Fig. 1.8 Différentes voies possibles de création de valeurs à partir des lipides du marc de café.29
Fig. 1.9 Différentes voies possibles de création de valeurs à partir du marc de café…….....29
Fig.1.10 Carte de déserts dans le monde……...…...…32
Fig.1.11 Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel……32
Fig.1.12 Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte)…….34
Fig.1.13 Métro de Saint-Pétersbourg…….....35
Fig.1.14 Fines anguleuses…….....38
Fig.1.15 Fines sphériques……...…...…...38
Fig. 1.16 Microstructure du fumé de silice (forme sphérique)……...……..…...40
Fig.1.17 Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un BS……...…43
Fig.1.18 Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire)…..44
Fig.1.19 Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS…….……45
Fig.1.20 effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance……...46
Fig.1.21 influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance……...……..46
Fig.1.22 Effet de la granularité sur la résistance……..47
Fig.1.23 Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation……...48
Fig.1.24 Influence de la résistance en traction du BS sur l'adhérence des armatures……..48
Fig.1.25 Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores……49
Fig. 1.26 Evolution du retrait dans le béton de sable……...51
Fig.1.27 Evolution du fluage du béton de sable……...52
Fig. 1.28 Eprouvettes non vibrées non piquées……53

Fig.1.29 Liaison pâte granulats du Béton de sable de dune……...……..54
Fig.1.30 Aspect du Béton de sable de dune…….54
Fig.1.31 Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré en béton de sable (sous bentonite)……....55
Fig .1.32 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable ……...…….56
Fig. 1.33 Moulage d'un élément préfabriqué en béton de sable……..56
Fig. 1.34 Ombrelles d'étanchéité en place……...56
Fig.1.35 Tunnel du métro de Leningrad……...56
Fig. 1.36 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……...57
Fig.1.37 Déroulement d'un film polyane (cure)…….…….57
Fig.1.38. Conduite en béton de sable armé……..58
Fig.1.39 Pose de conduite d'assainissement et regards de visite en béton de sable……....59
Fig.1.40 Le béton de sable en projection…….…….60
Fig. 1.41 Dallage en BS fluidifié auto compactant (Base aérien de Dijon)……61
Fig.1.42 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines……...65
Fig.1.43 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable……66
Fig.1.44 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée……...67
Fig.1.45 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)…….……..69
Fig.1.46 Organigramme de la méthode théorique……...70
Fig.1.47 Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition……74
Fig.1.48 masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition……...…….74
Fig1.49 La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 500°C…..76
Fig.1.50 La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 500°C….76
Fig.2.1 L'aspect général des sables utilisées…….....80
Fig. 2.2 Analyse par DRX de sable de BAHBAH…….…….82
Fig. 2.3 Analyse par DRX de sable de Concassage……82
Fig. 2.4 Ciment MATINE…….....83
Fig.2.5 Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 MATINE…….....84
Fig.2.6 La Roche calcaires broyées…….…….85

Fig. 2.7 Analyse par DRX du filler calcaire utilisé……..…….86
Fig.2.8 Le type d'adjuvant Utilisées……86
Fig.2.9 Marc de café utilise……..87
Fig.2.10 L'analyse granulométriques des sables et Marc de café utilisés…….……..88
Fig.2.11 Le malaxage des bétons au laboratoire……..90
Fig. 2.12 Mesure de la maniabilité du béton de sable ……..91
Fig.2.13 Mesure de la densité du béton de sable…….....92
Fig. 2.14 Fabrication des éprouvettes……...92
Fig. 2.15 Conservation des éprouvettes à l'air libre…….....93
Fig. 2.16 Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20°C ± 2°C……93
Fig.2.17 Dispositif pour l'essai de résistance à la traction...……94
Fig.2.18 Essais de traction par flexion…….....95
Fig.2.19 Dispositif de rupture à la compression…….……..96
Fig.2.20 Essais de compression……97
Fig.2.21 Le CT-mètre et ses composants…….....98
Fig.2.22 Absorption d'eau par succion capillaire…….....99
Fig.2.23 La mesure à l'aide de déformée……..…….100
Fig.2.24 Principe de mesure du retrait et gonflement……101
Fig.2.25 Mesure des variations de masse…….....101
Fig.2.26 Variables étudiées……103
Fig. 3.1 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café…….....106
Fig. 3.2 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café après réglage…..…107
Fig. 3.3 La densité des Bétons de sable à base du Marc de café…….……...107
Fig.3.4 Résistance à la compression des BS à base du Marc de café à l'âge de 7 jours……108
Fig.3.5 Résistance à la compression des BS à base du Marc de café à l'âge de 28jours…..…..109
Fig. 3.6 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSBH MC…..…....110
Fig. 3.7 Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSCN MC…….....110
Fig .3.8 Visualisation de l'interface des BSBH MC……..111
Fig.3.9 Visualisation de l'interface des BSCN MC……...112
Fig.3.10 Résistance à la traction par flexion des BS à base du Marc de café à l'âge de 7 jours……113

Fig.3.11 Résistance à la traction par flexion des BS à base du Marc de café à l'âge de 28 jours……..113
Fig. 3.12 Corrélation entre la résistance à la traction et la densité des BSBH MC……....114
Fig. 3.13 Corrélation entre la résistance à la traction et la densité des BSCN MC……....115
Fig. 3.14 Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction de BSCN MC**……**115
Fig. 3.15 Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction de BSCN MC**……**116
Fig.3.16 Absorption d'eau des BSBH à base du Marc de café……..…116
Fig.3.17 Absorption d'eau des BSCN à base du Marc de café……..117
Fig.3.18 Retrait des BSBH à base du Marc de café…….,,…….118
Fig.3.19 Retrait des BSCN à base du Marc de café……...118
Fig.3.20 Gonflement des BSBH à base du Marc de café…….……..119
Fig.3.21 Gonflement des BSCN à base du Marc de café.……..120
Fig. 3.22 Perte de masse des BSBH a base du Marc de café…….121
Fig. 3.23 Perte de masse des BSCN a base du Marc de café…….121
Fig.3.24 Gain de masse des BSBH a base du Marc de café…….…….…122
Fig.3.25 Gain de masse des BSCN a base du Marc de café…….……..123
Fig.3.26 Conductivité thermique des Bétons de sable à base du Marc de café…….124
Fig. 3.27 Corrélation entre Conductivité thermique et la densité des BSBH MC…….125
Fig. 3.28 Corrélation entre la Conductivité thermique la densité des BSBCN MC…….…..125
Fig.3.29 Chaleur spécifiques des Bétons de sable à base du Marc de café…….……...126
Fig. 3.30 Corrélation entre la Chaleur spécifique et la Conductivité thermique des BSBH MC……127
Fig. 3.31 Corrélation entre la Chaleur spécifique et la Conductivité thermique des BSCN MC……127
Fig.3.32 La diffusivité thermique des Bétons de sable à base du Marc de café……128
Fig. 3.33 Corrélation entre la diffusivité thermique et la conductivité thermique des BS MC……..129
Fig. 3.34 Corrélation entre la diffusivité thermique et la densité des BS MC……...129

Fig.A 1. Ciment MATINE…….145

Fig.A 2. La fiche technique ciment……146

Fig.A.3 . Tamiseuse électrique ……..……147

Fig. A.4 . Malaxeur ……...147

Fig.A.5 . Essais d'équivalent de sable……147

Fig.A.6 . Séchage a l'étuve de calcaire ……...…….147

Fig.A.7. concassage par concasseur et broyage manuelle…….148

Fig. A.8.broyage par broyeur…….……148

Fig .A.9. Table vibreur ……....149

Fig .A.10 . Essais de la maniabilité ……..…149

Fig. A.11. Mesure de retrait et gonflement……149

Fig. A.12. Les éprouvettes avant l'écrasement……..……150

Liste des symbole et Abréviations

Liste des Symbole 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

Depuis ces vingt dernières années, les déchets organiques 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. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Parmi ces déchets on distingue les déchets de café ou le Marc de café.

Le marc de café est composé de beaucoup d'éléments d'intérêts dont la valorisation permet l'obtention de différents produits. En effet, les productions de biocarburant, de compost, de biomatériaux et de charbon actif sont des voies de valorisation possibles parmi tant d'autres. Ainsi, la récupération et la valorisation du marc de café présentent des avantages environnementaux et socio-économiques non négligeables, tels que, par exemple, la diminution sur les ressources naturelles, la création d'emploi et le développement de marché. De plus, la quantité de marc de café générée sur le territoire nationale par les établissements à l'étude est en assez grande quantité pour profiter de ces voies de valorisation. Par ailleurs, la majorité du marc de café générée sur le territoire n'est pas récupérée 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), les propriétés mécaniques (résistance à la compression et à la flexion,), les propriété thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifique, diffusivité thermiques) et la durabilité (Absorption d'eau, les variations dimensionnels (retrait et gonflement) et les variations massique (perte et gain de masse)) .

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

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose de plus en plus à l'homme.

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux. La récupération et recyclage des déchets touchent 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 [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 définie comme "L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances [2].

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».
L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir

1.1.2.2 Les déchets

Tout objet qui doit être jeté car il est cassé, usé, contaminé, ou abimé d'une manière ou d'une autre, pour certains, sera qualifié de déchet, mais ne sera pas nécessairement considéré comme tel par les autres [1].

D'après le code française de l'environnement, article L541-1, le déchet est ainsi qualifié de façon essentiellement subjective, où l'acte ou l'intention du détenteur de se défaire/éliminer/abandonner importe plus que de savoir si l'objet est devenu impropre à l'usage, a perdu toute valeur économique ou présente un danger pour l'environnement [2].

1.1.2.3 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].

1.1.2.4 Les types de déchets

Il existe de nombreux types de déchets fabriqués par une variété de processus. Chaque type de déchets a différentes méthodes de gestion associés.

A. Les déchets biodégradables

Résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires (pain, déchets de café) …, qui s'assimilent en première approche à la biomasse. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation), laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par des résidus de pesticides, de métaux, dioxines, etc. ,selon leur origine. Ils peuvent être revalorisés par différentes filières (bioénergie, biocarburants, Compostage / amendements / engrais…).

B. Les déchets ultimes

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

Outre les déchets ultimes : « ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment». Eux seuls devraient encore pouvoir être mis en décharge [1].

C. Les déchets spéciaux et déchets industriels spéciaux

À la différence du déchet banal peuvent entrer dans la catégorie des déchets dangereux, dont font partie les déchets toxiques et les déchets radioactifs qui doivent faire l'objet d'un traitement tout à fait particulier en raison de leur nocivité particulière liée à la radioactivité. Parmi les déchets nucléaires, on distingue les déchets radioactifs ultimes [1].

D. Les déchets recyclables

Matériaux de construction, métaux, matières plastiques : ces matériaux peuvent être réutilisés tels quels dans d'autres domaines ou recyclés : par exemple, les métaux sont refondus et réintégrés dans de nouvelles pièces, les plastiques sont hachés et servent de rembourrage ou de combustible …

On s'intéresse sur les déchets de métaux (fer, aluminium, plomb,…) qui possèdent une valeur marchande et qui se présentent sous 3 formes:

1- les chutes de fabrication (rebuts, limailles), sont utilisées dont notre projet [1].

2- les objets métalliques en fin de vie (moteurs, outils, canalisations, câblages...)

3- les composés métalliques destinés à être traités pour en extraire le métal contenu (catalyseurs de pots d'échappement,…).

D.1 Déchets usuels inertes

Les déchets usuels inertes sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peut dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker.

D.2 Déchets usuels non inertes

Les plus connus de ces déchets sont les huiles et les peintures. L'incinération avec valorisation énergétique est un des procédés employés pour les recycler. Elle permet la production d'énergie et la destruction des déchets peu combustibles [1].

D.3 Déchets industriels dangereux

L'industrie produit une grande quantité de déchets dangereux. Ce sont pour la plupart des produits comprenant des substances chimiques toxiques ou instables. Les déchets toxiques sont dangereux pour la santé et pour l'environnement. La manipulation de déchets instables entraîne des risques d'accidents graves [1].

D.4 Déchets toxiques en quantités dispersées

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

E. Déchets organiques

Les termes suivants recouvrent la même notion : bio déchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts).
- déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc.…

F. Déchets dangereux

Ils regroupent deux types de déchets :

F.1 Déchets industriels spéciaux (DIS)

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc.…

F.2 Déchets ménagers spéciaux (DMS)

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé.

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. Ils sont réceptionnés dans des déchetteries équipées à cet effet.

• Déchets végétaux issus de l'habitat pavillonnaire.

• Déchets de l'automobile (huiles, épaves, batteries, pneus, …).

• Des déchets commerciaux, emballages et autres résidus générés par les activités commerciales comme les déchets plastiques**.**



Fig.1.1. Composition des déchets ménagers en Algérie (2010) [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.

Tableau .1.1 Quantités de déchets industriels produits : évolution 2008 [6]

Catégorie de déchets	Production de déchets en tonnes
bois	5 529 740
métaux	3 960 337
déchets en mélange	2 160 388
papiers cartons	1 997 818
plastiques	467 333
verre	305 495
caoutchouc	81 220
textile	22 877
Total déchets banals	14 525 208

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 industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent.

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient.

Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés [7].

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.
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 [8].

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 [9]

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.

L'avantage du premier type de recyclage consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée. L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.

Le deuxième type de recyclage nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.

Le troisième type de recyclage s'effectue dans des conditions industrielles. La nature spécifique des matériaux de démolition et de construction, un certain nombre d'opérations sont ajoutées aux fonctions traditionnelles de concassage-criblage :

- stockage sélectif des matériaux réceptionnés ;
- prétraitement : réduction des gros éléments, cisaillage des ferraillages ;
- dé ferraillage (magnétique) : il peut être effectué en deux phases, l'une à la sortie du premier broyeur et la seconde après le criblage ;
- des tris manuels et mécaniques pour la récupération des papiers, des bois, des plastiques, etc. : il existe différents systèmes de séparation et de tri, en fonction des éléments à retirer (épuration par flottaison, tables densimétriques, séparation au moyen d'un courant d'air, etc.)

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 [9].

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 est un ‘’déchet de café ’’, qu'est une boisson psychoactive obtenue à partir des graines du caféier, un arbuste du genre Coffee. Sa culture est très développée dans de nombreux pays tropicaux, dans des plantations qui produisent pour les marchés d'exportation. Le café est le deuxième bien de consommation échangé dans le monde, derrière le pétrole et devant le charbon, la viande, le blé et le sucre [10].



Fig..1.2 : Le marc de café

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

La composition du marc de café est essentiellement faite de caféine [11]. La caféine, aussi désignée sous les noms de théine, guarani, triméthylxanthine ou méthyl théobromine est un alcaloïde de la famille des méthyle xanthines, présent dans de nombreux aliments, qui agit comme stimulant psychotrope et comme léger diurétique. La caféine a été découverte en 1819 par le chimiste allemand Friedlieb Ferdinand Runge. Il la nomma « **Caféine** » en tant que composé chimique du café, qui en français devint caféine« La caféine est présente dans les graines, les feuilles et les fruits de différentes plantes où elle agit comme insecticide naturel 14, paralysant15 ou tuant les insectes qui s'en nourrissent.

La caféine, extraite des graines du caféier (Plante (Fig 1.3)), est chimiquement identique la guaranine, extraite de graines de guarana, La matéine, contenue dans les infusions de feuilles de yerba maté- et La théine, contenue dans les infusions de feuilles et bourgeons de théier. C'est donc une même molécule, de formule brute $C_8H_{10}N_4O_2$, avec les mêmes effets - mais elle n'est consommée ni seule, ni de la même manière, ni à la même concentration. Ces noms sont donc synonymes et seule change la provenance

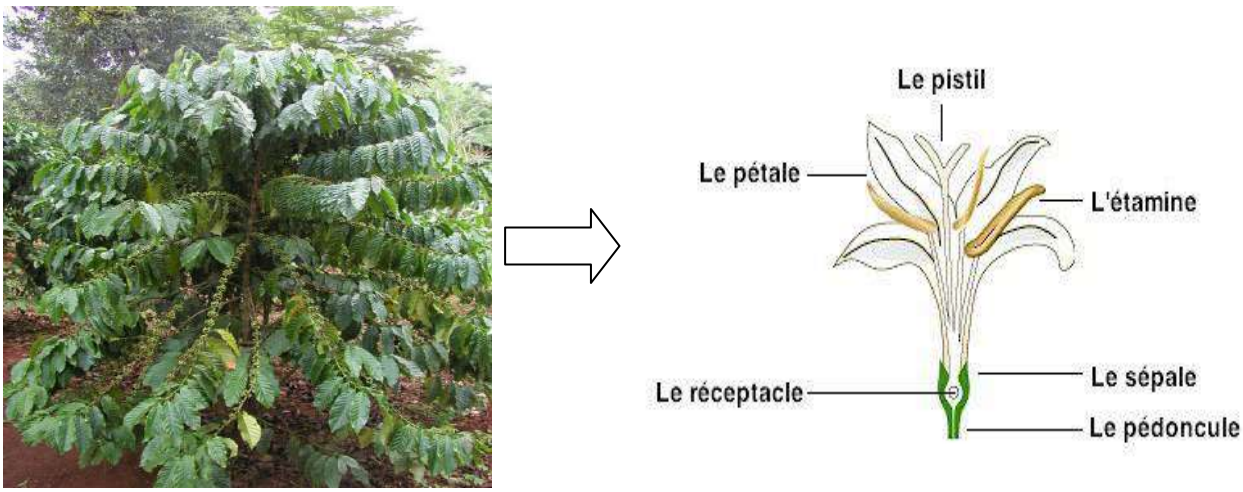


Fig. 1.3 : Le caféier et la fleur du caféier [13]

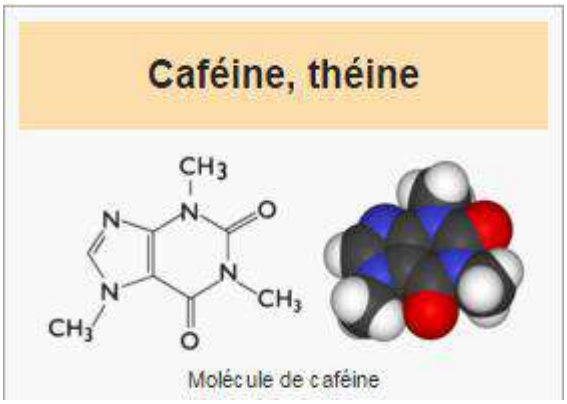


Fig.1.4 : Composition chimique du café

La durée de vie d'un caféier est d'environ 60 ans. Néanmoins après 30 ans la production de l'arbuste va diminuer peu à peu.

1.2.4 Propriété du marc de café

Le marc de café possède plusieurs propriétés, soit physiques, chimiques et également bioactives. Celles-ci sont exposées ici.

1.2.4.1 Propriétés physiques du marc de café

Le marc de café possède un haut taux d'humidité variant entre 55 et 80 %. [12] Plus l'humidité est grande plus la croissance microbienne est favorisée, donc des stratégies de conservations optimales sont nécessaire afin de récupérer une matière de qualité. Ces stratégies peuvent représenter des coûts économiques supplémentaires pour le transport. [13]

En ce qui concerne la morphologie des grains de marc de café, la figure 1.5 illustre un grain de marc de café issu des commerces et prise par microscopie électronique à balayage.

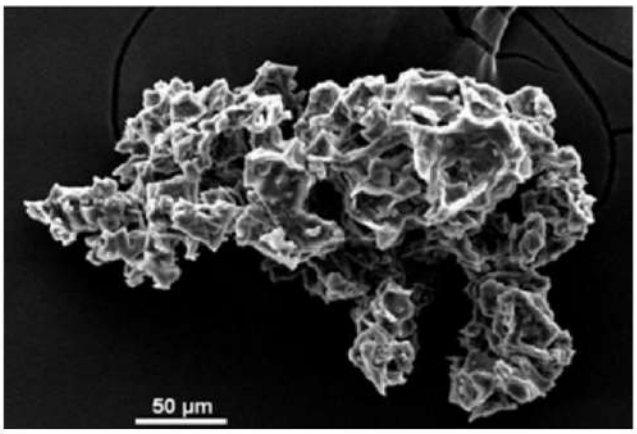


Fig. 1.5 : Grain de marc de café commercial par microscopie électronique à balayage [14]

Le diamètre des grains de marc de café séchés varie entre 50 et 100 µm pour le marc de café commercial. Cependant, ce diamètre augmente avec le taux d'humidité. En effet, lorsque le marc de café devient de plus en plus humide, l'adhésion entre les grains augmente et ces derniers forment des agglomérats de plus grande taille. L'angle de talus quant à lui reste le même, peu importe le taux d'humidité du marc de café. L'angle de talus est une donnée utile pour déterminer les superficies nécessaires des aires d'entreposage du marc de café après l'avoir récupéré. La densité apparente du marc de café est environ de 0,42 g/cm3 et la densité réelle est d'environ 1,16 g/cm^3. En ce qui concerne leur porosité, les grains de marc de café ne possèdent pas de micropores. En général, la porosité est de 0,63, peu importe le taux d'humidité et la taille des pores, est d'environ 10 µm. [14] Toutefois, cette porosité peut être augmentée si nécessaire en diminuant la cristallinité du marc de café en dégradant sa matrice cellulose-lignine. [15] Enfin, la surface des grains est de charge négative [16]. Le tableau 1.2 présente ces différentes données en fonction du taux d'humidité.

Tableau 1.2. Caractéristiques physiques du marc de café en fonction de l'humidité [17]

Humidité (%)	Angle de talus (°)	Densité apparente (g/cm^3)	Densité réelle (g/cm^3)	Diamètre (µm)	Porosité
0,00	s.d.	s.d.	1,20	50-100	s.d.
15,2	38,7	0,43	1,16	583	0,63
17,7	37,8	0,43	1,16	617	0,63
43,1	37,7	0,41	1,11	880	0,63

Dans la majorité des études sur le marc de café, son pouvoir calorifique est évalué en moyenne à 5000 kcal/kg de matière sèche. Cependant, des études affirment que ce pouvoir est de 5700 kcal/kg. [19] Le pouvoir calorifique du marc de café est similaire à celui du charbon et est supérieur aux autres biomasses citées dans le tableau 1.3. Cependant, celui-ci diminue lorsque le taux d'humidité du marc de café augmente. Aussi, la température de combustion spontanée du marc de café est de 460 °C. Les données présentées ici dépendent de la concentration en oxygène et du taux d'humidité du marc de café. Ainsi, lors de l'entreposage du marc de café, ces données doivent seulement être considérées comme des indicateurs, d'autant plus que le stockage de matière humide peut amener à la formation de méthane. [17]

Tableau 1.3 Le pouvoir calorifique de divers résidus de biomasse [17]

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

Le carbone est l'élément majoritaire du marc de café. Le tableau 1.4 présente la composition élémentaire du marc de café.

Tableau 1.4 Composition élémentaire du marc de café [18]

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

La composition du marc de café est essentiellement faite de polysaccharides, de lipides, de protéines, de polyphénols et de minéraux [11]. Le tableau 1.5 présente la proportion des principaux composés retrouvés dans le marc de café.

Tableau 1.5 Les principaux composés du marc de café [18]

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 abondants dans le marc de café. En effet, le marc de café est riche en cellulose et en hémicellulose. 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. Dans le marc de café expresso, le galactomannane est le plus abondant et représente 50 % des glucides. [15]

En ce qui concerne les lipides, les données varient principalement entre 9,3 % et 16,2 %, parfois aux alentours de 20 %. De plus, cet ordre de grandeur ne varie pas significativement entre l'arabica et le robusta. La part de lipides dans les grains café, quant à eux, varie entre 11 % et 20 %. Plus précisément, celle du café arabica varie entre 14 % et 20 % et celle du café robusta entre 11 % et 16 %. Les lipides n'étant pas extraits de manière efficiente dans un milieu aqueux, il est normal de retrouver la quasi-totalité de ceux-ci après que le café eut été filtré. 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. Aussi, les lipides du marc de café sont composés de 84,4 % de triglycérides. Ceux-ci sont représentés par l'acide linoléique (C18:2), l'acide palmitique (C18:2) et (C16:0), l'acide oléique (C18:1) et l'acide stéarique. (Melo et autres, 2014) Les lipides du marc de café contiennent aussi des stérols, dont le sitostérol (10-14 % du marc de café), le stigmastérol (4-5 %) et le campestérol (3-4 %) (Vega et autres, 2015).
Ensuite, le marc de café contient entre 6,7 et 14 % de protéines selon les études et est de même ordre chez l'arabica ou le robusta. 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 aussi présents dans le marc de café. Ceux-ci sont en plus grande quantité dans le marc de café à expresso, que dans le marc de café filtre. Le tableau 1.6 détaille les principaux mi néraux du marc de café.

Tableau 1.6. Composition des principaux minéraux du marc de café [20]

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 possède des propriétés bioactives qui sont à considérer. Comme le montre le tableau 1.7 le marc de café possède une activité anti-radicalaire semblable selon l'espèce de café.

Tableau 1.7. Activité radicalaire du marc de café [21]

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

Enfin, il a été montré que le marc de café utilisé dans des capsules individuelles garde une stabilité microbienne pendant 15 jours dans un contenant de polyéthylène téréphtalate entreposé dans une pièce à air ambiant (22 °C ± 3 °C). De plus, les capacités bioactives du marc de café ne sont pas diminuées pendant cette même période. [22] Ainsi, la pertinence d'utiliser des contenants de récupération en polyéthylène téréphtalate dans les aires de génération des établissements est à considérer.

En conclusion, la composition chimique du marc de café est très variée, des glucides aux lipides, en passant par les protéines, et sans oublier les minéraux et les antioxydants. Cette variété de matériaux présents dans le marc de café, résumée à l'annexe 14, laisse entrevoir 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. Comme l'illustre l'annexe 15, la production de biocarburant nécessite au préalable le séchage du marc de café. En effet, éliminer l'humidité est nécessaire afin d'obtenir des solvants de qualité dans la production de biocarburant (biodiesel, bioéthanol, biohuile). 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. Aussi, la production de biodiesel, de bioéthanol, de biohuile et de granule de combustion peut se faire après une unique étape de séchage. Ainsi, les coûts de transformation du marc de café en sont diminués. [12]

- **La production d'éthanol**

Comme mentionnée précédemment, la production de bioéthanol et de biodiesel est possible avec les mêmes grains de marc de café comme l'illustre l'annexe 15. En effet, la production d'éthanol correspond à l'exploitation des sucres et la production de biodiesel correspond à l'exploitation des lipides. [23] 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. Ainsi, l'extraction des lipides est nécessaire afin de produire du bioéthanol de manière efficace à partir de marc de café. Selon une étude, 100 g de marc de café peuvent donner 10,6 ml de bioéthanol.

- **Production de biodiesel**

Les lipides extraits du marc de café peuvent servir de matières premières pour la production de biodiesel [23]. En effet, les lipides du marc de café peuvent être extraits et subir une transestérification afin de produire des esters méthyliques d'acide gras (EGAM). Toutefois, les lipides extraits du marc de café présentent une haute acidité qui diminue la rentabilité en biodiesel. Ainsi afin de rendre optimale la production de biodiesel, une étape d'estérification est requise préalablement à la transestérification. Malgré une diminution de l'acidité, le biodiesel produit dans le cadre de cette étude ne répond pas aux exigences de la norme ASTM D 6751-07b d'ASTM international qui sert de référence 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.

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, comme l'illustre la figure 2.2.

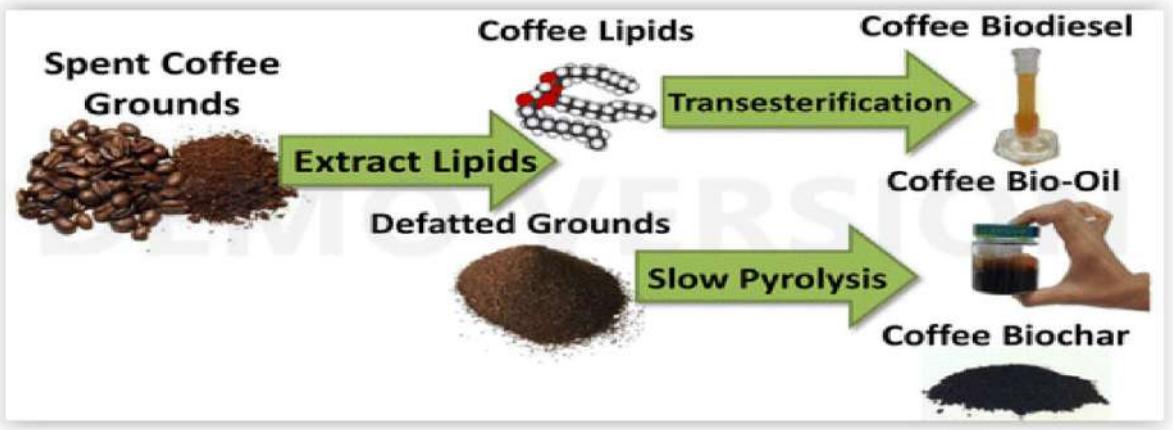


Fig. 1.6. Possibilités de valorisation du même marc de café [24]

Le biochar produit peut ainsi être utilisé notamment pour l'amendement de sol et la séquestration du dioxyde de carbone (CO_2). Cependant, les résultats des études sur le biochar sont parfois négatifs et démontrent un manque de connaissance sur ce produit

- **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 %.

- **Domaine d'agriculture**

Le marc de café peut être utilisé comme engrais au pied des plantes ou dans le compost à condition qu'il soit bien sec au moment de l'utilisation.



Fig. 1.7. Marc de café comme engrais

- **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 [25]. Les polyphénols présents dans le marc de café sont aussi des composés d'intérêt pour l'industrie alimentaire. Ensuite, la composition en protéine du marc de café donne la possibilité de l'utiliser dans l'alimentation humaine. La haute teneur en BCAA et la faible concentration en acides aminés aromatiques du marc de café sont recherchées pour produire des aliments physiologiquement fonctionnels et répondre à des besoins précis tels que la malnutrition issue de certaines maladies (cancer, brûlure, traumatisme, insuffisance hépatique, etc.). [26]

- **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.[26]

Le marc de café semble avoir une grande affinité avec le dioxyde de carbone, CO_2, émis lors des combustions industrielles, plus qu'avec le diazote, N_2. Les processus actuels de captation du CO_2 sont notamment basés sur une adsorption avec des amines, cependant, ces procédés demandent une grande intensité énergétique.

- **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. Cependant, cette étude ne fait pas référence à la présence de caféine et de polyphénols. Ainsi, leur extraction serait peut-être nécessaire avant l'utilisation du marc de café comme remblai. [27] Cette extraction est possible par l'intermédiaire de souches fongiques [28]. Aussi, l'utilisation massive du marc de café comme remblai risque de provoquer un forte de demande biochimique en oxygène en cas de lessivage compte tenu de sa haute teneur organique. Cependant, comme mentionné plus haut, le marc de café peut améliorer la qualité des composts. Ainsi, le mélange de cette matière avec le sol pour le remblai peut permettre à une meilleure végétalisation des fossés

- **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. [28] L'annexe 18 illustre les différentes possibilités d'utilisation de la cellulose et de l'hémicellulose.

D'autres utilisations ou possibilités d'utilisations existent également. En effet, le marc de café peut aussi 25 être utilisé comme composant de nanocomposite, de bijoux, dans la production de dihydrogène, de résine, de lubrifiants, etc. Cependant, ces utilisations demandent des traitements plus ou moins longs et onéreux. Ainsi, l'utilisation du marc de café comme combustible semble être la plus avantageuse sur ce point. [29]

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. [17] Ainsi, la récupération du marc de café a des impacts sur l'environnement. Aussi, en fonction de la valorisation effectuée, celle-ci a également des impacts sur l'environnement, notamment la diminution des pressions sur le territoire, sur certaines ressources naturelles, et sur la qualité des eaux.

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 lixiviat, les pressions n'ont pas pour autant disparu. Une récupération spécifique du marc de café diminuerait les pressions dans les sites d'enfouissement. Cependant, dans l'optique où la matière organique sera bannie de l'élimination en 2020 comme mentionnée dans le plan d'action de la troisième PQGMR, la récupération spécifique du marc de café n'aura plus d'effet sur cet enjeu. Effectivement, le marc de café est une matière acceptée dans la récupération de matière organique.

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. De plus, le *Bilan de l'aménagement forestier durable 2000-2008*, dernier bilan disponible sur le site du Bureau du forestier en chef du Gouvernement du Québec, estime que la gestion forestière québécoise n'est pas totalement sur la voie de l'aménagement durable (Québec, 2015). Toutefois, il faut retenir également que l'utilisation du marc de café dans des granules de combustion augmente les émissions de gaz et de particules. Ainsi, la qualité de l'air de l'environnement avoisinant les fours peut diminuer.[18]

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 [30].

1.2.6.3 Alternative au plastique

Dans l'industrie du cosmétique, l'utilisation du marc de café en remplacement des microbilles de plastiques dans les gels douche, diminuerait les pressions sur l'environnement, notamment sur la biosphère aquatique qui mange ces microbilles. De plus, ces microbilles accumulent certaines toxines. [31] Une pétition se trouve actuellement sur le site de l'Assemblée nationale du Québec dont le but est d'interdire l'utilisation de microbilles de plastiques dans les produits cosmétiques (Assemblé nationale du Québec, 2015). Le marc de café possède les caractéristiques physiques pour remplacer ces microbilles. Cependant, comme dit précédemment, le marc de café possède un caractère écotoxique. Par conséquent, le marc devra être traité avant d'être utilisé dans ce secteur.

Dans l'industrie du plastique et de l'emballage, l'utilisation du marc de café comme substitut à certains emballages, notamment les capsules de café individuel, diminuerait les pressions sur l'environnement. En effet, il a été montré que le marc de café possède une stabilité sous l'influence de la température.

1.2.6.4 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. [32]

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.

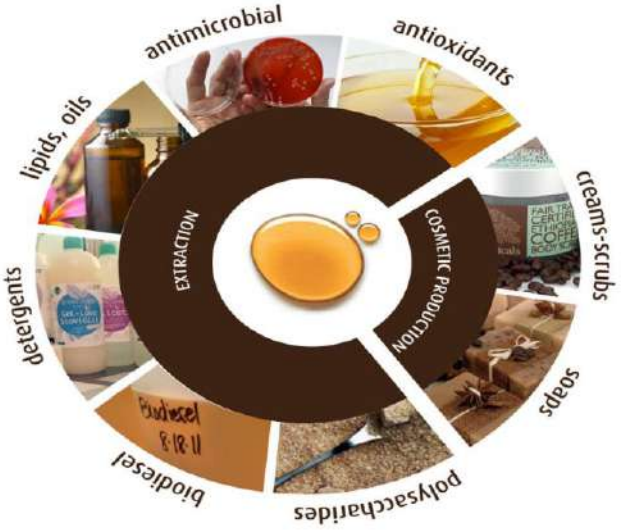


Fig. 1.8 Différentes voies possibles de création de valeurs à partir des lipides du marc de café [33]



Fig. 1.9 Différentes voies possibles de création de valeurs à partir du marc de café [33]

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.

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 [34].

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.

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.

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 [35]. Ainsi, un sentiment d'appartenance peut se créer avec les produits locaux.

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. La substitution d'antioxydants synthétiques dont la sécurité est concernée par les naturels pourrait également être bénéfique en raison de leur implication sur la santé et la fonctionnalité dans le système alimentaire. [36]

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. Ainsi, les productions de biocarburant, de compost, de biomatériaux et de charbon actif sont des voies de valorisation parmi tant d'autres. Cependant, la production de biocarburant est considérée comme la plus avantageuse, notamment à cause du côté lucratif. Toutes les utilisations possibles du marc de café ont des impacts environnementaux et socio-économiques. Toutefois, afin de juger de la pertinence d'une récupération spécifique, il est essentiel d'estimer la quantité de matière générée sur le territoire et d'analyser les perspectives de marché.

1.3 Le béton de sable

1.3.1 Introduction

Le besoin en granulats connaît, en Algérie, une croissance considérable en rapport avec les travaux de construction et de développement qui ont été lancés dans cette dernière décennie. 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 [38].

Etant donné l'abondance de sable de dunes, particulièrement dans les déserts de Sahara qui occupe une grande partie du territoire Algérien (**Fig.** 1.10), l'idée de promouvoir sa valorisation 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.

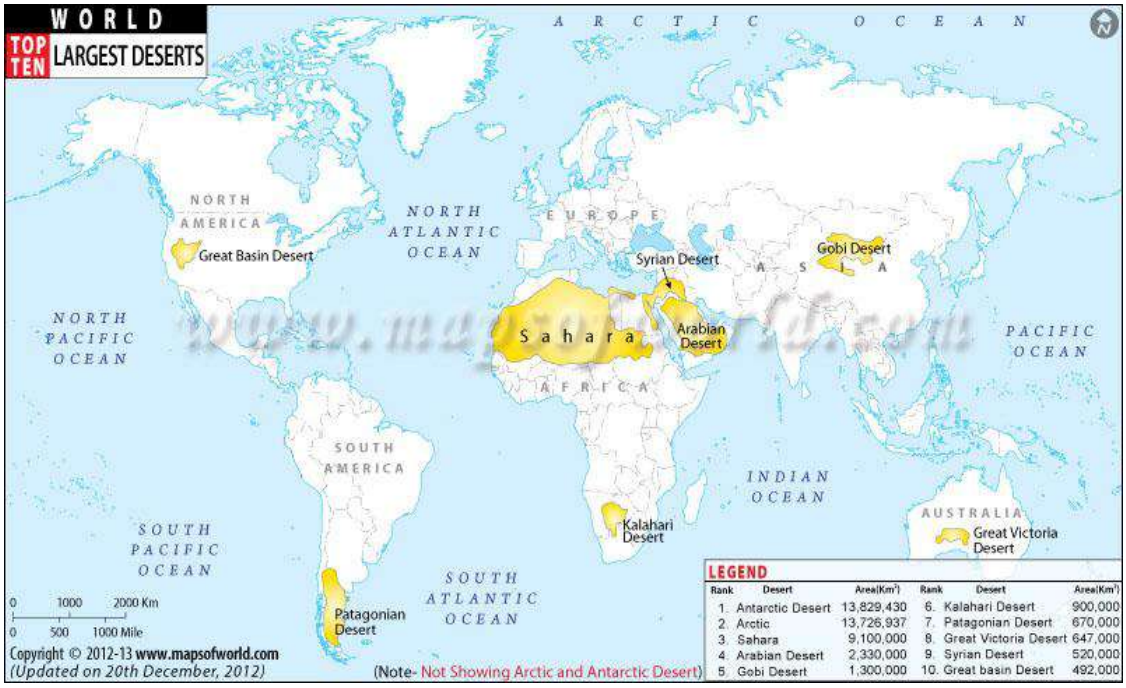


Fig.1.10. Carte de déserts dans le monde [39]

1.3.2 Définition

Selon la norme française NF P 18-500 [40], le béton de sable est un béton fin constitué par un mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; outre ces composants de base, le BS comporte habituellement un (ou plusieurs) adjuvant.

Les ajouts (fibres, colorants, ...) utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange.

L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation «béton de sable» tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0,7 (G = gravillon ; S = sable) : on parle alors de béton de sable chargé (Fig. 2.2).

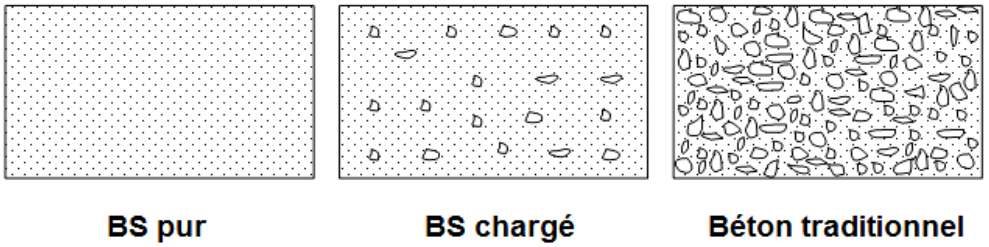


Fig.1.11. Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel [41]

On peut admettre l'emploi d'un granulat à granulométrie continue de 0 mm à un maximum de 8 mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 4 mm et les éléments inférieurs à 4 mm reste également inférieur à 0,7 [40].

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) [40].
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 [40].

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 [41] 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. (Fig. 1.12).

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 [41].

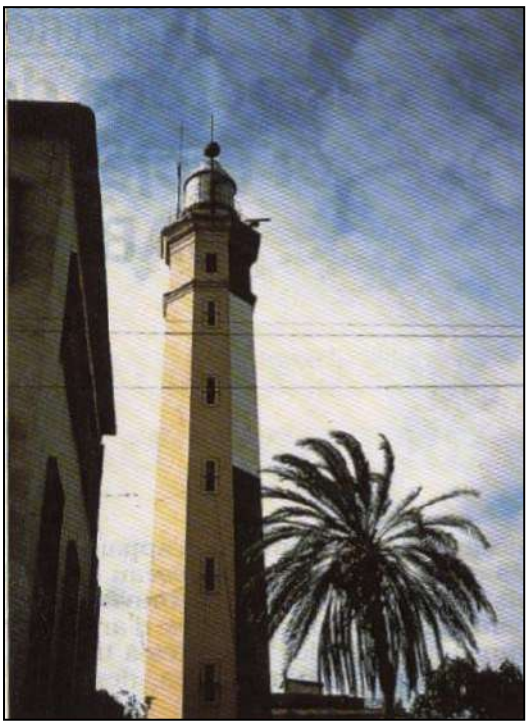


Fig.1.12. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) [41]

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. La Figure 1.13 montre l'illustration de métro de Saint- Petersbourg. Voûte mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.

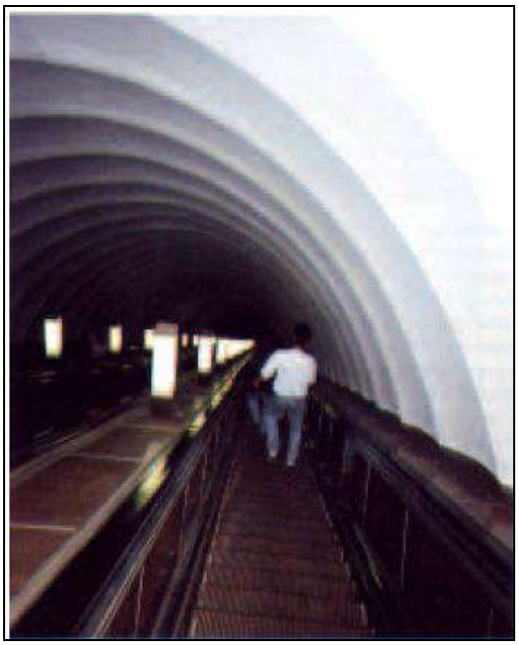


Fig.1.13. Métro de Saint-Pétersbourg

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 [41], 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. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans

différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau comme par exemple : CNERIB et ENPA en Algérie, CEBTP et LRPC en France, Des laboratoires en URSS. Au début, les recherches se limitèrent à un béton de sable ordinaire sans aucune correction granulaire et sans adjuvants, puis elles s'étendent à la recherche d'une meilleure correction granulaire du sable dans sa partie fine par l'utilisation de filler (généralement calcaire) et à l'utilisation des adjuvants (plastifiant, réducteur d'eau). Plusieurs compositions de base ont été données, mais pour des matériaux bien déterminés. D'autres études ont essayé d'approfondir le sujet (retrait, fluage, adhérence aux armatures) mais les résultats obtenus restent toujours insuffisants.

1.3.5 Les composants du béton de sable

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajouts, de ciment et d'eau. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certain usage, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants [41].

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 [41]. 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. Mais il est plus prudent à ce stade de se limiter à l'utilisation des sables propres tels qu'ils sont employés pour les bétons classiques.

- **Classification des sables selon leurs provenances**

Selon leurs provenances, les sables peuvent être classés 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)

La qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont [41]:

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

La différence entre le béton classique et le béton de sable réside principalement dans la granulométrie différente.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Dans le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros qui sont les gravillons (10 à 20 mm) ; ils créent des 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: [41]

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

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

Tableau 1.8. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [41]

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 forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable. Ainsi, des fillers avec des grains sphériques type filler calcaire, nécessitent moins d'eau que ceux à grains anguleux type filler siliceux, et par conséquent, assurent une meilleure compacité au mélange durci. (Fig. 1.14 et 1.15). 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).

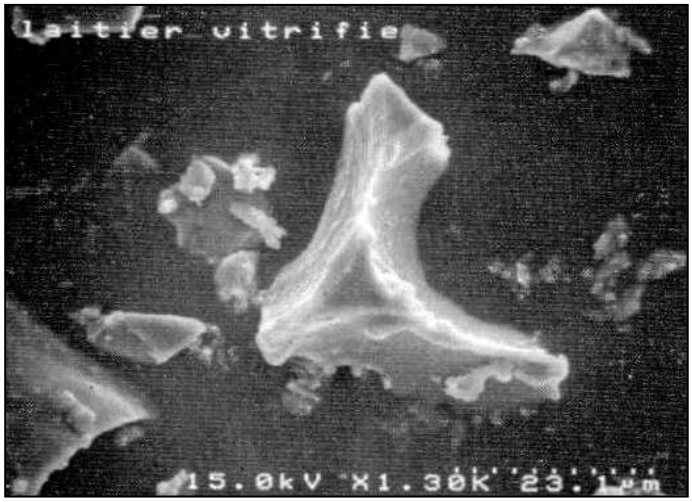


Fig.1.14. Fines anguleuses [41]

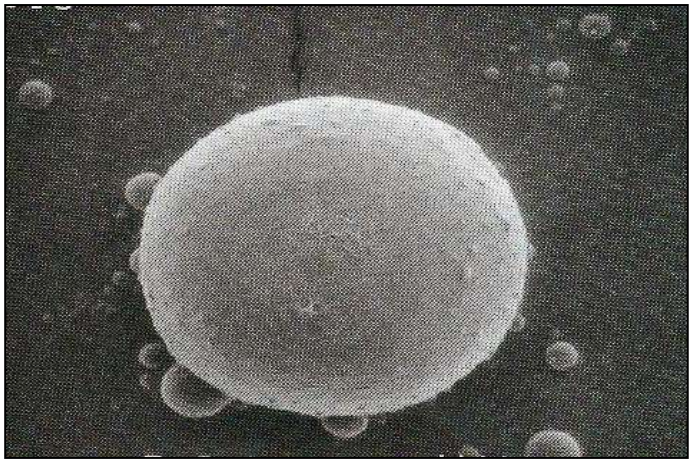


Fig.1.15. Fines sphériques [41]

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.

Nous citerons 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], [43]. 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 finement 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 [44].

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 [45].

- **Fumé de silice** [45,46]

Les fumées de silice sont des résidus évacués de la chambre de combustion d'un four destiné *à* produire du silicium ou des alliages contenant du silicium. La fumée de silice se présente sous forme de microsphères de silice amorphe d'un diamètre moyen de l'ordre de 0,l µm (Fig.1.16), leur surface spécifique est de l'ordre de 20 à 25 m^2/g. Lorsque les microsphères sont bien dispersées, elles vont s'empiler dans les espaces interstitiels restés vides entre les grains de ciment qui possèdent un diamètre moyen environ 100 fois plus élevé. Ces fines particules

améliorent les propriétés rhéologiques du mélange (fluidité. diminution de la ségrégation et du ressuage). Leur grande finesse et leur structure vitreuse en font un produit très réactif. Elles permettent aussi d'obtenir une pâte plus dense car le squelette granulaire est plus compact. La grande finesse et surface spécifique des fumées de silice tendent à augmenter la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la même maniabilité qu'un béton sans fumée de silice. Cependant, en présence d'un superplastifiant et utilisées en petite quantité pour des bétons ayant un faible *E/C,* les fumées de silice peuvent augmenter quelque peu la quantité d'eau libre dans le mélange de béton et accroître sensiblement la maniabilité. De plus, les fumées de silice augmentent la cohésivité du béton et diminuent donc le ressuage et la ségrégation.

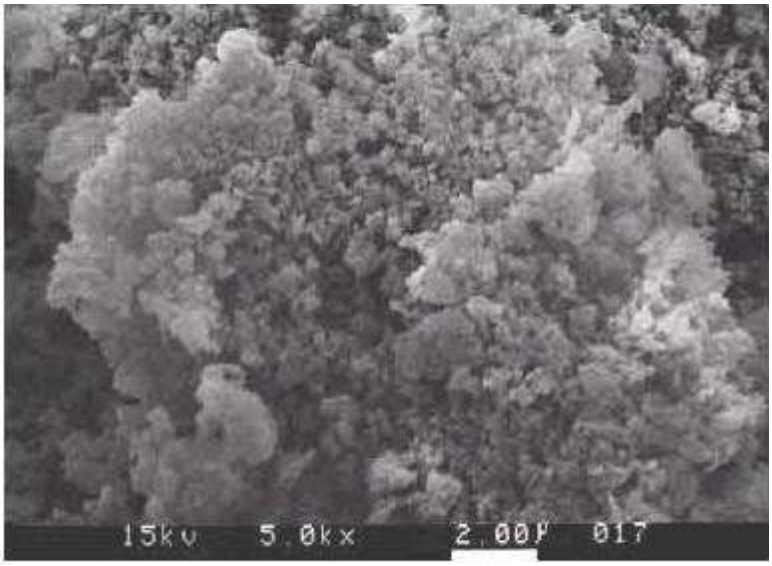


Fig. 1.16 . Microstructure du fumé de silice (forme sphérique) [47]

L'utilisation de fumées de silice à des dosages de 7 à 15% par rapport a la masse de ciment, permet au béton d'atteindre des résistances mécaniques élevées, et permet aussi d'avoir des bétons plus denses et plus imperméables, donc plus durable. Cependant, étant donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectuée. Par son effet filler et par la formation d'une phase liante, la fumée de silice contribue donc au renforcement des propriétés mécaniques du matériau durci. Les caractéristiques des interfaces pâte- granulat (zone de transition poreuse) en sont grandement améliorées : absence de cristaux de grandes dimensions et orientés, absence de concentration de fissures, meilleure cohésion et meilleure adhérence pâte -granulat. L'augmentation de la qualité des interfaces a un impact direct sur la microfissuration initiale et le processus de fissuration.

- **Laitier**

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

- **Le laitier granulé** : sable friable de couleur claire utilisé souvent comme liant hydraulique ;
- **Le laitier solidifié à l'air libre** : se présente sous forme de roches prêtes au concassage à la granulométrie voulue. Ce laitier est employé comme granulats dans les chaussées.

- **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 [41].

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 [41].

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.

On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés. La spécificité du béton de sable privilégie toutefois

l'usage du plastifiants ou superplastifiant : ils améliorent la maniabilité, le plus souvent avec augmentation de résistance par suite d'une diminution de la teneur en eau et de la défloculation des éléments fins. On se contentera à expliquer ceux qui on été utilisés dans cette étude. Les adjuvants employés devront par ailleurs être conformes à la norme NF P 18-103 [41].

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 [41].

- **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*)** [41].

- **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 [41].

1.3.6 Propriétés essentielles du béton de sable

1.3.6.1 Propriétés générales

- **Granulométrie et maniabilité [41]**

Une des particularités du béton de sable est de nécessiter davantage d'eau que les bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport *E/ C* systématiquement supérieures à 0,5. Ce rapport est généralement compris entre 0,6 et 0.8 par rapport à un *E/ C* de 0,5 à 0,6 pour le

béton ordinaire avec des maniabilités comparables ; cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange qui a besoin d'être mouillée.

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la Figure 1.17 qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité.

La figure 1.17 montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport *E/C* augmente. Cependant pour un rapport *E*/*C* fixe, la maniabilité dépend da la nature des fines d'ajout.

La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.

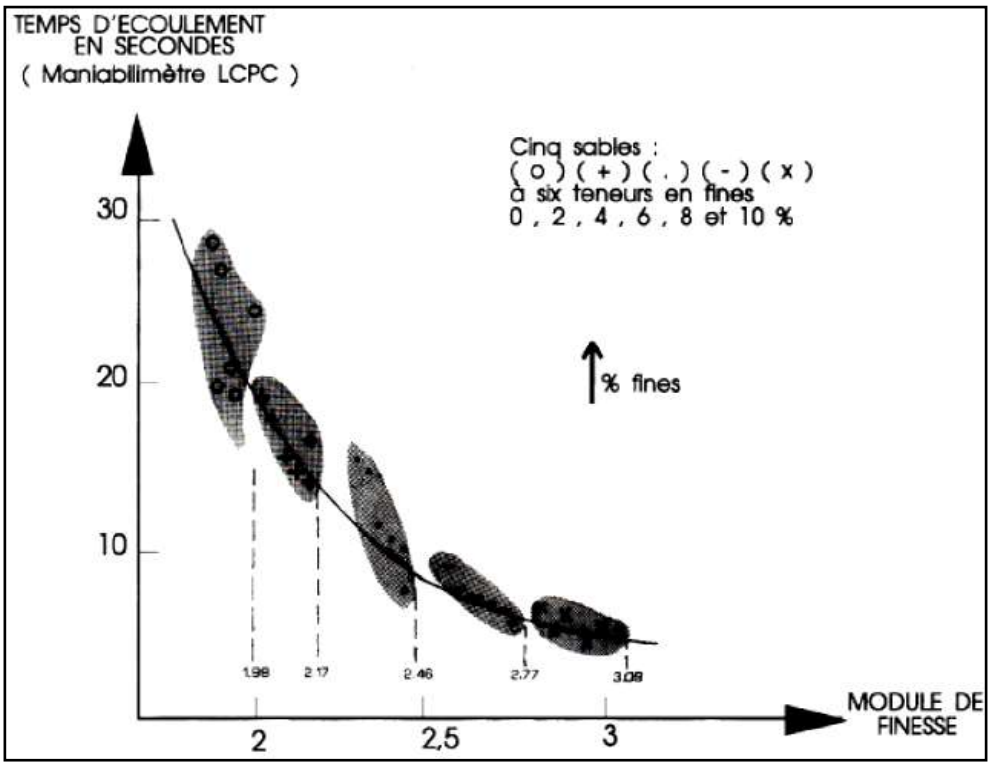


Fig.1.17. Influence du module de finesse du sable sur la maniabilité d'un BS [41]

On constate ainsi que la relation entre le dosage en fines et la maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. Les graphiques de la Figure 1.18 montrent l'effet différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune. Pour le sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m^3 entraîne une chute de maniabilité, ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact).

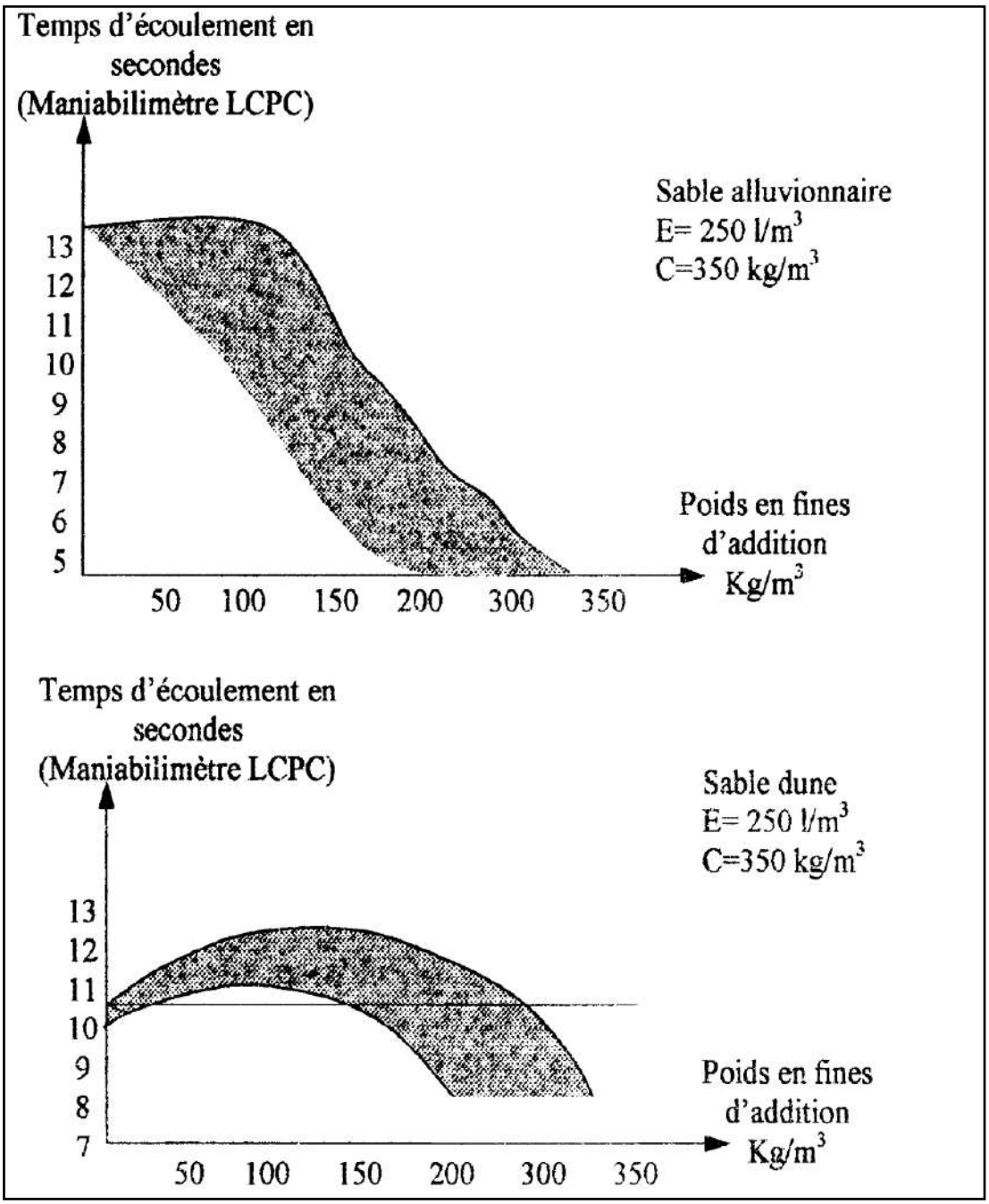


Fig.1.18. Influence de la nature du sable sur la maniabilité (avec fines d'addition calcaire) [41]

Un BS se diffère d'un béton traditionnel par sa granulométrie fine. Donc, la porosité dans le cas du BS est élevée et par conséquence le dosage nécessaire du ciment sera très important. L'utilisation du ciment seul n'est pas économique et en plus le BS ne sera finalement qu'un mortier. A cet effet, l'introduction de fines d'ajout est indispensable dans le cas des BS. L'ajout de fines entraîne une amélioration de la compacité du squelette granulaire et améliore

par conséquence la maniabilité du BS [48]. La Figure 1.19 montre l'effet de fillers calcaires sur la densité des sables sable alluvionnaire RS, sable de dune DS et le mélange RDS.

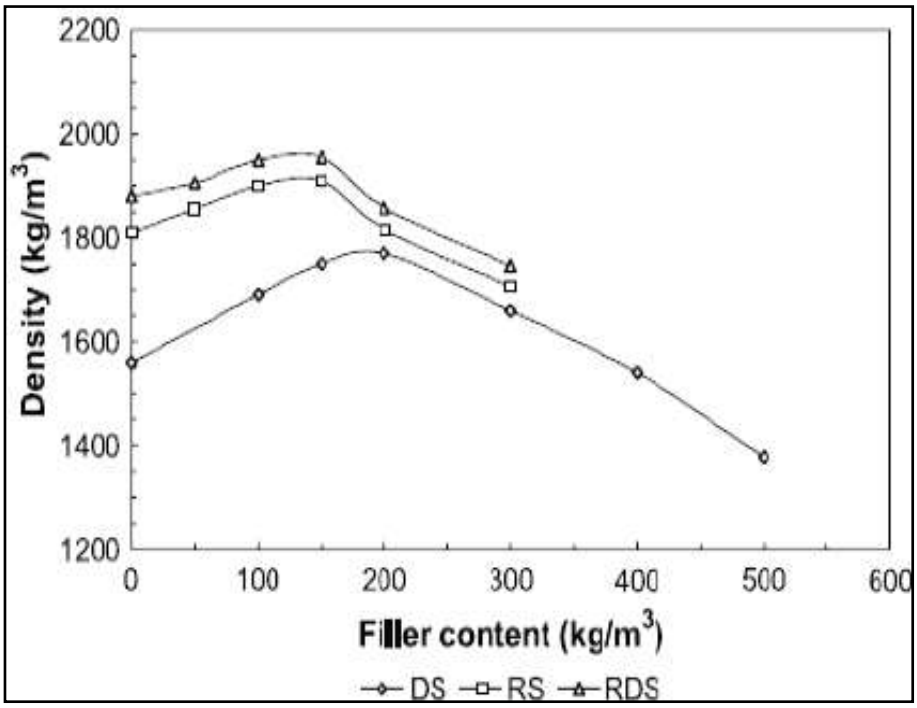


Fig.1.19. Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS [48]

D'après la Figure 1.19, on remarque qu'il existe un dosage optimal de fillers calcaires où la compacité est maximale. L'amélioration de la compacité par l'ajout de fillers calcaires devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

- **Granulométrie et résistance [41]**

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

- **La finesse de l'adition** : plus l'addition est fine plus elle est efficace au niveau du gain en compacité et donc en gain de résistance ; ce résultat est valable quelque soit la granulométrie du sable. (Fig. 1.20)

- **La nature de l'addition**

  A même dosage selon la Figure 1.21, on peut constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable.

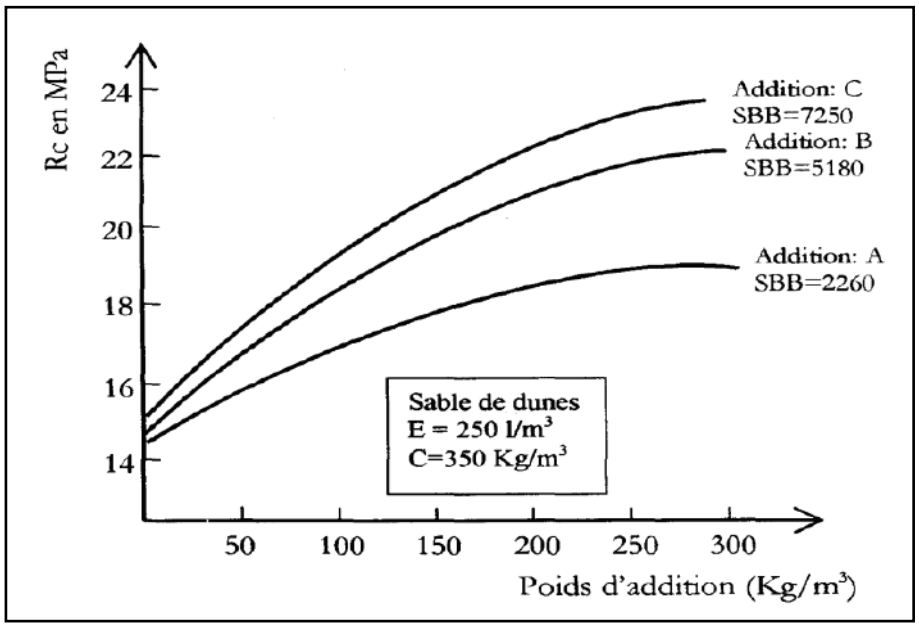


Fig.1.20. effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [41]

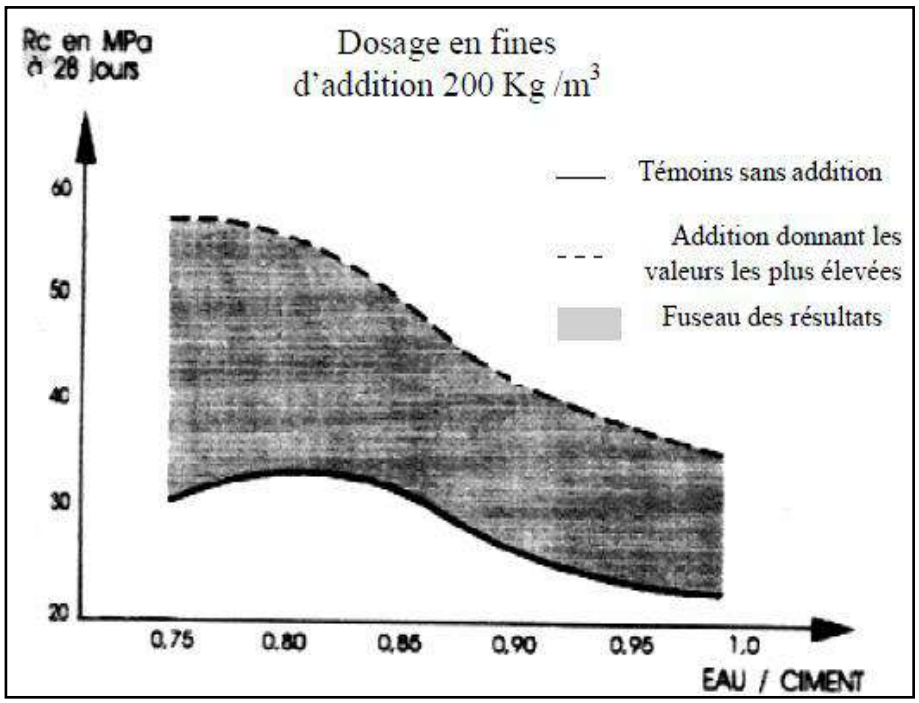


Fig.1.21. influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [41]

❖**La dimension du D_{max} (0/D)**

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate (Fig. 1.22) que l'effet du diamètre Dmax est peu important, mais par contre il influe sur la maniabilité; ou il faut employer un plastifiant réducteur d'eau, afin de fixer la maniabilité et atteindre la résistance voulu**.**

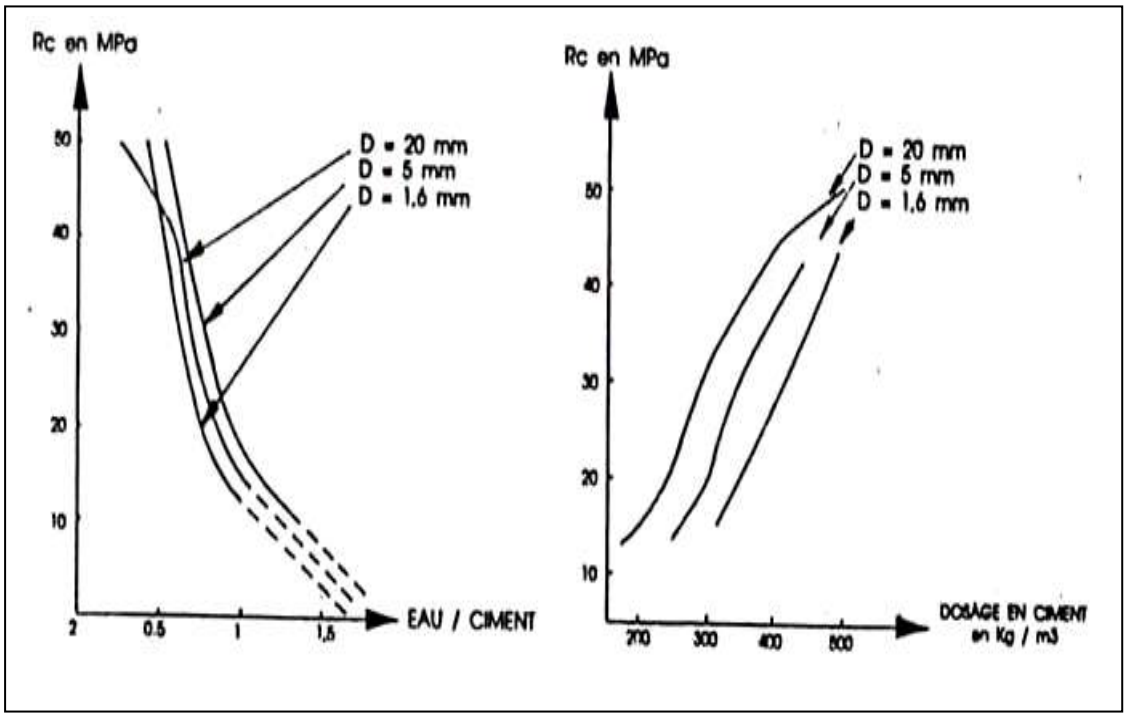


Fig.1.22. Effet de la granularité sur la résistance [41]

1.3.6.2 Propriétés spécifique

- **L'adhérence aux armatures**

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance), on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bons que le béton de référence. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable et un béton témoin traditionnel à l'aide de l'essai pullout. Il s'agit de mesurer le déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci, en fonction de l'effort de traction qui lui est appliqué. Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de compositions appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques [41] (Fig. 1.23).

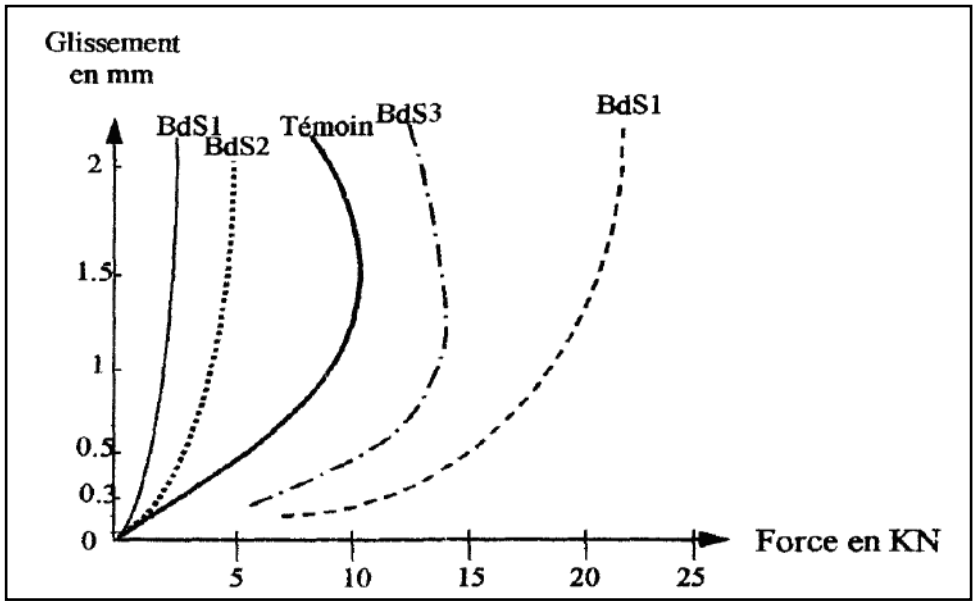


Fig.1.23. Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation [41]

Dans le cas des petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondant au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la résistance en traction du béton de sable est élevée. (Fig. 1.24) Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels (contrainte ultime varie de 30 à 60 bars), alors qu'on peut dire que l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de structure.

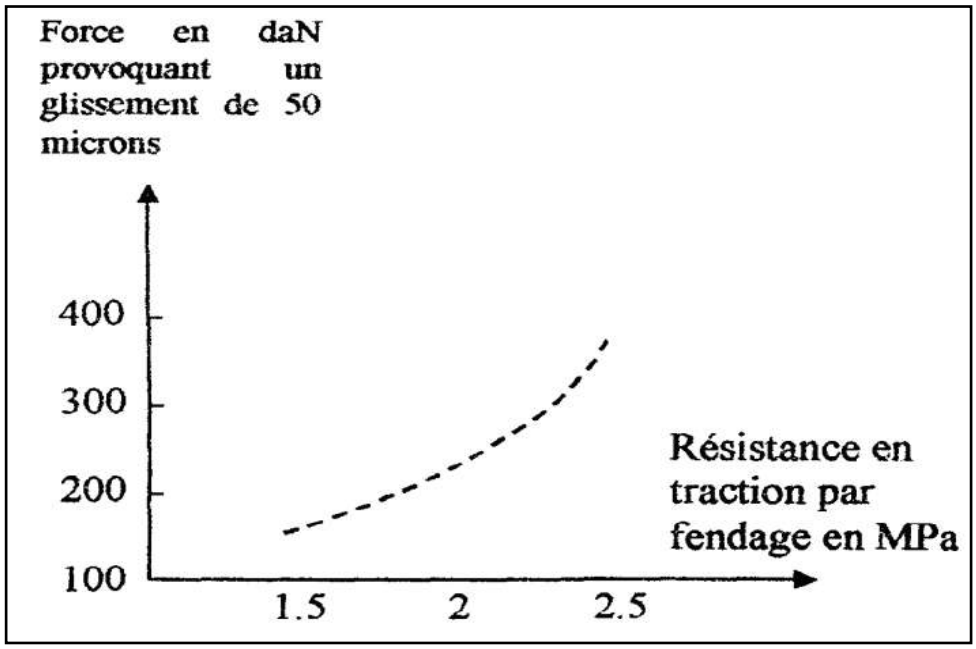


Fig.1.24. Influence de la résistance en traction du BS sur l'adhérence des armatures [41]

- **Durabilité des bétons de sable**

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcalisation ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur. La tenue du béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (milieu urbain, régions montagneuses, milieu marin, ambiances agressives...etc.)

- ✓ Perméabilité à l'air et à l'eau ;
- ✓ gel-dégel ;
- ✓ Carbonatation ;
- ✓ Pénétration des ions de chlorure.

Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques exogènes ou internes, sont en général des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives.

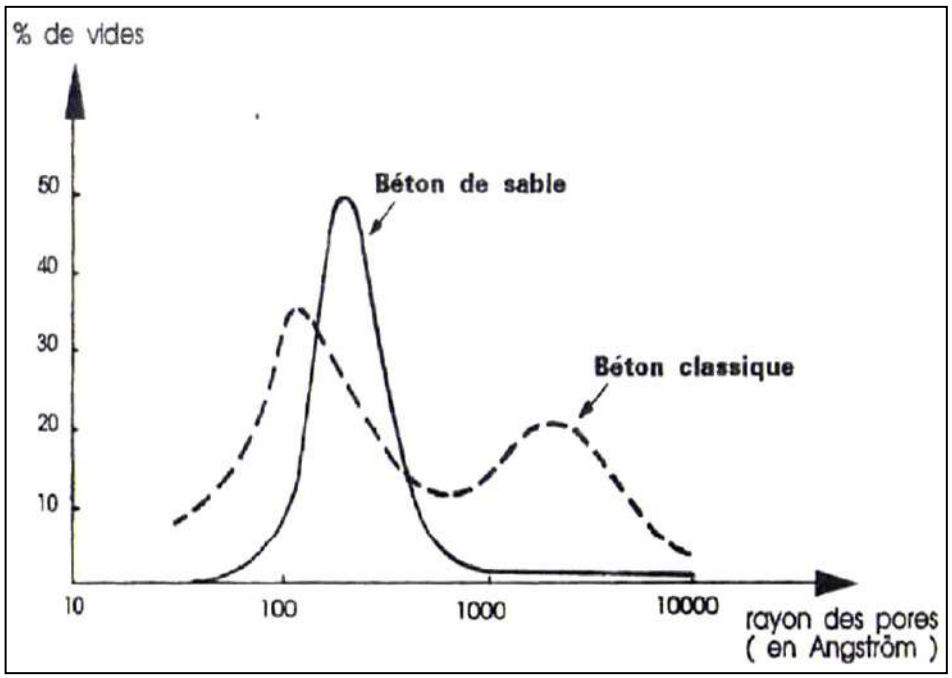


Fig.1.25. Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores [41]

La perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques. Ces résultats entrent dans le cadre du projet SABLOCRETE [41] qui contribue à l'étude du comportement des bétons de sable vis-à-vis de la durabilité. Ils ne sont pas généralisés à toutes les formulations de béton de sable mais plutôt à des bétons de sable correctement formulés. C'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment. Dans ces conditions le comportement est très satisfaisant et même excellent [41].

- **Résistance au gel et au dégel**

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalent aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores [41].

- **Retrait et Fluage**

➢ **Le retrait**

Le retrait d'auto-dessiccation du béton de sable est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons (béton de sable et béton ordinaire), en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondants globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48 (Fig. 1.26). En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage) [46-51]. Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire.

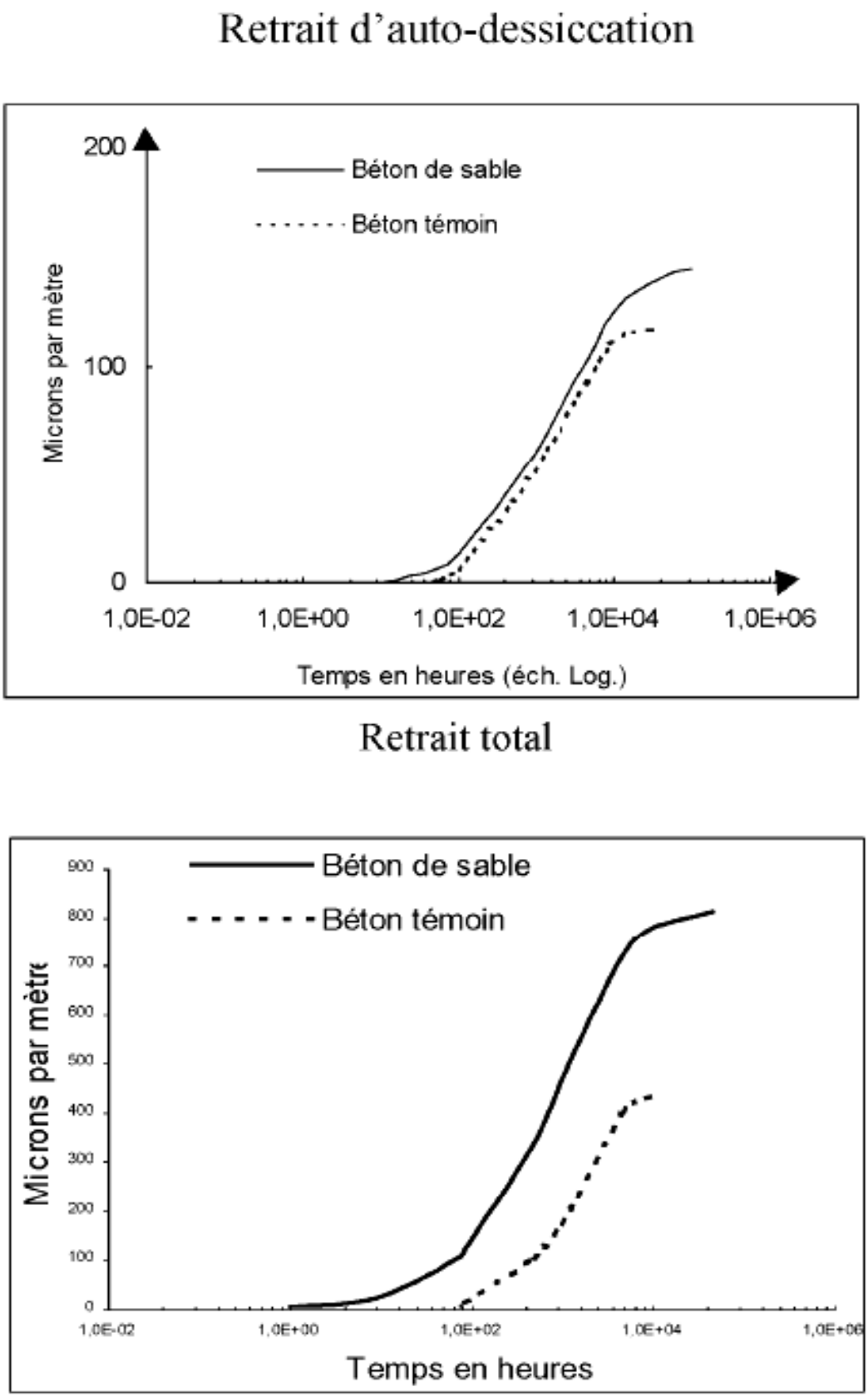
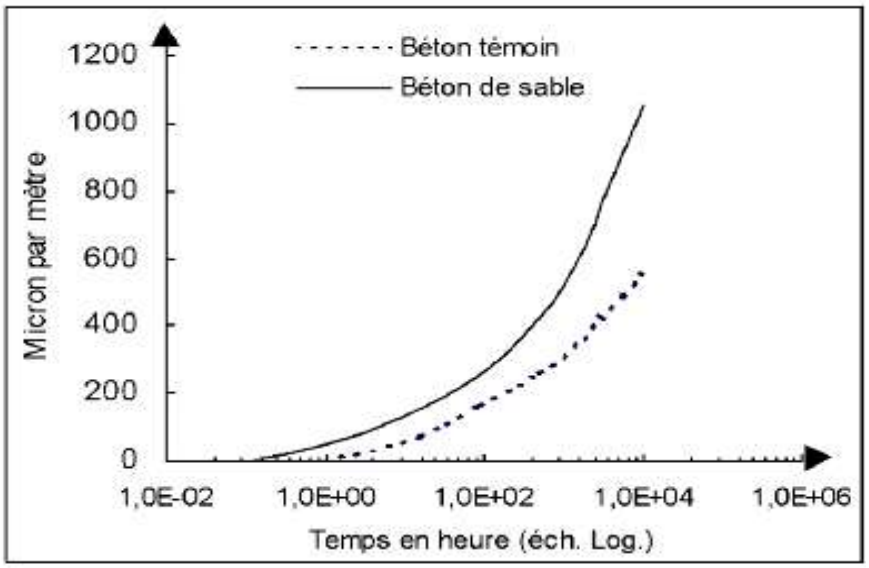


Fig. 1.26. Evolution du retrait dans le béton de sable [51]

- **Le fluage**

La cinétique du fluage du béton de sable est plus rapide que celle du béton ordinaire (Fig.1.27). Les valeurs du fluage du béton de sable sont deux fois plus importantes que celles du béton ordinaire. Notons que ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25 MPa. Un béton de sable plus résistant n'aura pas le même comportement et son fluage deviendra plus faible [49-51].



Fluage d'auto-dessiccation

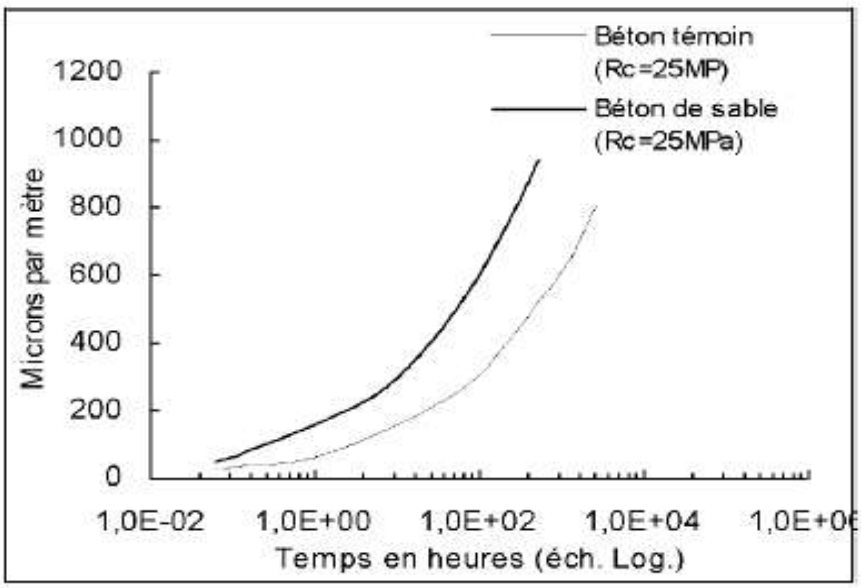


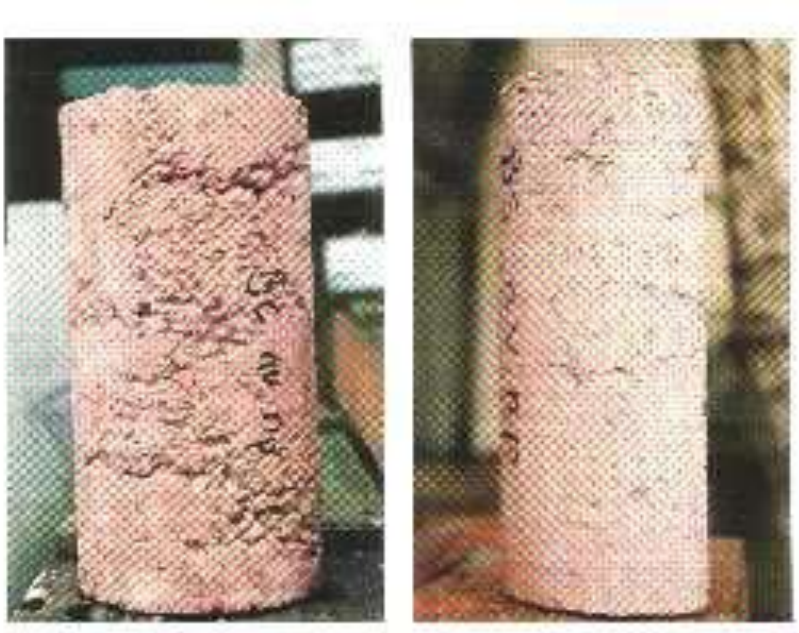
Fig.1.27. Evolution du fluage du béton de sable [51]

- **Comportement thermique du béton de sable**

La conductivité thermique des bétons traditionnels varie de 1.4 à 1.8 W/m°C. Les conductivités thermiques mesurées sur bétons de sable sont légèrement inférieurs. Le béton de sable est donc plus isolant. Ce résultat s'explique par la porosité plus importante du béton de sable [41].

- **Phénomène de ségrégation des constituants**

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



a) Béton ordinaire b) Béton de sable

Fig. 1.28. Eprouvettes non vibrées non piquées [41]

- **Microstructure du béton de sable**

L'observation de fragments durcis du béton de sable au microscope électronique à balayage (MEB), permet de décrire le matériau comme étant dépourvue de fissures notables, avec une bonne homogénéité d'ensemble et une bonne adhérence pâte de ciment-grains de sable. Des

essais ont été effectuée par M.Bederina madani [51], basée sur l'observation par microscope électronique à balayage (MEB), sur trois types de béton de sable, a montré qu'une pâte de ciment durcie plus ou moins compacte homogène (Fig. 1.29 et 1.30) on constate de nombreux hydrates avec forme d'aiguilles et de cristaux vu la taille des pores très petites, et peu de microfissures courtes et non connectées, ces microfissures résultent de l'important retrait d'auto-dessiccation et la nature de séchage qui est uniforme en surface qu'à l'intérieure de l'éprouvette (le séchage atteint 80% entre le 3^{e} et 5e jour et 100% avant le 10e jour).

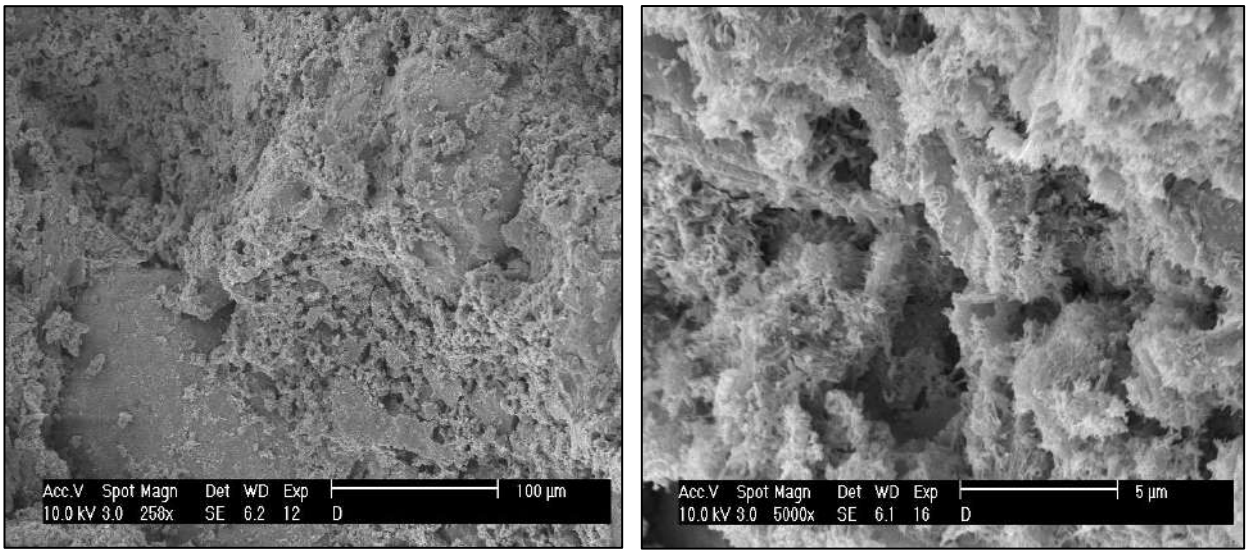


Fig.1.29. Liaison pâte granulats du Béton de sable de dune [51]

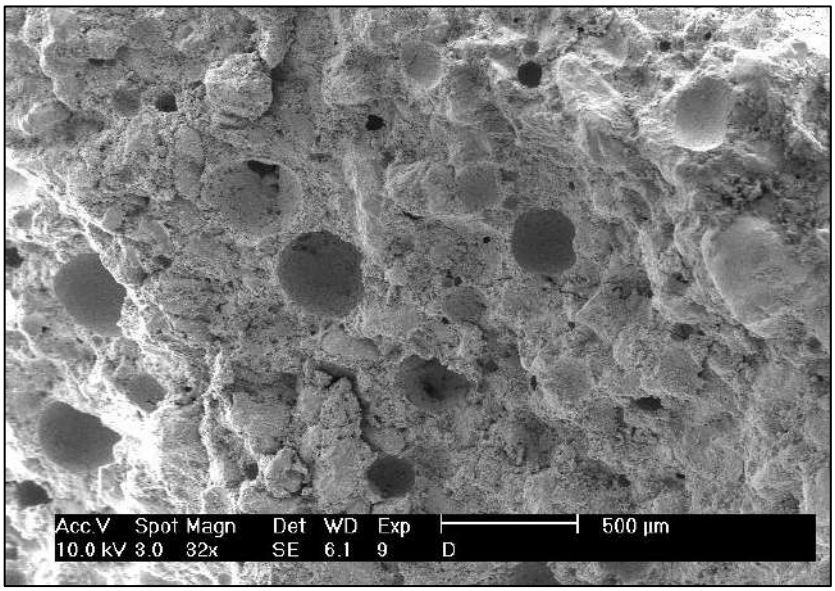


Fig.1.30. Aspect du Béton de sable de dune [51]

1.3.7 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 :

1.3.7.1 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 [41].



Fig.1.31.Bétonnage au tube plongeur d'un pieu foré
en béton de sable (sous bentonite)[41]

1.3.7.2 Bâtiment

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique [41].

1.3.7.3 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) [41].

- **Toiture à plis**

Ces éléments préfabriqués ont une épaisseur de 5 cm, une hauteur de 2 m et une longueur pouvant atteindre 32m (Fig.1.32 et 1.33).

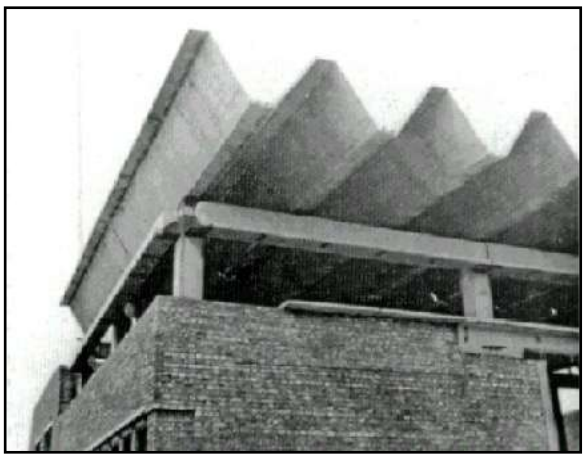


Fig .1.32 Bâtiment à Toitures à plis en béton de sable [41]

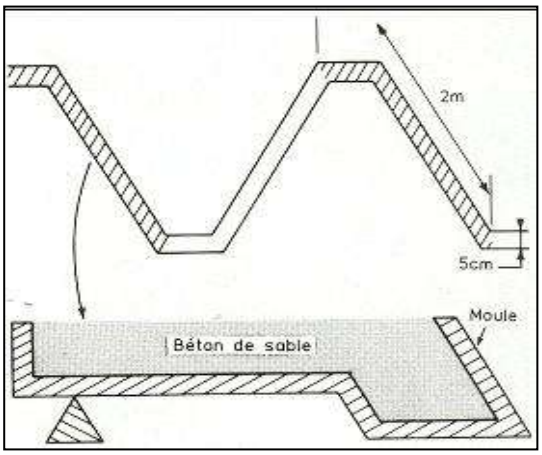


Fig. 1.33. Moulage d'un élément préfabriqué en béton de sable [41]

- **Ombrelles d'étanchéité**

La finition du métro de Leningrad en Russie est assurée par la mise en place d'une ombrelle d'étanchéité (Fig.1.34) ; 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.1.35).

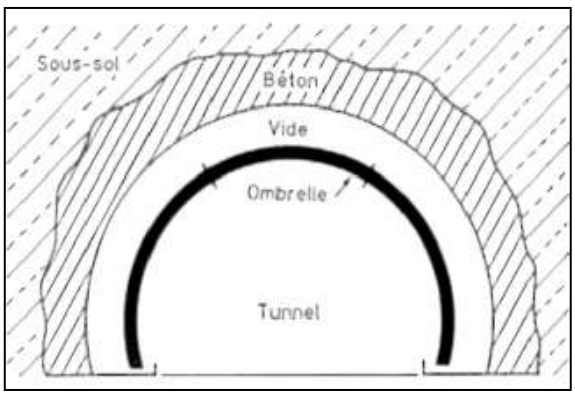


Fig. 1.34. Ombrelles d'étanchéité en place [41]



Fig.1.35. Tunnel du métro de Leningrad [41]

1.3.7.4 Routes, chaussé et dallage

Dans le domaine des routes et autoroutes (Fig.1.36 et 1.37), 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.)[41].

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. 1.36. 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 [41]

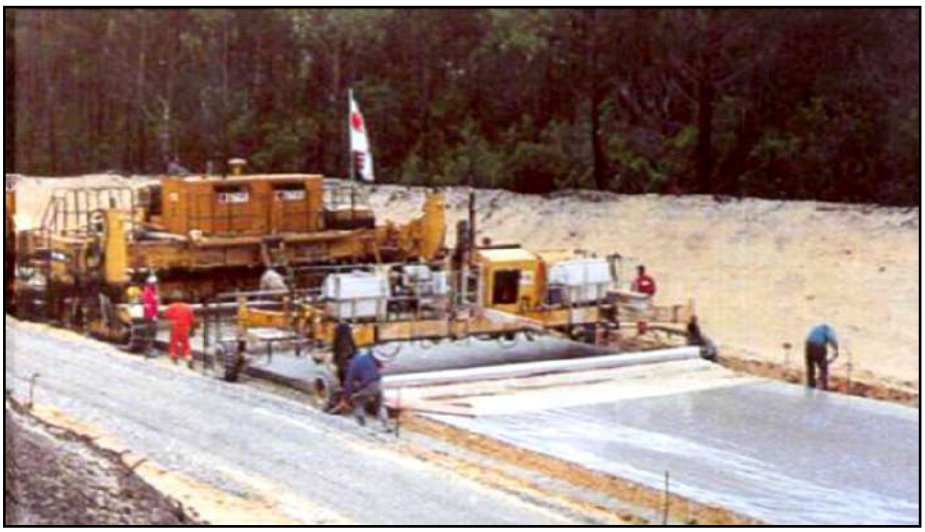


Fig.1.37. Déroulement d'un film polyane (cure) [41]

1.3.7.5 Autres applications

L'utilisation du BS peut s'étaler aux applications spéciales telles que : les ouvrages d'art, l'enrochement artificiel et les accessoires de VRD (Voiries, Routes et Divers). Le BS peut constituer une réponse technique et économique avantageuse pour certains domaines d'ouvrages d'art privilégiant les qualités de maniabilité et d'esthétique. La réalisation des ouvrages d'art nécessite des bétons de hautes performances et très hautes performances. Formuler un BS de hautes performances est évidemment contrarié par l'absence partielle ou totale de gravillons. Mais on peut optimiser le squelette granulaire des granulats du BS par l'utilisation des éléments fins, qui limitent en même temps le rapport eau/ciment sans affecter d'une manière considérable la maniabilité [52].

Dans le domaine de préfabrication d'accessoires de VRD, le BS est plus convenable notamment dans la préfabrication de tuyaux (Fig.1.38), de regards et tout accessoires utilisés dans les canalisations étanches d'assainissement destinés à l'évacuation des eaux usées ou des eaux pluviales (Fig. 1.39). Toutefois, il existe encore d'autres applications qui pourraient trouver intérêt à utiliser le BS tels que : les travaux souterrains (tunnels, galeries, collecteurs,..), les barrages et les travaux portuaires [41].

Cependant, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en BS. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix.

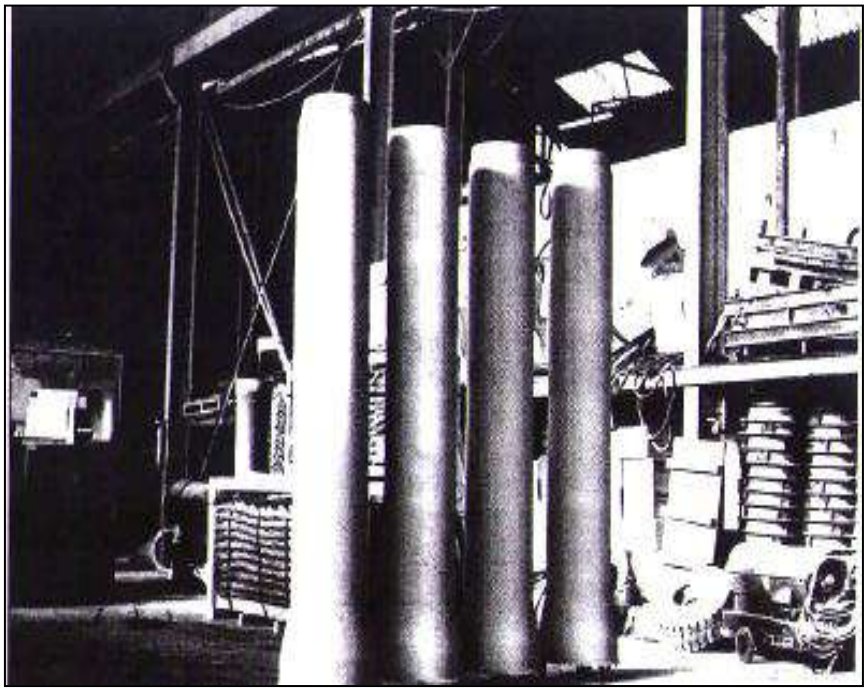


Fig.1.38. Conduite en béton de sable armé [41]

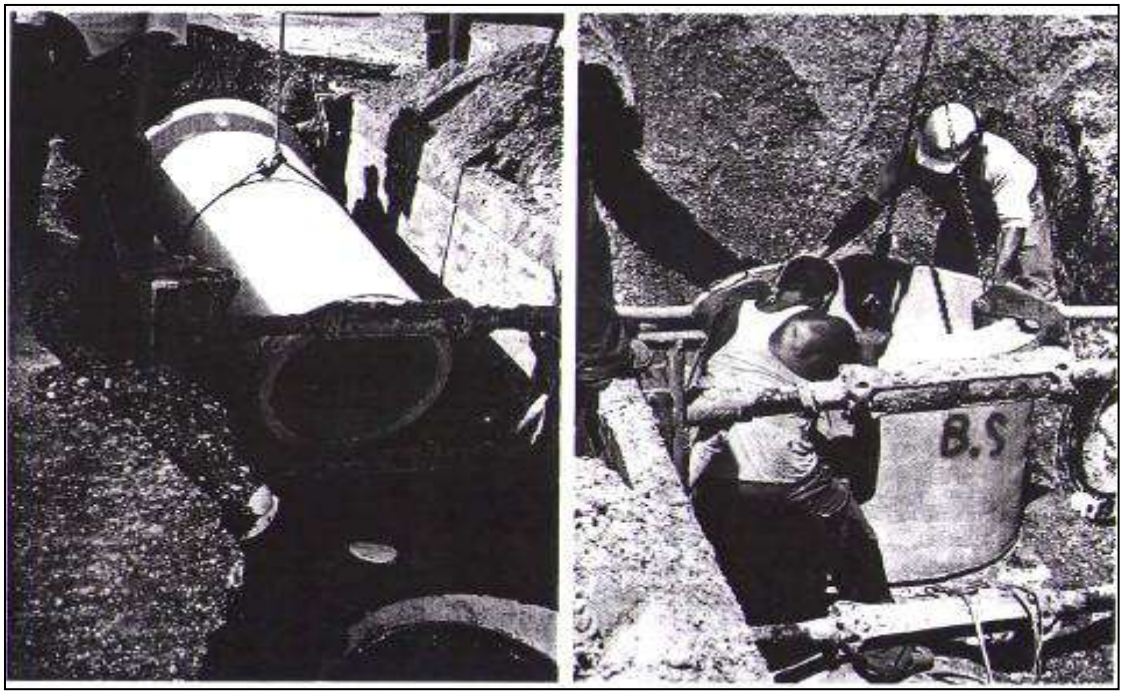


Fig.1.39. Pose de conduite d'assainissement et regards de visite en béton de sable [41]

1.3.7.6 Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégié dans certains cas l'utilisation des BS par rapport aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du BS répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides.

1.3.7.6.1 Béton de sable projeté

La technique de la projection de béton est apparue au début de vingtième siècle aux Etats-Unis et en France. Le domaine d'application de la projection de béton comprend la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes [41].

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines (Fig.4.40). Par sa finesse granulométrique, le BS représente une alternative aux bétons traditionnels, particulièrement dans le cas de présence des ferraillages denses. Le faible taux de perte liée à l'utilisation de BS 20 projeté, sa granulométrie fine et donc sa pompabilité en fait du BS projeté une solution adapté à des problèmes mal résolus par les bétons traditionnels [41].

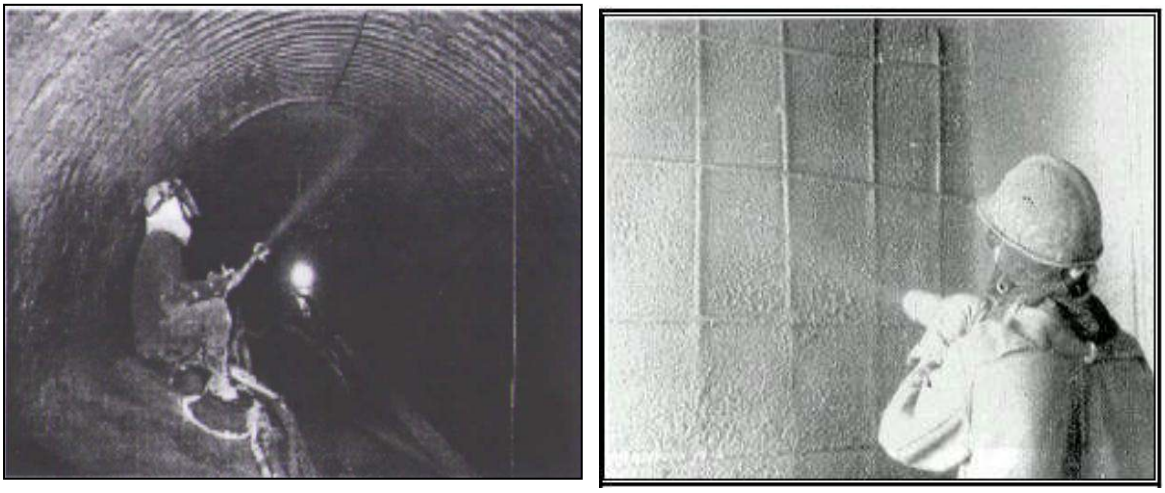


Fig.1.40. Le béton de sable en projection [41]

1.3.7.7.2 Bétons de sable fluides

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BS s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation [53].

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

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

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

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

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

- Risques de ségrégation préjudiciables ;

- Forte densité de ferraillages ;

- Recherche d'un produit fini.

Le BS fluidifié présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les BS nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques [53,54].

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

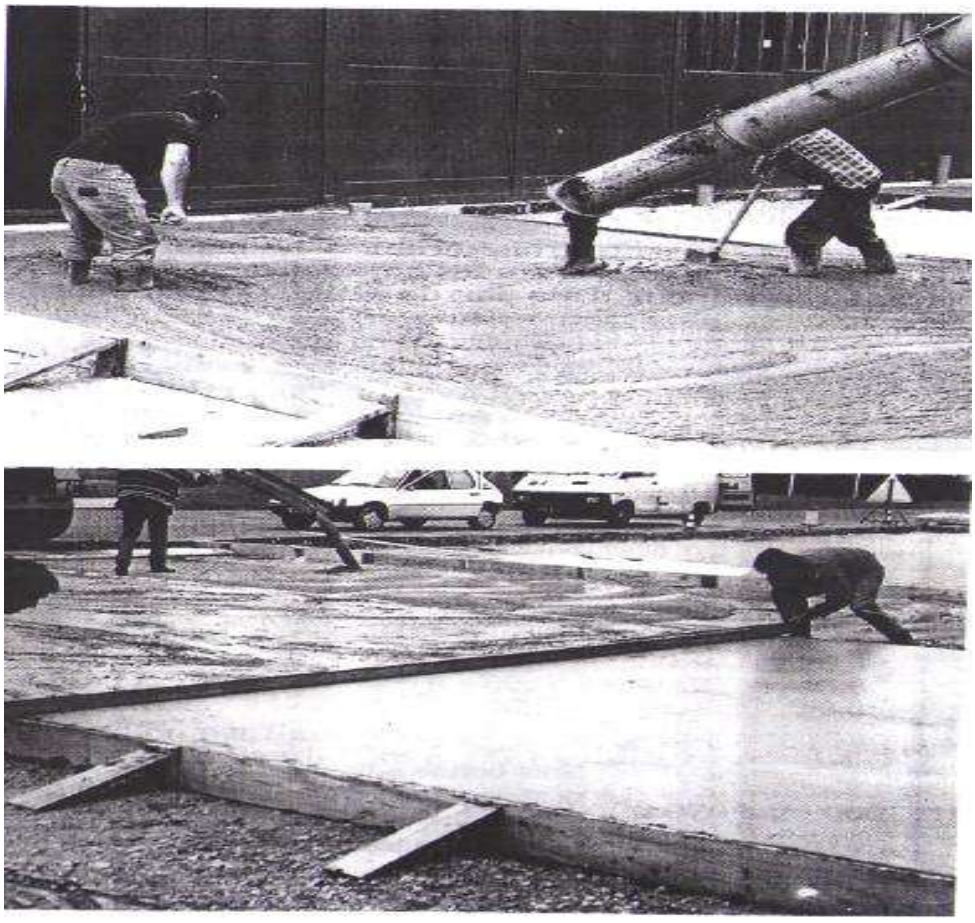


Fig. 1.41. Dallage en BS fluidifié autocompactant (Base aérien de Dijon) [41]

1.3.8 Intérêts et limites des bétons de sables

1.3.8.1 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 oeuvre 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.

1.3.8.2 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 [58].

- **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.

1.3.9 Méthodes de formulation des bétons de sable [41]

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.

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.

1.3.9.1 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).

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

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 :

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

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.1.42).

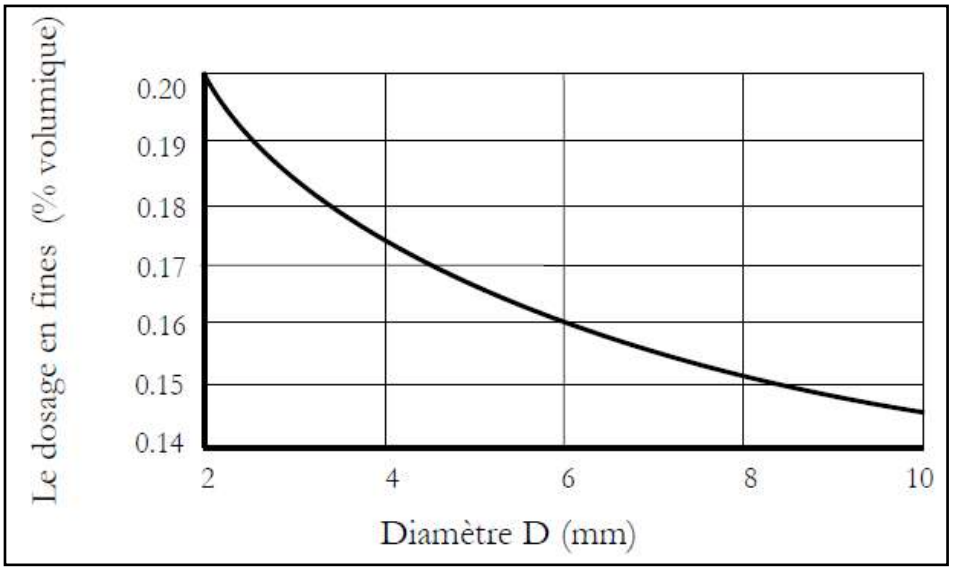


Fig.1.42. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [41]

❖ **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 :

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

Avec:

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

ρ : Densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés: la dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 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 1.43 le montre :

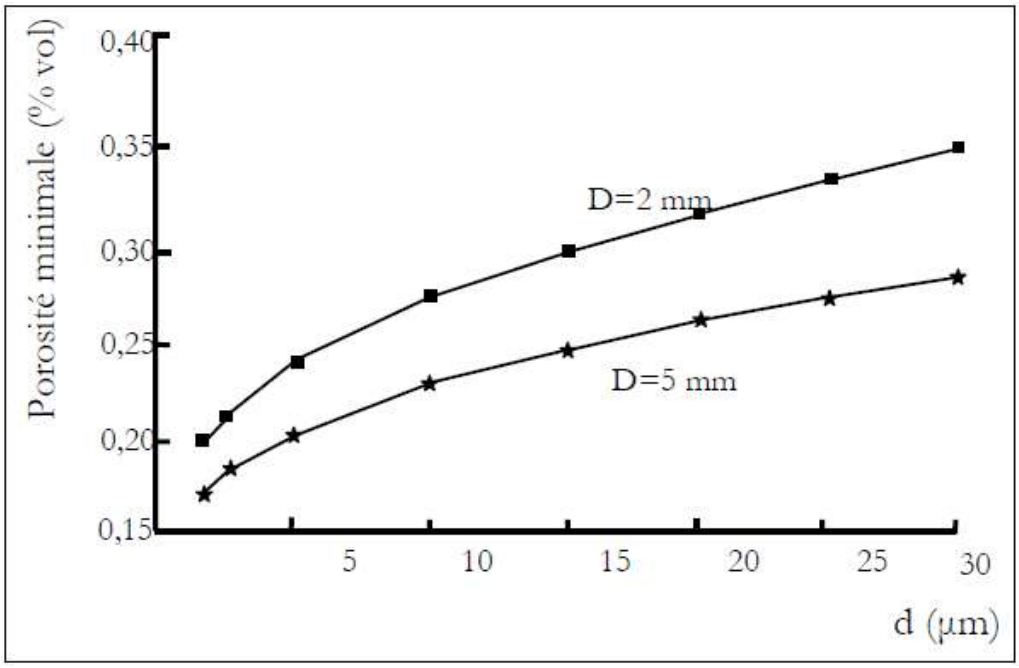


Fig.1.43.Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable [41]

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 1.44 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

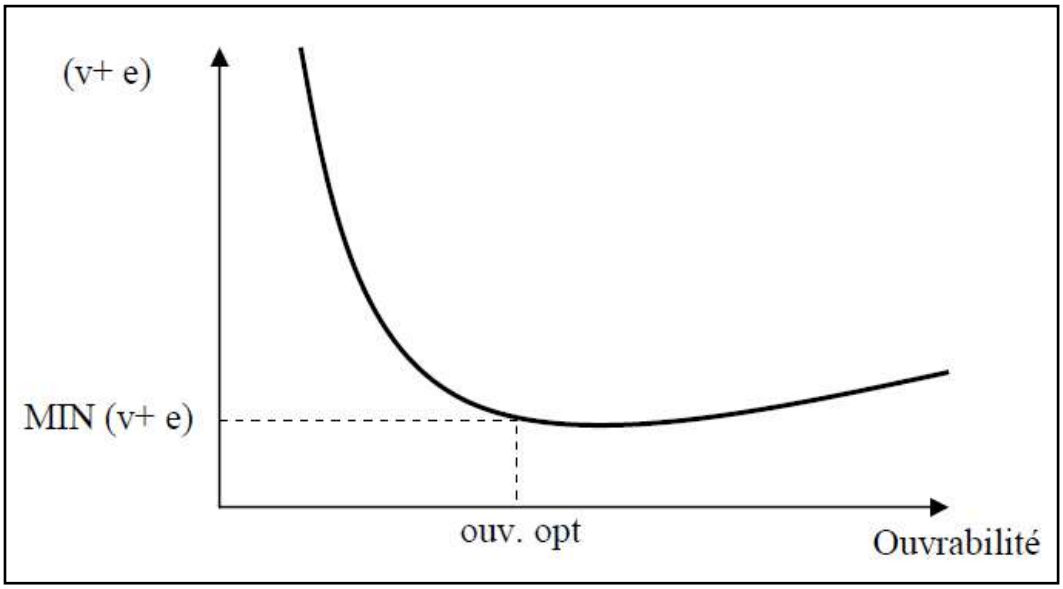


Fig.1.44: Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [41]

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. (Voir figure 1.45.)
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 [55], 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.

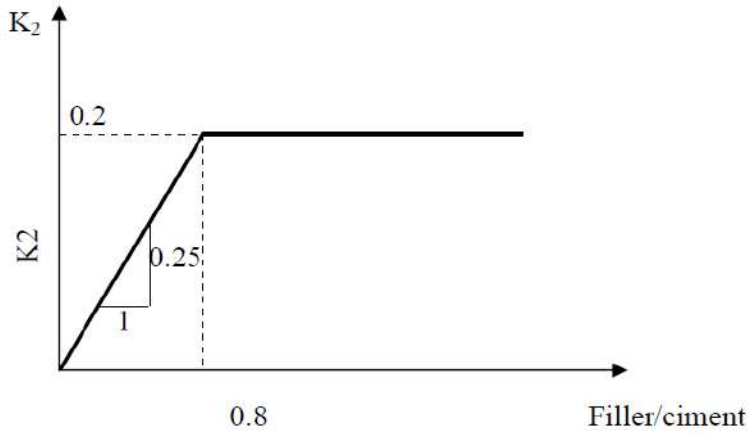


Fig.1.45. Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [41]

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.

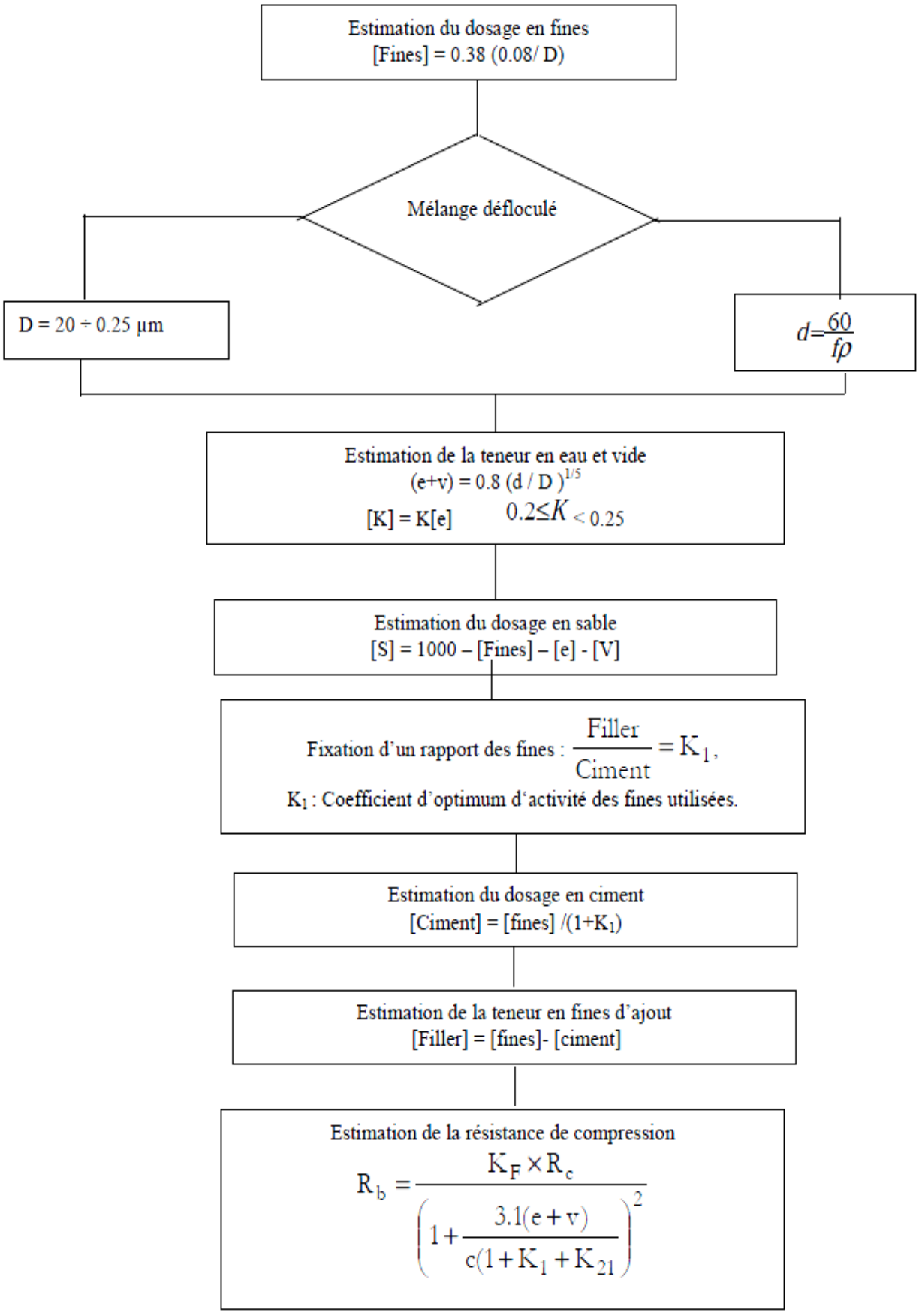


Fig.1.46. Organigramme de la méthode théorique

1.3.9.2 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 [41] .

1.3.9.2.1 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.

$$M_{sable} = MVA * V_{sable} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ (Equation 2.9)}$$

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 :

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

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. Figures 1.47 et 1.48

- **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum 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.

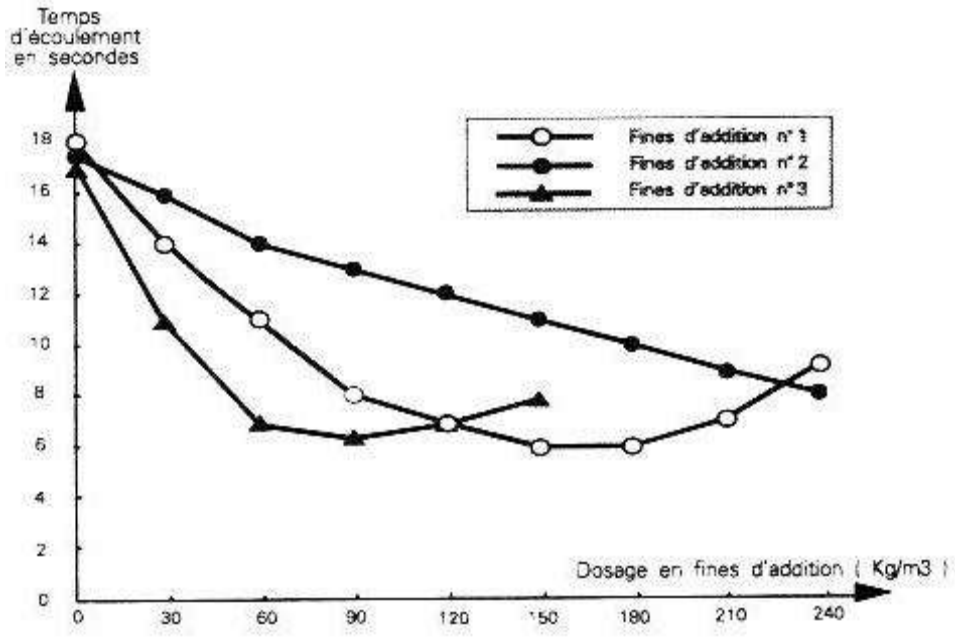


Fig.1.47. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition [41]

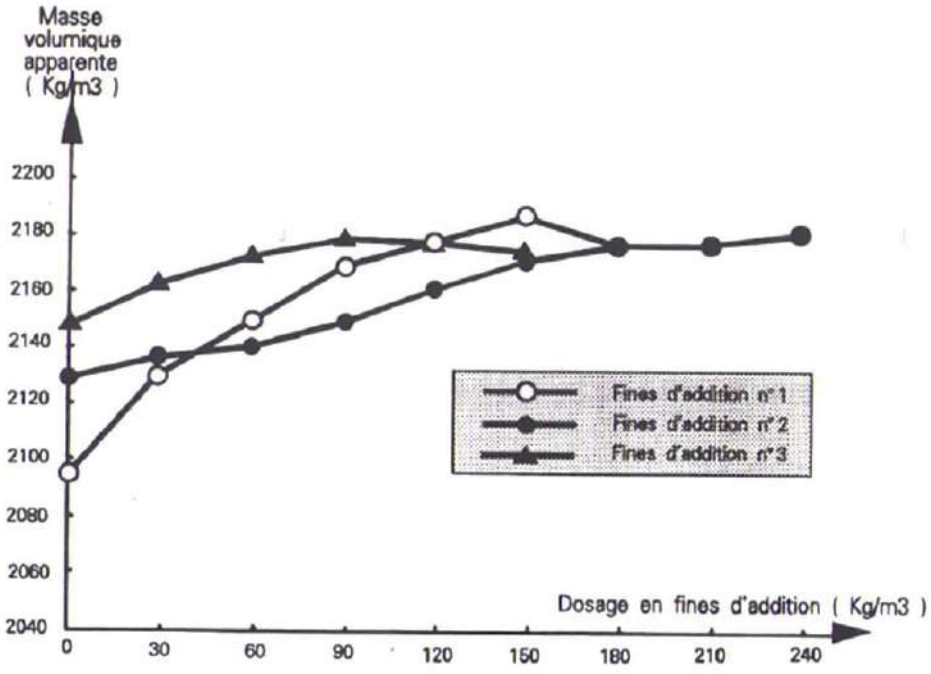


Fig.1.48. masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition [41]

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

Depuis ces vingt dernières années, les déchets en matières ,marc de cafe 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 [60] 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 [61] 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 [61] 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 [60] 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 (**Fig. 1.49** et **1.50**).

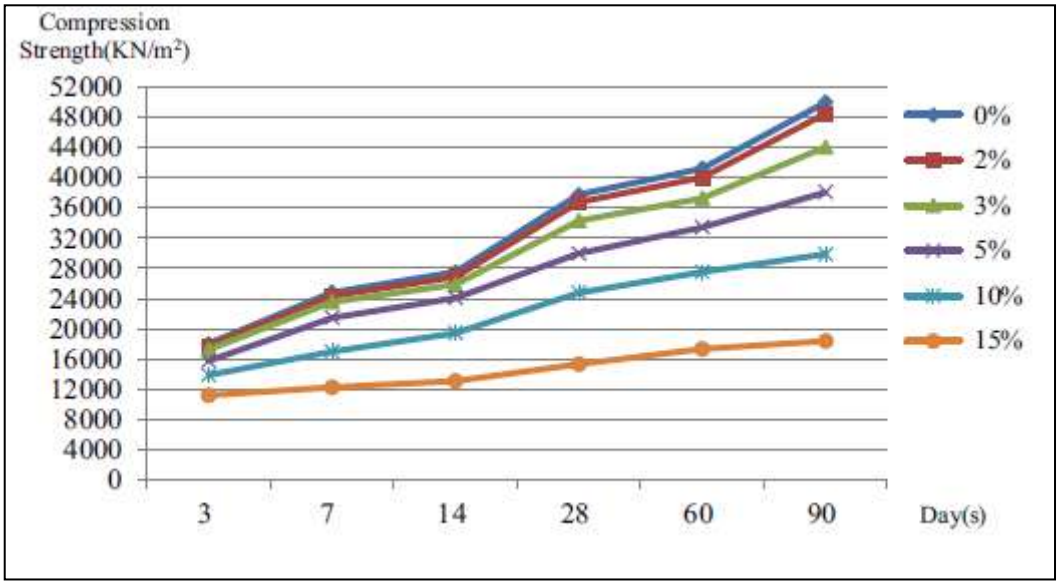


Fig1.49. La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 500°C[60]

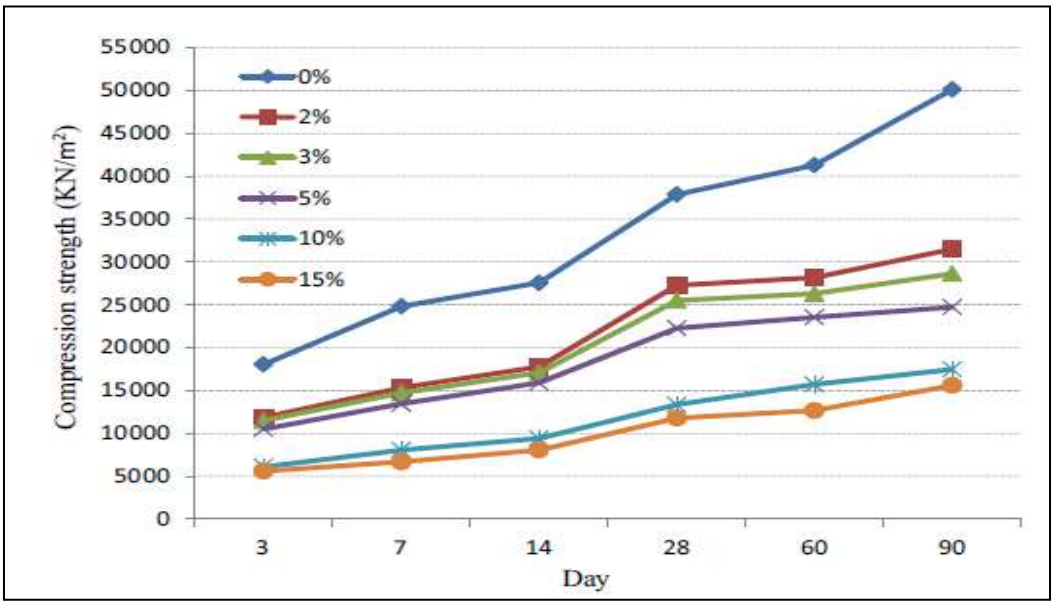


Fig1.50. La résistance à la compression du mortier à base déchets de café chauffé à 600°C[60]

1.5 Conclusion

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter. Cette matière n'est pas banale.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

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 de café (définition, origine, composition, propriétés, utilisation), puis on a terminé ce chapitre par le béton de sable (définition, composition, utilisation, formulation).

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 sale est caractérisé à l'état frais par les essais spécifiques suivants :
- La maniabilité
- La densité

A l'état durci nous avons évalué, la résistance à la compression et la résistance à la flexion aux différents âges, et les propriétés thermique.

En ce qui concerne l'étude de la durabilité, nous avons réalisé les essais suivants :
- L'absorption d'eau par capillarité.
- Les variations dimensionnelles (retrait et gonflement)
-Les variations massique (perte de et gain de masse)

En parallèle, des photos ont été prises pour caractériser l'aspect visuel des bétons de sable à base de différents déchets obtenus.

2.2 Matériaux utilisés

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

2.2.1 Les sables

L'Algérie, comme beaucoup d'autres payé du monde, notamment dans les zone désertiques, dispose de grands gisements de sables, dunaires et alluvionnaires. Ces sables restent toujours non ou très peu exploités dans la construction. Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, deux sables différents ont été séparément utilisés :

a) Sable de BAHBAH :

Le premier sable utilisé est un autre sable de dune mais provient de la région de HASSI BAHBAH située au nord de la wilaya à 50 km de Djelfa à plus de 250 km au sudd'Alger.

b) Sable de concassage :

Le deuxième type sable utilisé 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[63], 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 autres caractéristiques physiques de ces sables sont regroupées dans le tableau 2.1. 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[64]) 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 [63]
Masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.58	2.50	NF EN 1097-6 [65]
Masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.42	1.40	NF EN 1097-3 [66]
Equivalent de sable (%)	65.00	75.00	NF EN 933-8 [64]
Coefficient d'absorption d'eau (%)	0.5	1.5	NF EN 1097-6 [65]
La compacité (%)	55.03	56	NF EN 1097-3 [66]
La porosité (%)	44.97	44	NF EN 1097-3 [66]

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)

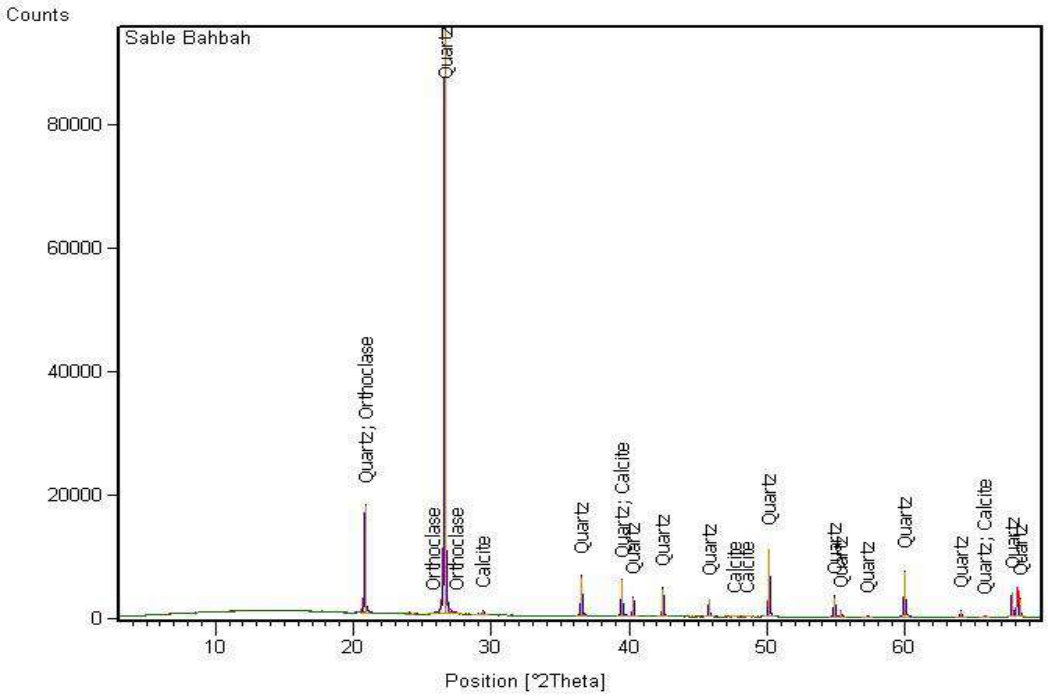


Fig. 2.2. Analyse par DRX de sable de BAHBAH

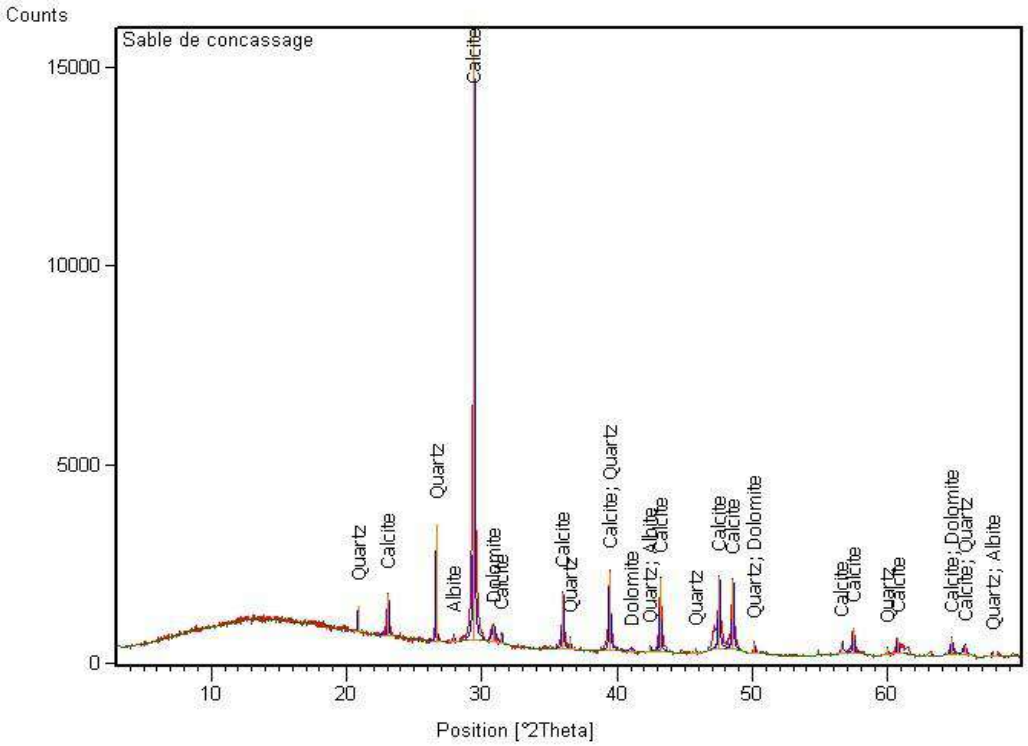


Fig. 2.3. Analyse par DRX de sable de Concassage

2.2.2 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est le ciment portland composé ‘’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 [67].



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

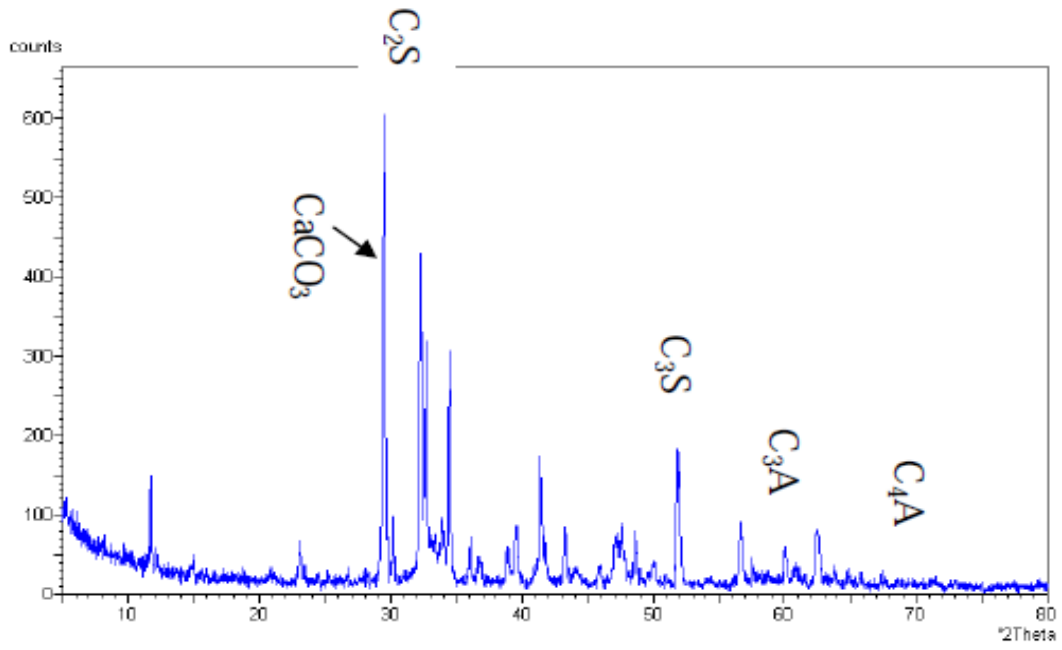


Fig.2.5: Diagramme de DRX appliqué sur le CEM II/B 42.5 MATINE.

2.2.3 Filler calcaire

Les fillers utilisées dans notre cas sont de nature calcaire. Ils sont obtenus par le broyage de roche calcaire (Fig. 2.6). Leur caractéristique physique est mentionnée dans le tableau 2.5 et l'analyse chimiques dans le tableau 2.6.

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 ($CaCO_3$).

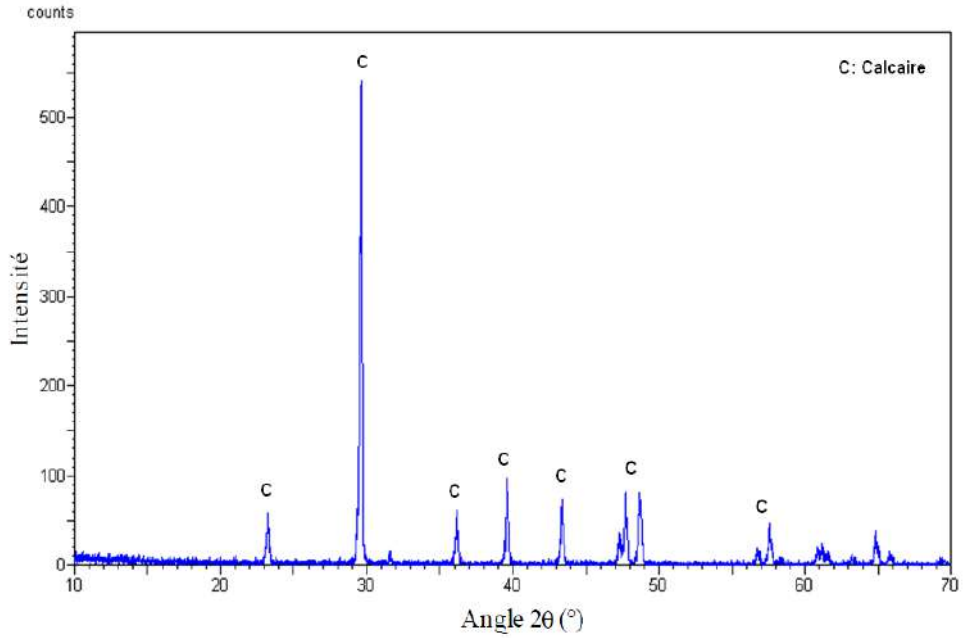


Fig. 2.7. Analyse par DRX du filler calcaire utilisé

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. MEDAFLUID 104 permet de diminuer le rapport eau/ciment (E/C) environ 6 à10%, tout en améliorant la plasticité du béton. La plage de dosage recommandée du MEDAFLUID 104 est de 0.3 à 1.5 % du poids de ciment.



Fig.2.8: Le type d'adjuvant Utilisées

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

Déchets de café recyclé sous forme d'une poudre (Fig. 2.9**)** légers, leur densité est inférieure a celle de l'eau, obtenus par la 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

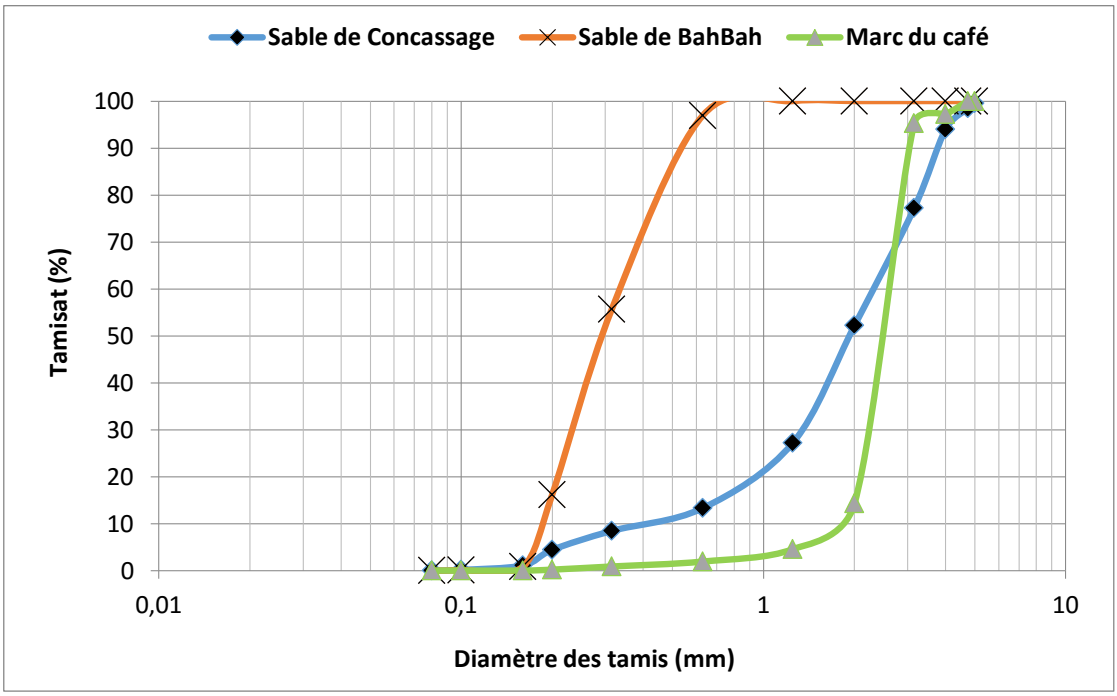


Fig.2.10 L'analyse granulométriques des sables et Marc de café utilisés

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 [41]. 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

Elle 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 [68]. La consistance est caractérisée par le temps que met le BS pour s'écouler sous l'effet d'une vibration (Fig. 2.12).L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre LCL (B).Il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (7.5cm x 7.5cm x 15cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibrateur et muni d'une cloison amovible.

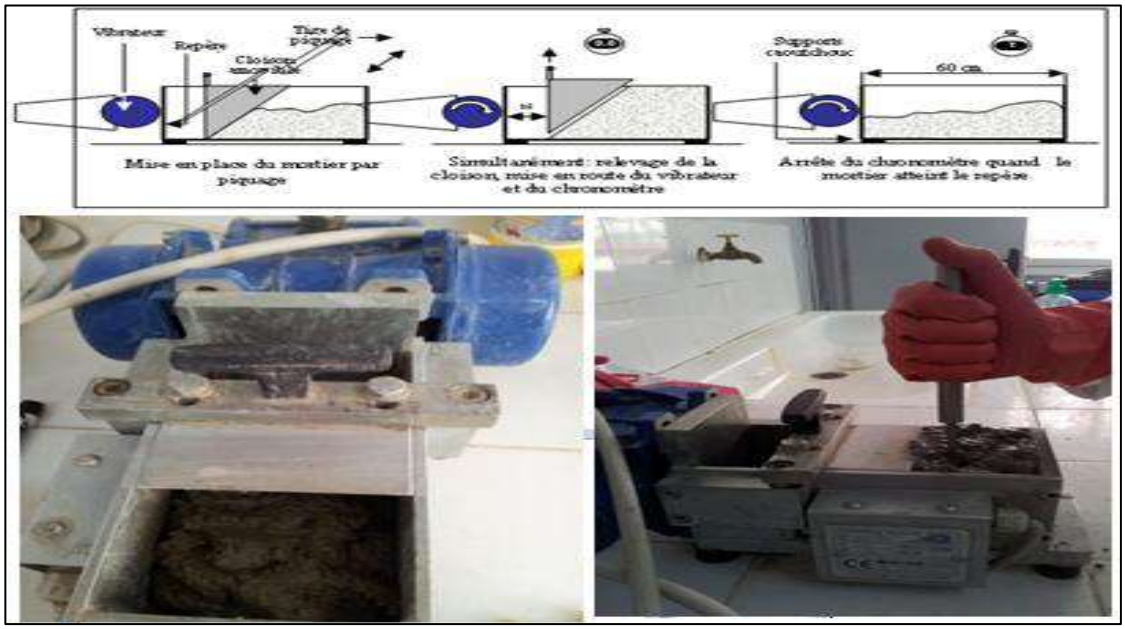


Fig. 2.12: Mesure de la maniabilité du béton de sable

2.5.2 La densité

La masse volumique du béton de sable a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6[69] (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 métalliques de forme prismatiques 4x4x16 cm destinées aux essais de compression et traction par flexion et de variation dimensionnelles, ainsi que des éprouvettes 4×10×10 cm destinées pour les essais thermiques conformément à la norme NF EN 12390-2 [70]. Tous les éprouvettes confectionnées ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibrationq a table a secouse(Fig.2.14).



Fig. 2.14 : Fabrication des éprouvettes

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon deux modes différents : à l'air libre d'un climat moyen (laboratoire) (Fig.2.15**)**, et dans l'eau à 20°C ± 2°C (Fig. 2.16) .



Fig. 2.15. Conservation des éprouvettes à l'air libre



Fig. 2.16 . Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20°C ± 2°C

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

Les essais de caractérisation sur béton de sable durci sont résumes dans le tableau 2.10 suivant :

Tableau 2.10. Essais sur bétons de sable durci

Essais	Appareil	Dimension (cm)
Traction	La Presse hydraulique	4x4x16
Compression		
La conductivité thermique	CT mètre	4×10×10
Retrait + gonflement	déformètre	4x4x16
Variation massiques	Balance	
Capacité d'absorption d'eau	Essaie d'absorption	demi-prisme 4x4x16

2.7.1 Essais de traction par flexion

Selon la norme [EN 196-1] [71] c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Fig. 2.17), une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L. Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 7, 28 et 90 jours.

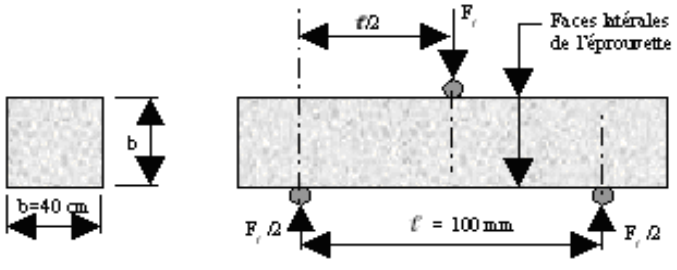


Fig.2.17. Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

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

$$\sigma t = (M / I)\ \nu \ldots\ldots \text{(Equation 4.1)}$$

Avec :

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

$$M = F_f\ L/4 \ldots\ldots \text{(Equation 4.2)}$$

I : Moment d'inertie de la section transversale :

$$I = a^4/12 \ldots\ldots \text{(Equation 4.3)}$$

ν : La distance de la fibre la plus éloignée :

$$\nu = a/2 \ldots\ldots \text{(Equation 4.4)}$$

La résistance à la traction par flexion est calculée donc par la formule suivante :

$$\sigma t = (1.5Ff\ L)/\ a^3 \ldots\ldots \text{(Equation 4.5)}$$

Et ;

$$ft_{28} = 0.9\ Ft.L\ /\ a^3 \ldots\ldots \text{(Equation 4.6)}$$

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la (Fig. 2.18).



Fig.2.18. Essais de traction par flexion

2.7.2 Essais de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] [71] par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm (Fig. 4.19), 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] [72]. Pendant l'essai la vitesse de chargement est constante, la résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai (7j, 28j, 90j).

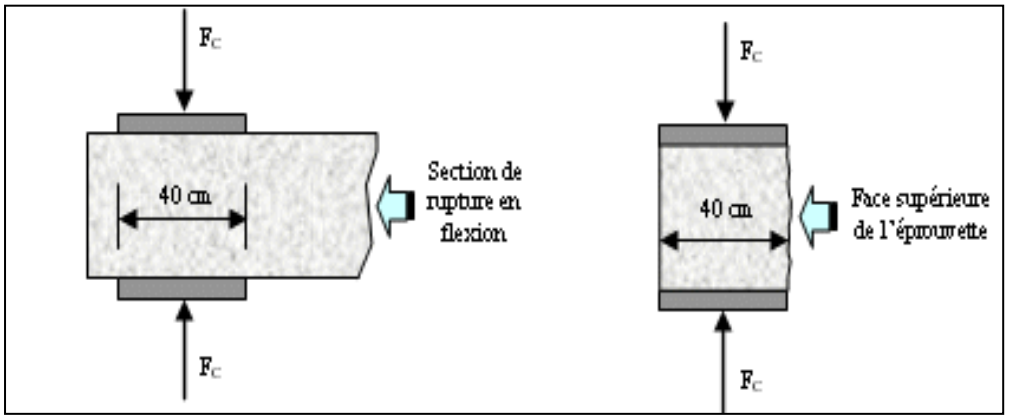


Fig.2.19. Dispositif de rupture à la compression

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 :

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

R_C: Résistance à la compression en (MPa);

F_C: Charge de rupture en (N);

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



Fig.2.20. Essais de compression

2.7.3 Les Propriétés thermiques

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer les propriétés thermiques (conductivité thermique, chaleur spécifiques, diffusivité thermique) des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesuré à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme ISO 8497-1 [73]**.**

- La **conductivité thermique** est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ, Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre [74]. Elle s'exprime en W/m°C. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant [75].

  De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Plus la conductivité thermique est grande, plus le matériau est conducteur, plus elle est petite, plus le matériau est isolant.
- La **chaleur spécifique** d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1K la température de l'unité de masse de ce corps La chaleur massique s'exprime en J. g-1. K-1 ou kJ.kg-1.K-1.

- La **diffusivité thermique** détermine l'inertie thermique d'un matériau, c'est-à-dire sa prédisposition à garder longtemps sa température initiale lorsqu'intervient une perturbation de cet équilibre thermique. Si la perturbation l'amène vers une nouvelle température d'équilibre, cette inertie thermique représente la "lenteur" avec laquelle ce nouveau point d'équilibre est atteint.

Physiquement, la diffusivité thermique exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Par conséquent, plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible et plus la chaleur met de temps à le traverser.

❖ Dans notre travail, nous avons étudié et tester les propriétés thermiques des bétons de sables à base du Marc de café par l'utilisation de l'appareil **''CT METRE''**.

- **Le CT METRE Norme de référence NF EN 993-15**

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.

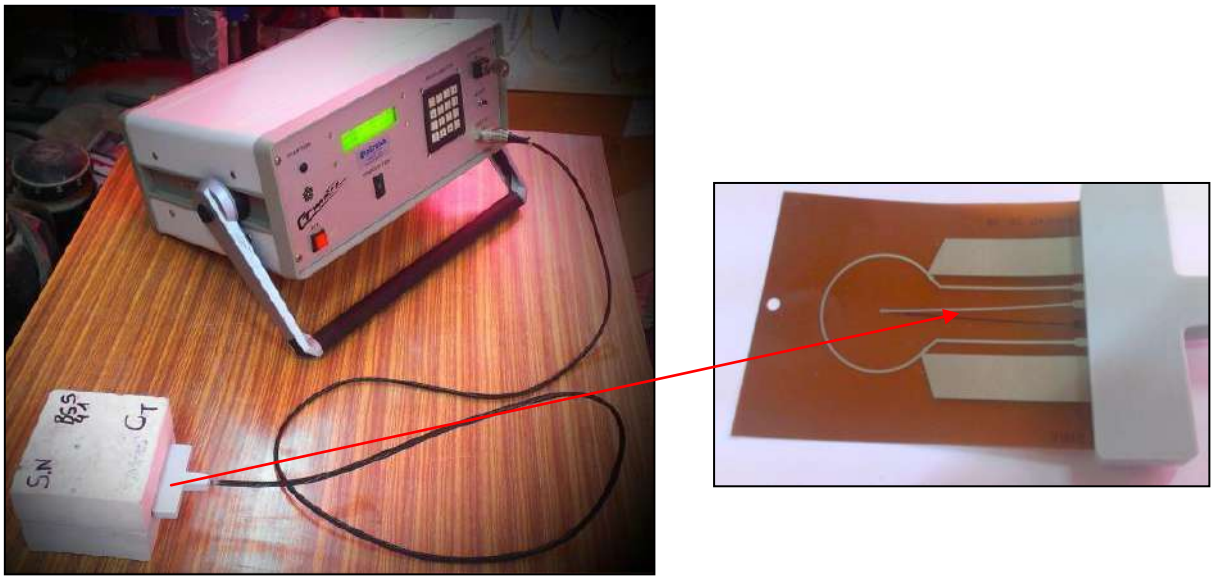


Fig.2.21: Le CT-mètre et ses composants

2.8. Essais sur l'approche de durabilité

❖ Absorption capillaire

Dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de béton de sable déjà utilisé puis sécher. On le pesé (m_0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5mm d'eau)(Fig. 2.22), et pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (m_1), le différent de poids entre m_1 et m_0c'est le poids de l'eau absorbé (m_1- m_0) (NBN NE 13057) [76].

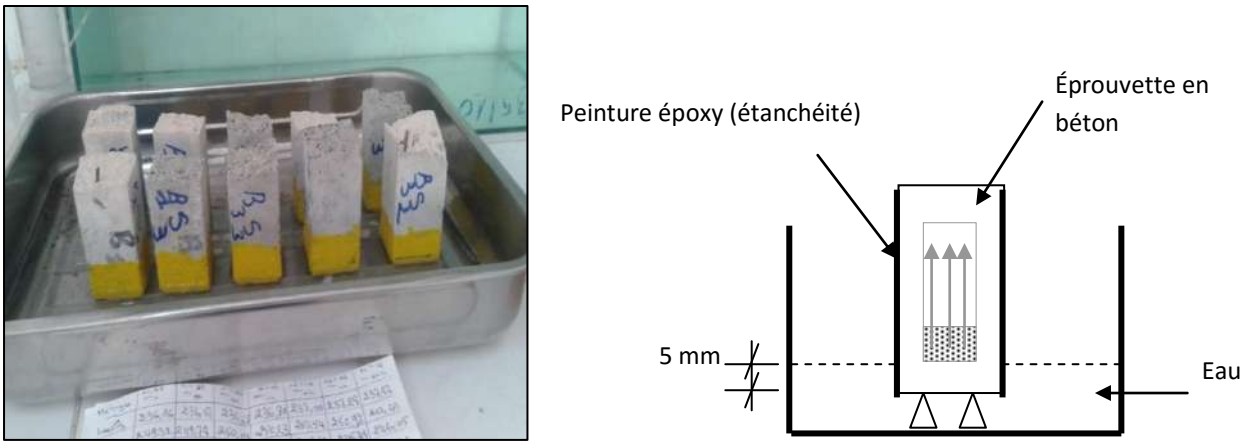


Fig.2.22 : Absorption d'eau par succion capillaire.

❖ Les variations dimensionnelles

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton. Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton [77].

Les mesures du retrait à l'air libre et gonflement sous eau ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16cm^3 conformément à la norme [NF P 18-404] [78]. Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un déformètre (Fig. 2.23) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait et gonflement à tout moment à cours terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 300 jours). La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C pour l'essai de retrait, et dans l'eau à 20°C ± 2°C pour l'essai de gonflement.



Fig.2.23. La mesure à l'aide de déformètre

❖ **Mesure des variations de longueur**

La mesure a lieu, l'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. Si, d'une mesure à l'autre, la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03mm celle de l'éprouvette ayant la variation la plus voisine, il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact de scellement des plots,… etc.).Et si elle ne peut être éliminée, l'éprouvette doit être rebutée.

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar et protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations) (Fig. 2.24).

❖ **Mesure des variations de masse**

Si, en plus de retrait, on désire mesurer la variation de masse, pesé à 0.1g prés l'éprouvette à chacun des temps ou est effectuée une mesure de longueur. (Fig. 2.25).

➢ **Expression des résultats**

Pour chaque éprouvette on calcul les rapports suivants:

$\Delta \mathbf{L}$: Variation de longueur par apport à la longueur origine,

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

$\Delta \mathbf{M}$: Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

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

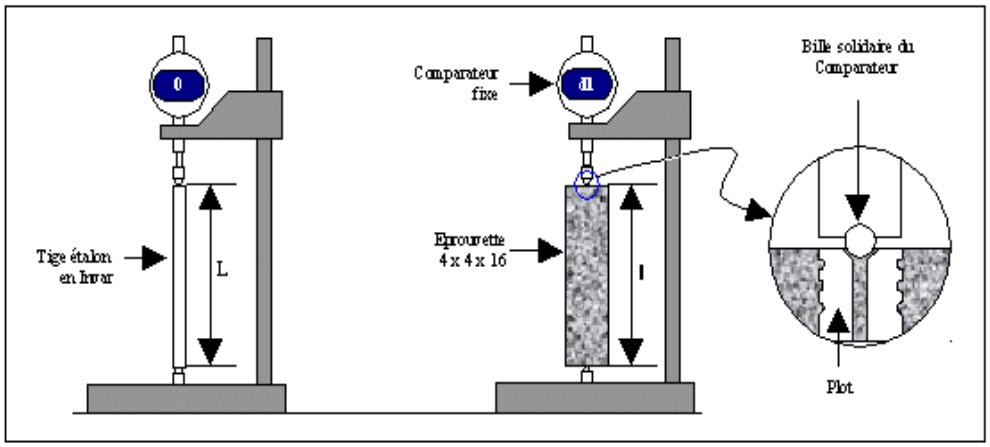


Fig.2.24. Principe de mesure du retrait et gonflement



Fig.2.25. Mesure des variations de masse

- **Conduite de l'essai**

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

$$\because \quad l = L + dl(t) \qquad \text{……(Equation 4.9)}$$

Soit l (t_0) la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera:

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \quad \text{.....(Equation 4.10)}$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad \text{.....(Equation 4.11)}$$

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

2.9 Variables étudiées

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

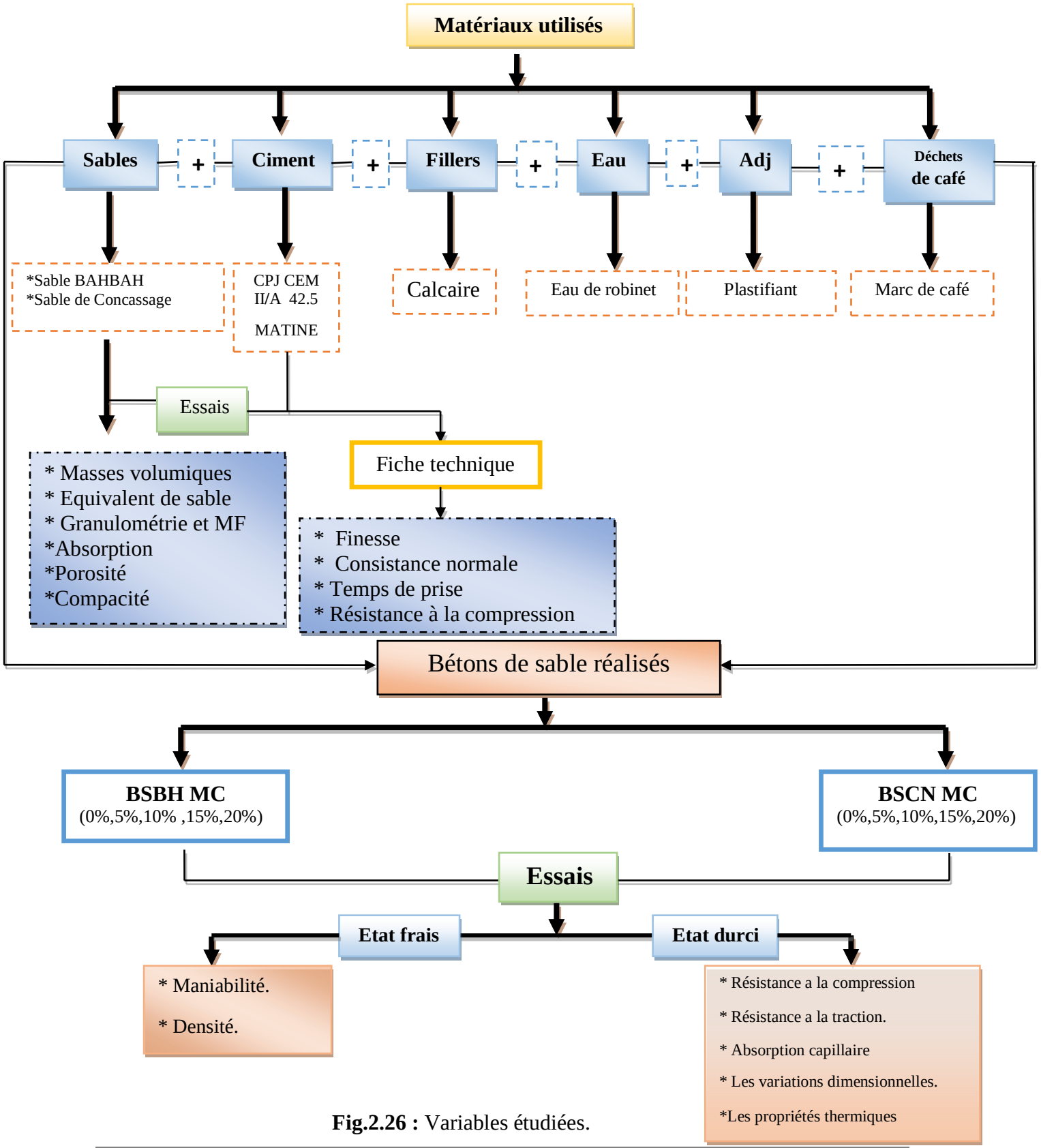


Fig.2.26 : Variables étudiées.

2.10 Conclusion

L'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels recyclé dans la fabrication du BS est constitué une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. 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 physique et chimique des matériaux utilisés dans les compositions des BS ;

- La méthode de formulation utilisée, cette méthode appelée méthode expérimentale de projet 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.

- Pour évaluer la durabilité du BS à base de Marc de café, nous avons choisi les essais de l'absorption d'eau, les variations dimensionnelles (retrait et gonflement), les variations massique (perte et gain de masse), la résistance au feu (perte de masse et résistance à la compression).

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 touts les types des bétons de sable à base du Marc de café (BS MC), sont peu compacts par rapport au béton de sable témoin (BST) et présentent une difficulté de mélange en fonction du pourcentage et de substitution du sable par le Marc de café (Fig. 3.1). Ce dernier joue un rôle d'obstacle dans le mélange (grâce a son forme angulaire) et présente une certaine absorption d'eau l'hors du malaxage ce qui mène à la diminution de la maniabilité. Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [60] dans ce domaine, et qui ont trouvés aussi que l'incorporation de déchets de café entraîne une diminution de la maniabilité

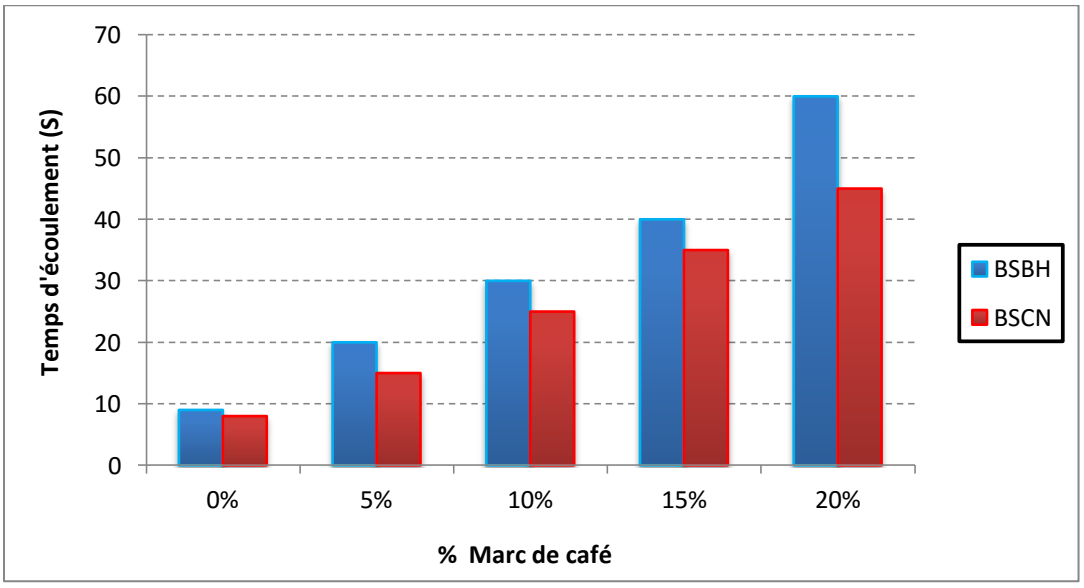


Fig. 3.1 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café

Pour pouvoir comparer les résultats à l'état durci, nous avons varie la quantité d'adjuvant (plastifiant) utilisé 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).

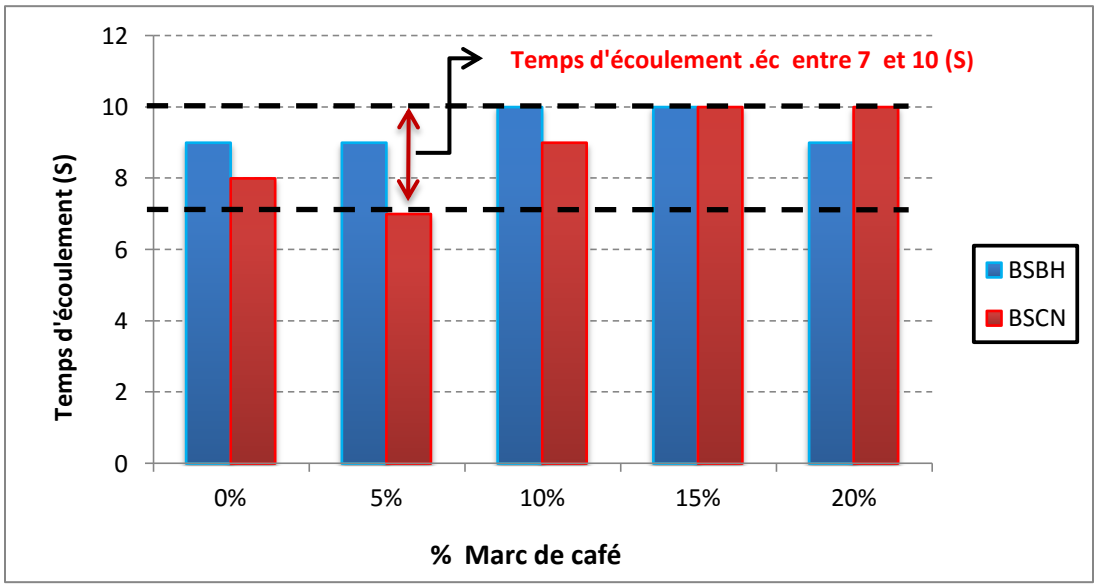


Fig. 3.2 Temps d'écoulement des Bétons de sable à base du Marc de café après réglage

3.2.2 La densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans la figure suivante :

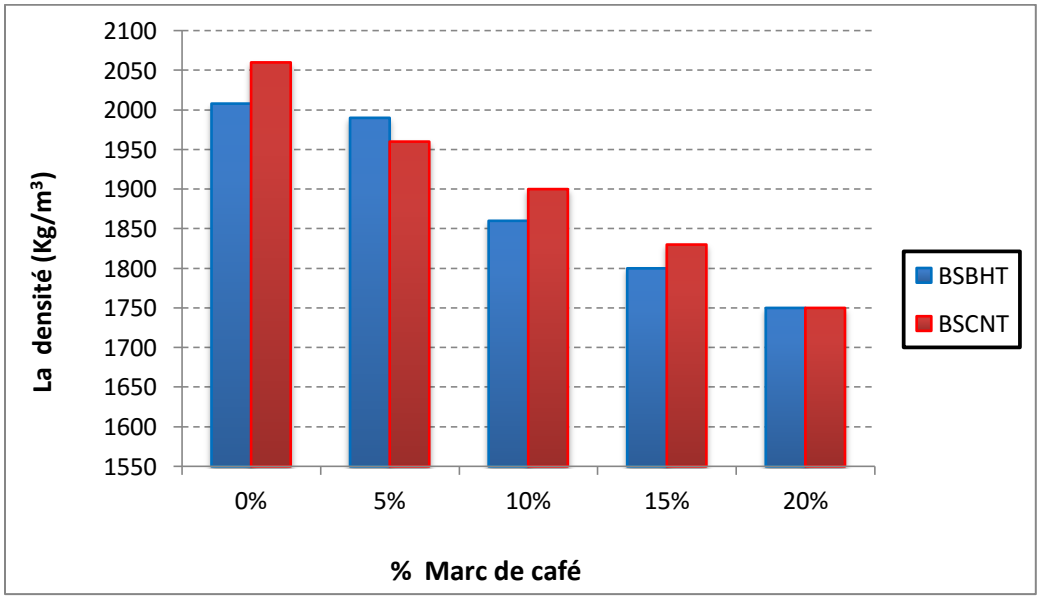


Fig. 3.3 La densité des Bétons de sable à base du Marc de café

Les figures précédentes 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. Ce résultat est logique et attendu, parce que la densité du MC est plus faible que celle du sable substitué, et ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [60].Link et al [61] ont aussi trouvé que la densité du béton ordinaire est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets de café incorporés.

3.3 Béton durci

De la même façon que le béton frais, les résultats des différents essais réalisés sur béton durci sont résumés comme suit :

3.3.1 Résistance à la compression

Pour chaque essai, les résultats est la moyenne de 3 mesures prisent sur 3 éprouvette à l'âge de 7 et 28 jours. Les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

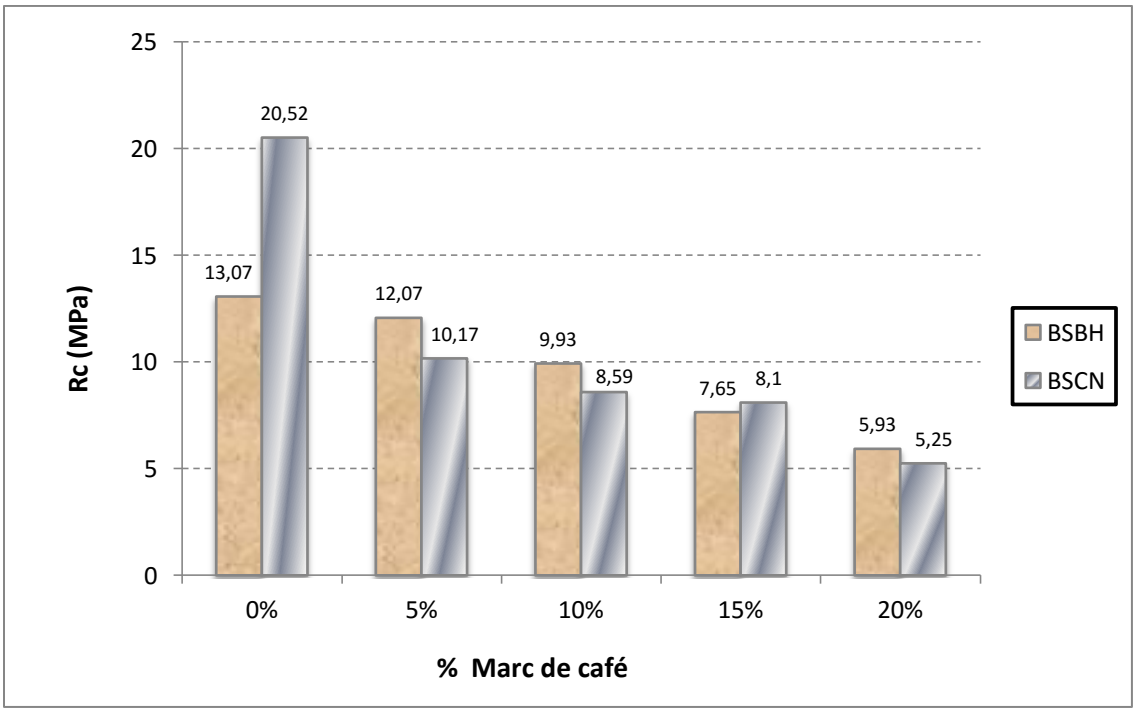


Fig.3.4 : Résistance à la compression des BS à base du Marc de café à l'âge de 7 jours

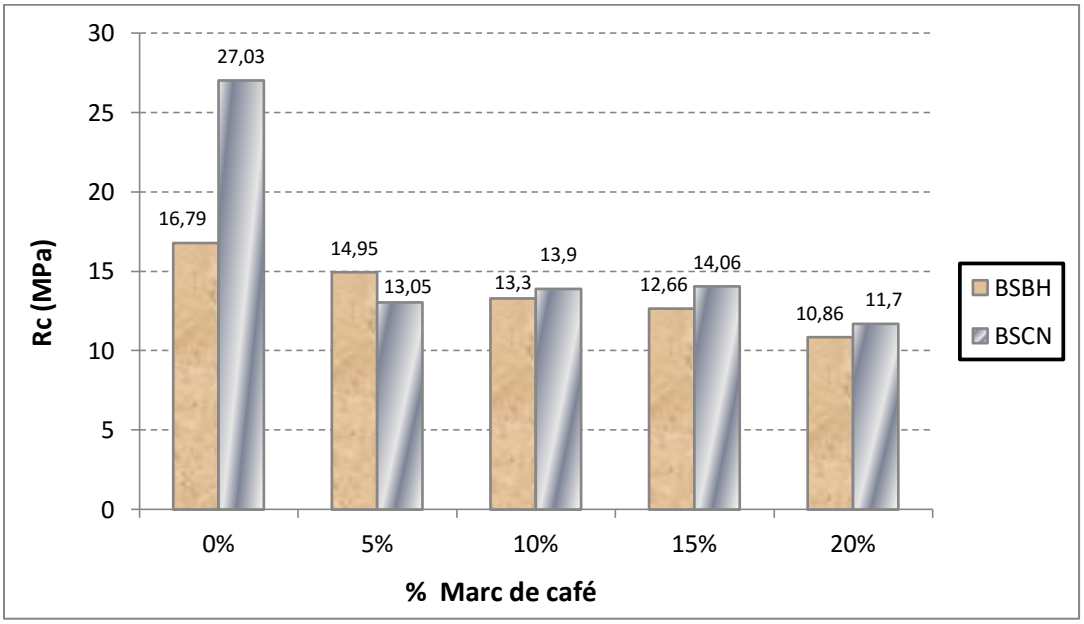


Fig.3.5 : Résistance à la compression des BS à base du Marc de café à l'âge de 28jours

D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance à la compression des différents bétons de sable augmente en fonction de l'âge et suit la même cinétique que celle du béton de sable de référence. Les figures précédentes montrent aussi que quelques sois l'âge du béton, la substitution du sable par la Marc de café influe négativement sur la résistance à la compression de tous les types de béton de sable réalisés. La dégression de la résistance à l'âge de 28 jours est estimé à 35% pour les BSBH, et 57 % pour les BSCN. Cette chute semble être logique et attendue parce que le grain du MC est plus faible que celle du sable, et par conséquent donne naissance à un produit moins résistant, ainsi que à la porosité plus élevé des BS à base de MC qui est due à la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et MC. Les figures 3.8 et 3.9 montrent que la structure des BS à base de déchets du Marc de café est moins homogène, plus poreux et moins compacte que celle du BS de référence. Ce qui confirme les résultats de Link et al [61]. Lee et al [60] ont étudié l'influence de substitution du ciment avec les déchets de café traité et non traité. Ils ont constaté que quelque soit le type de déchets incorporé la résistance à la compression est diminué en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de café.

Une relation polynomiale, représentée graphiquement sur les Figures 3.6 et 3.7 a été trouvée entre la résistance à la compression et la densité. On constate que la résistance la compression est diminuée considérablement en fonction de la densité.

Enfin, on note d'après ces résultats que les BSCN présentent les meilleurs résultats que celle des BSBH grâce à sa bonne classe granulométrique et à sa porosité moins élevé. Par contre les bétons de sable de dune (BSBH) présentent des résistances moins importantes, et cela est dû à ses granulométries très fines et ses porosités très élevées, ce qui donne des BS moins compacts que ceux qui sont fabriqués à base de sable concassage. Sur cette base, ce type de béton est recommandé à l'utilisation dans les éléments en béton non structuraux n'ayant pas un effet sur la stabilité de structure (pavé en béton, buse de l'assainissement, caniveaux, regards...etc).

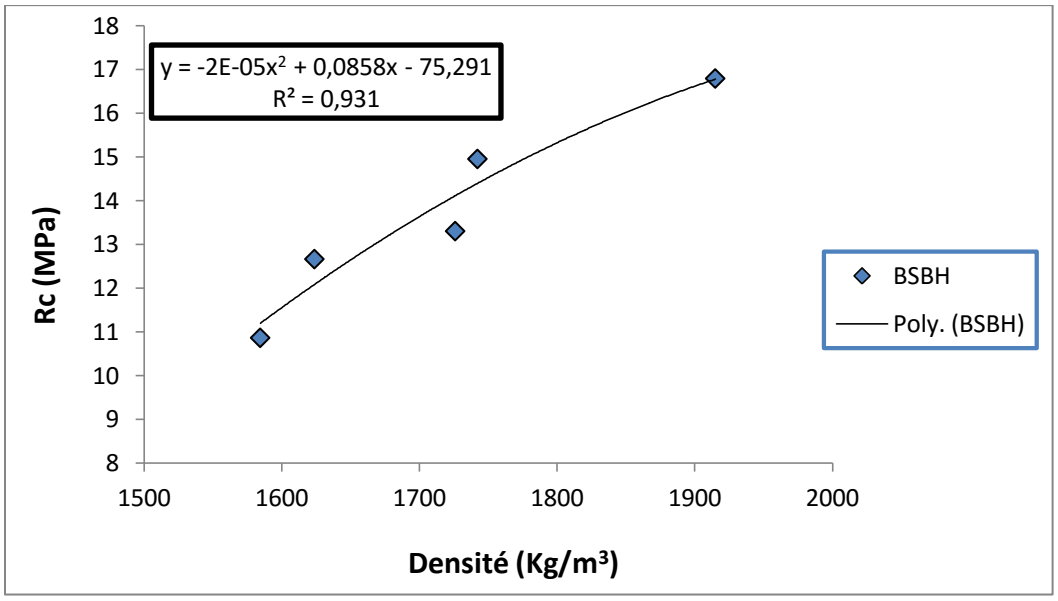


Fig. 3.6. Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSBH MC

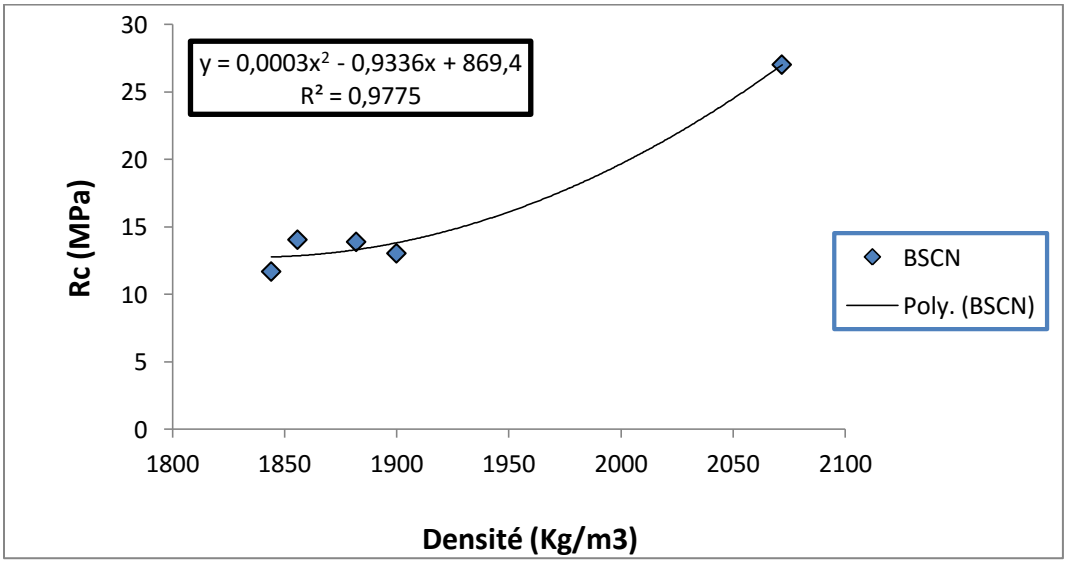


Fig. 3.7. Corrélation entre la résistance à la compression et la densité des BSCN MC



Fig .3.8. Visualisation de l'interface des BSBH MC



Fig.3.9. Visualisation de l'interface des BSCN MC

3.3.2 Résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence ciment / grains. L'analyse des résultats est faite de la même façon que la résistance à la compression.

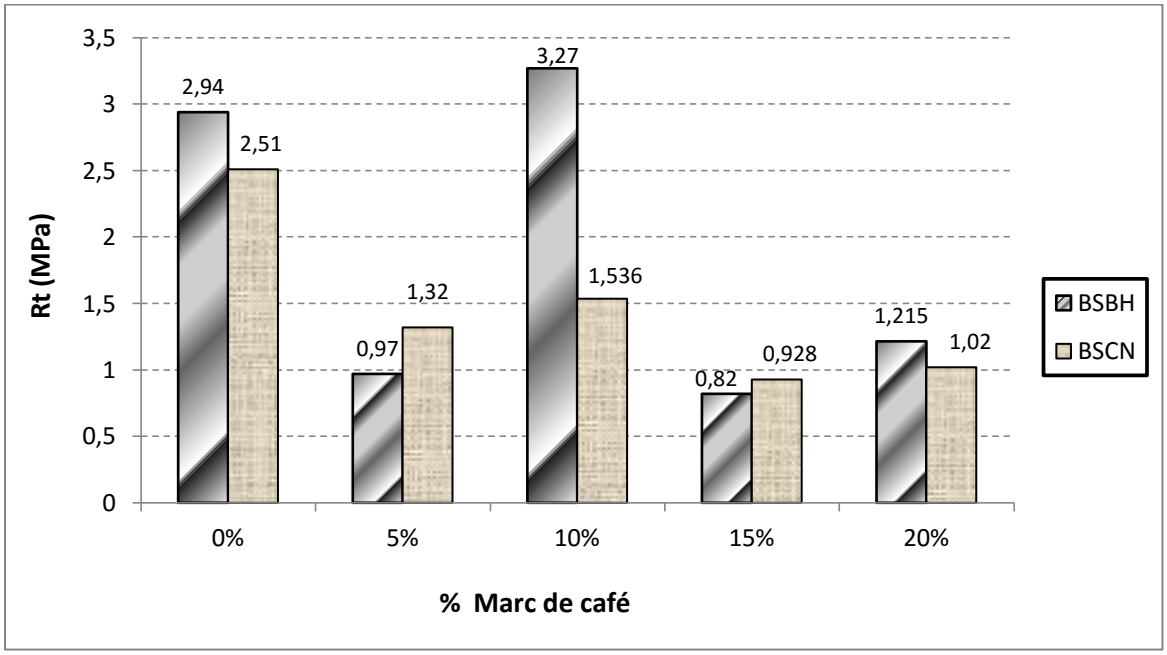


Fig.3.10: Résistance à la traction par flexion des BS à base du Marc de café à l'âge de 7 jours.

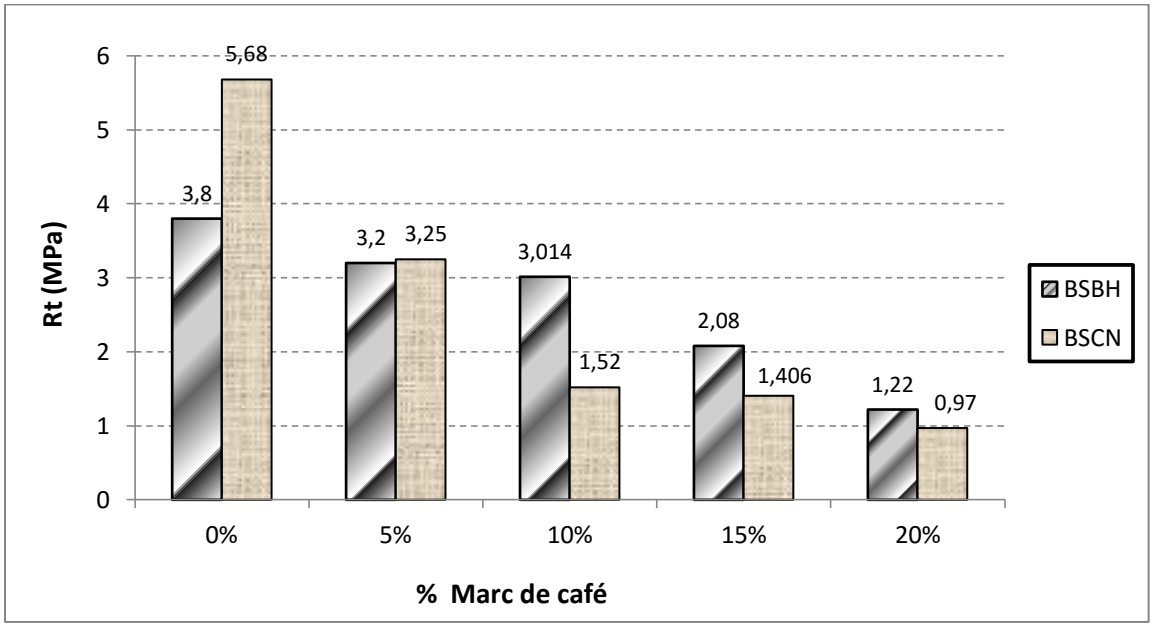


Fig.3.11: Résistance à la traction par flexion des BS à base du Marc de caféà l'âge de 28 jours

Les résultats obtenus montrent que la substitution du sable par le Marc de café engendre une diminution considérable de la résistance à la traction par flexion pour tous les âges réalisés. La dégression à l'âge de 28 jours est estimé à 68 % pour le BSBH, 83% pour le BSCN. Cette chute est due à la porosité plus élevé de tous les BS à base de MC par rapport au BS de référence, ainsi que la mauvaise adhérence entre la matrice cimentaire et le grain de MC. Ce qui est en concordance avec d'autres auteurs [62] qui ont trouvé des chutes des résistances a la flexion des mortiers qui contient (5%,10% 15% et 20%) des déchets de café.

Une relation polynomiale, représentée graphiquement sur les Figure 3.12 et 3.13 a été trouvée entre la résistance à la traction et la densité. On constate que la résistance la traction est diminuée considérablement en fonction de la densité. Nous avons pu aussi trouver une relation entre les résistances à la compression et la résistance à la traction avec une bonne corrélation (R≈1) représenté sur les figures 3.14 et 3.15.

Finalement, à 10% ,15% et 20% de substitution, les BSBH présentent les meilleurs résultats des résistances que celle des BSCN qui 'est du peut être à la combinaison entre le MC (qui a des dimonsion gros) et le sable fin. L'utilisation de ces types des bétons est recommandée pour les éléments en béton non structuraux n'ayant pas un effet sur la stabilité de structure (pavé en béton, buse de l'assainissement, caniveaux, regards...etc).

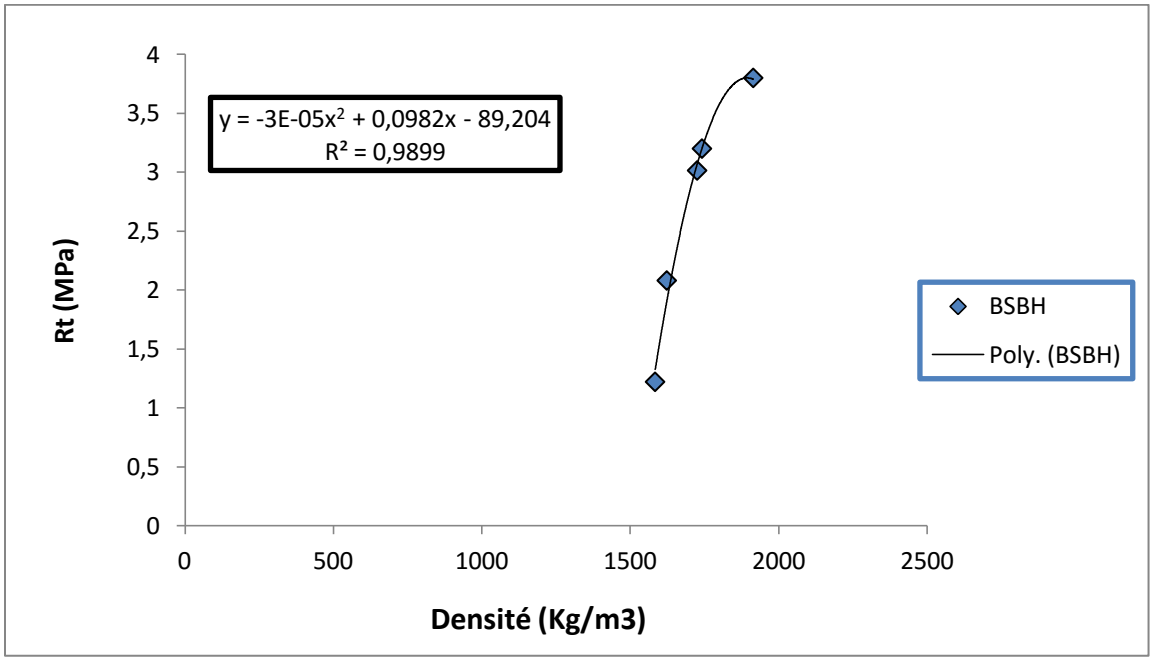


Fig. 3.12. Corrélation entre la résistance à la traction et la densité des BSBH MC

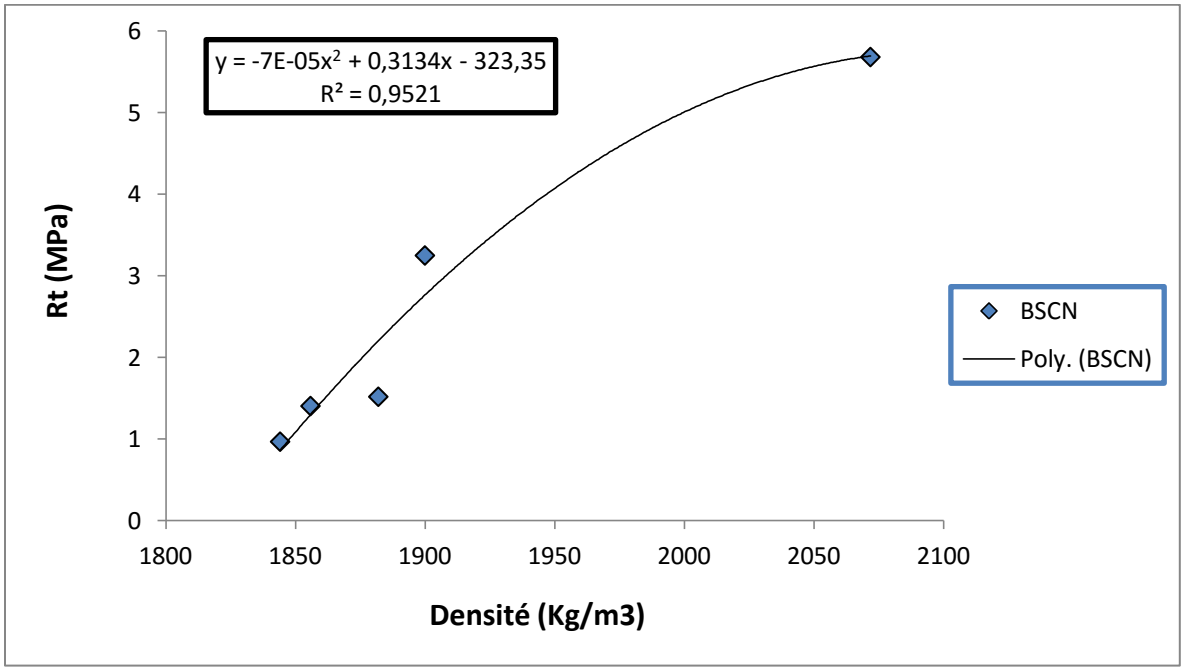


Fig. 3.13. Corrélation entre la résistance à la traction et la densité des BSCN MC

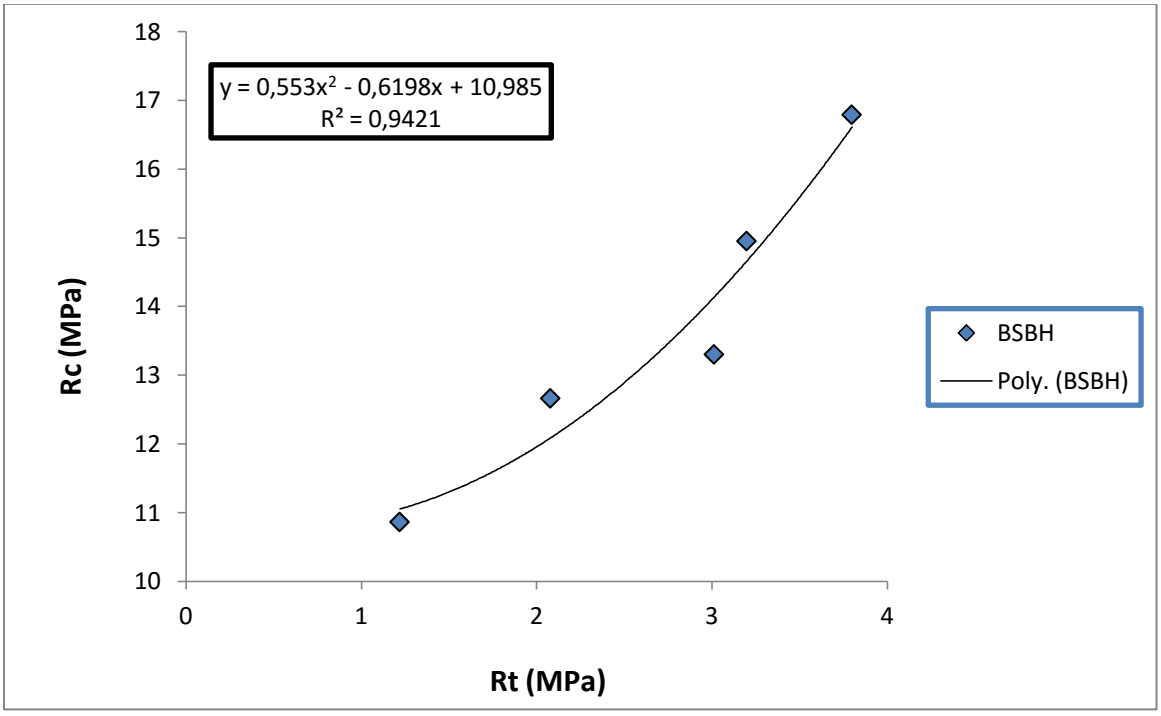


Fig. 3.14. Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction de BSBH MC

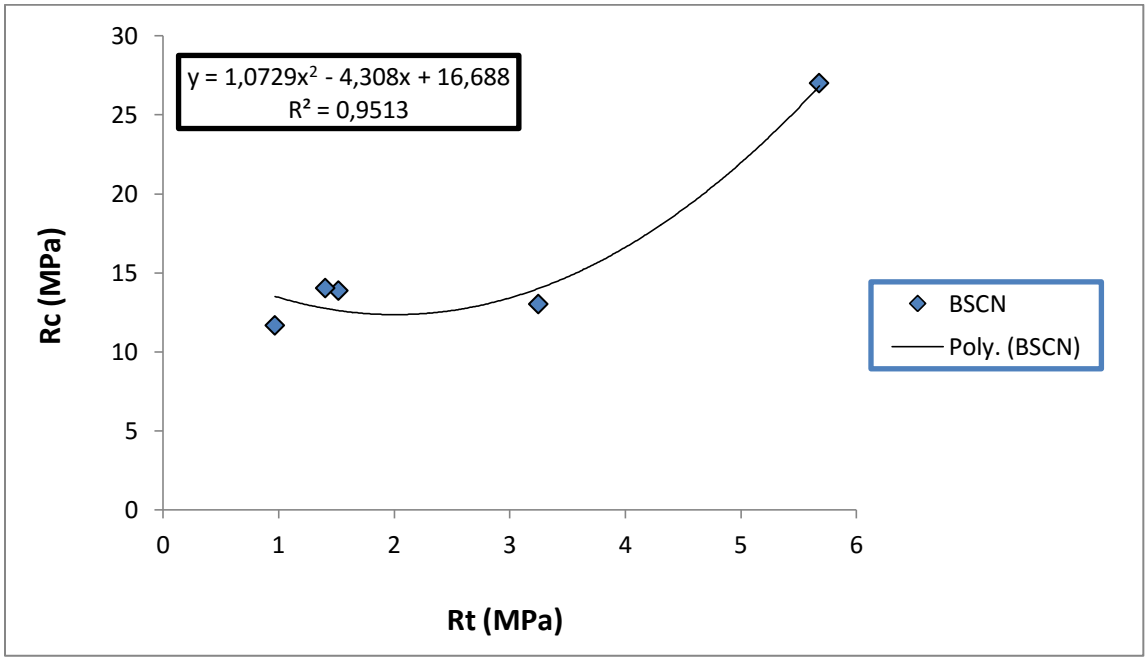


Fig. 3.15. Corrélation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction de BSCN MC

3.4 Approche de durabilité

3.4.1 Absorption d'eau

Les résultats de l'essai d'absorption d'eau des différents bétons réalisés sont illustrés dans les figures suivantes :

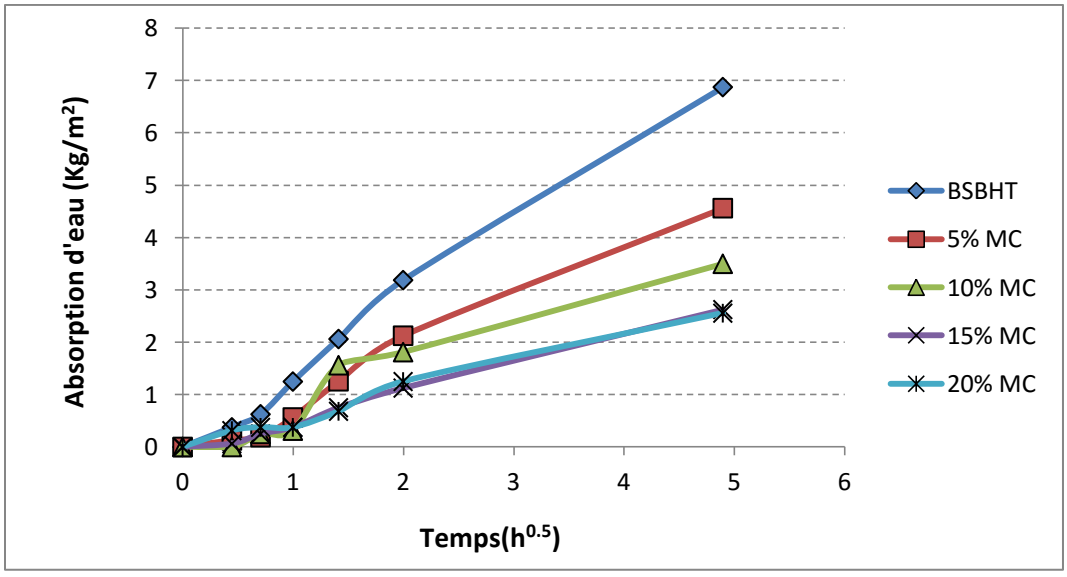


Fig.3.16: Absorption d'eau des BSBH à base du Marc de café

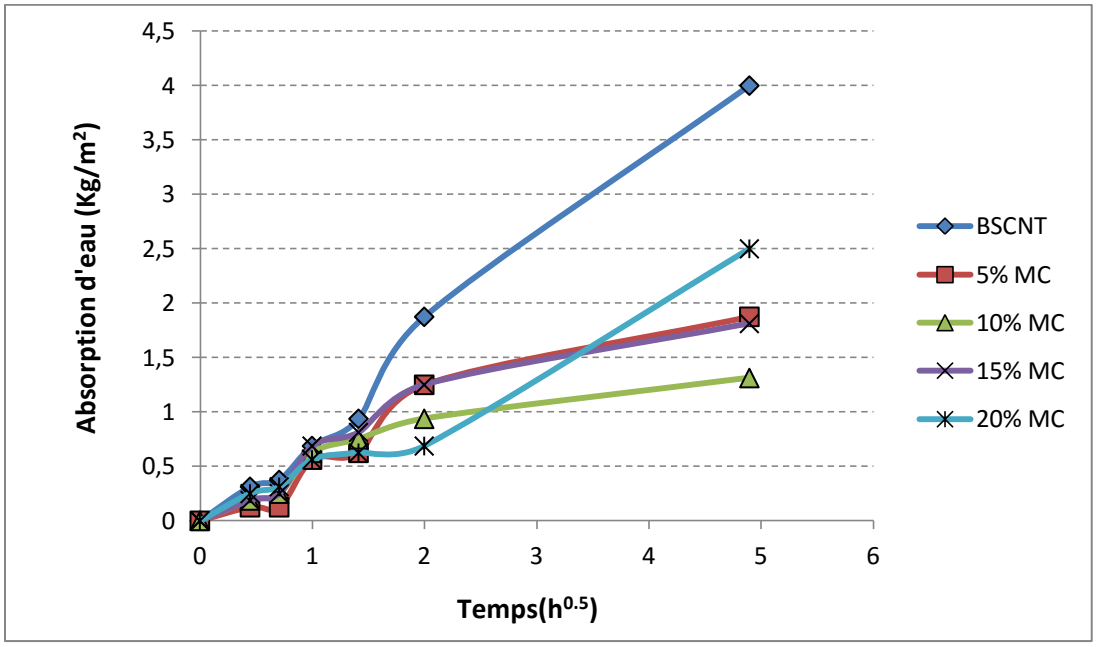


Fig.3.17: Absorption d'eau des BSCN à base du Marc de café

D'après les résultats obtenus, on remarque que la capacité d'absorption d'eau de tous les BS à base de MC est moins importante que celle de BS témoin, cela due au diffèrent nature des pores de BS témoin qui sont interconnectés et celle des BS à base de MC qui sont isolés .Les figures précédentes montrent aussi que l'absorption d'eau des bétons de sable de dune (entre 2.5 et 7 Kg/m^2) est plus importante que celle de béton de sable de concassage (entre 1.5 et 4 Kg/m^2) et cela est dû à ses granulométries très fines et ses porosités très élevées.

3.4.2 Variation dimensionnels

- **Retrait**

Les figures suivantes (3.18 ,3.19) présentent les résultats de l'essai de retrait en air libre

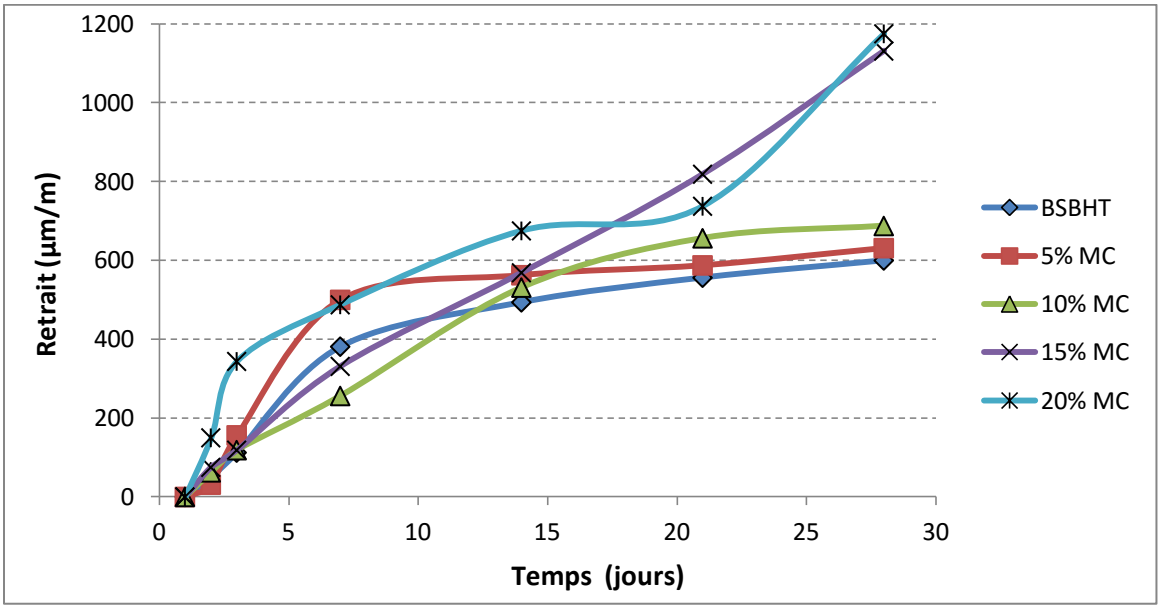


Fig.3.18: Retrait des BSBH à base du Marc de café

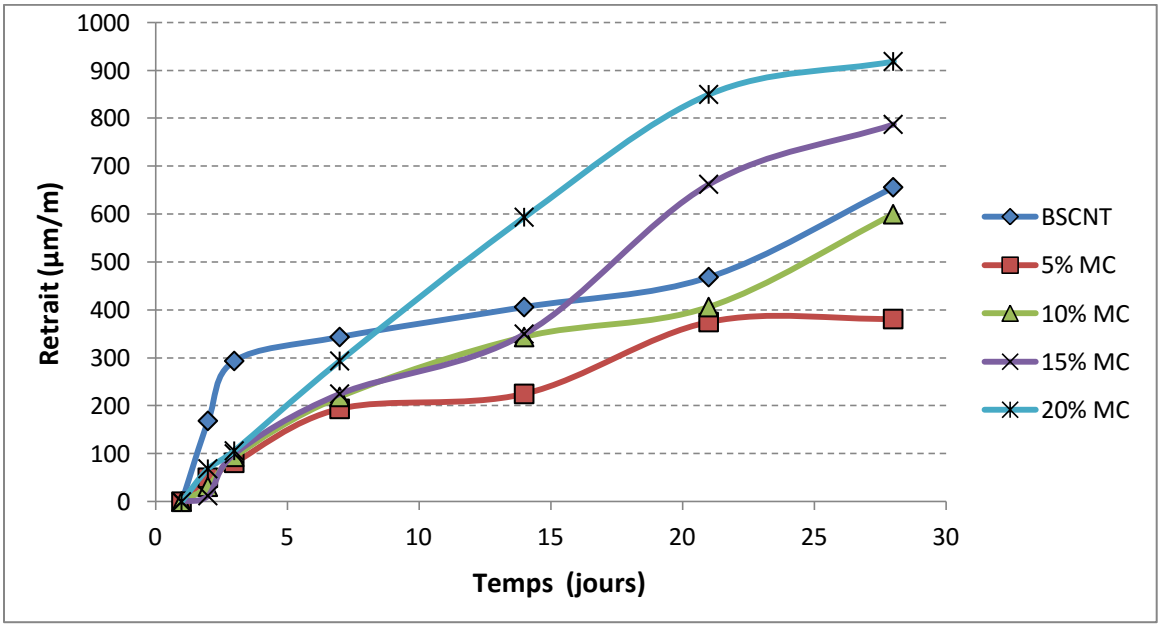


Fig.3.19: Retrait des BSCN à base du Marc de café

Nous pouvons remarquer clairement que le retrait de tous les types des bétons de sable augmente en fonction du temps et du pourcentage. A jeune âge, les BSBH à base de 10 et 15 % de MC présentent de un retrait moins important que celle de BS témoin .Par contre, tous les BSCN à base de MC présentent un retrait moins important par rapport au BS de référence. A long terme le retrait augmente en raison de la création d'un réseau de pores capillaires à

l'intérieur de la pâte de ciment hydratés. On constate aussi que tous les BSBH à base de MC ont donné un taux retrait plus important que celle du BSBHT. Outre, les BSCN à base 15 et 20% présentent le retrait le plus important par rapport au BSCNT. Cette augmentation de retrait est liée probablement au faible module d'élasticité du Marc de café, parce qu'en générale plus le module d'élasticité est diminué plus le retrait augmente [79].Enfin, que soit l'âge du béton les BSBH ont toujours présenté le retrait le plus grand (entre 600(µm/m) et 1200 (µm/m) pour les BSBH) et (400 (µm/m) et 900 (µm/m)).

- **Gonflement :**

De la même façon, le gonflement des différents bétons de sable sous eau durant 28 jours est illustré dans les figures suivantes :

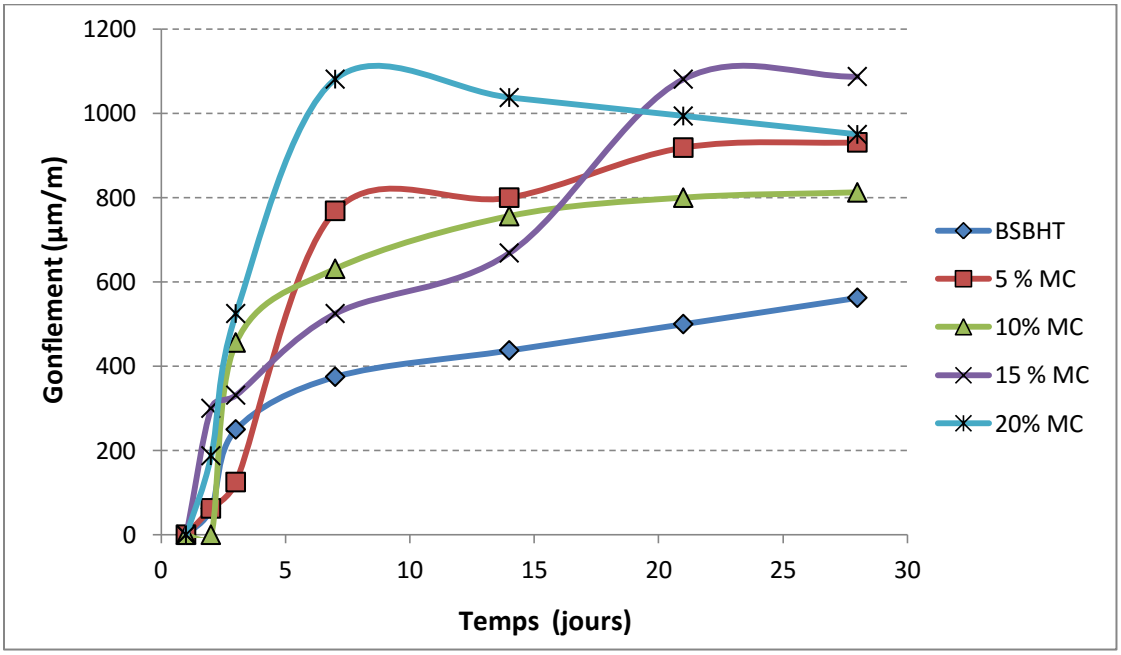


Fig.3.20 : Gonflement des BSBH à base du Marc de café

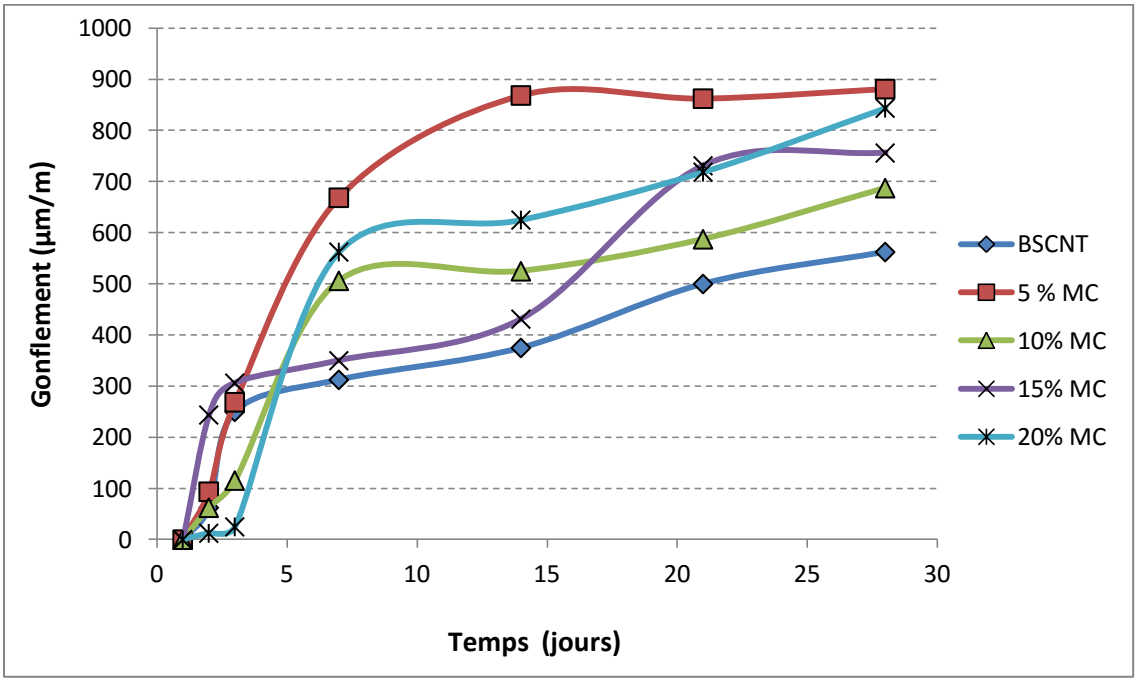


Fig.3.21: Gonflement des BSCN à base du Marc de café

D'après la figure ci-dessus, on remarque que les valeurs de gonflement de tous les types des bétons augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que tous les bétons de sable à base du Marc de café ont un taux de gonflement plus important que celle du béton de sable de référence. Les valeurs de gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de MC, et selon le type du sable utilisée. On constate aussi que Les BSBH MC présentent un taux de gonflement plus important par rapport à l'autre type de BSCN MC. Ces différentes valeurs sont liées essentiellement par la porosité provoquée par les granulats qu'est beaucoup plus important dans le sable BABHBAH que le sable Concassé.

3.4.3 Variation massique

- **La perte de masse**

La perte de masse des déférents bétons est illustrée dans les figures suivantes :

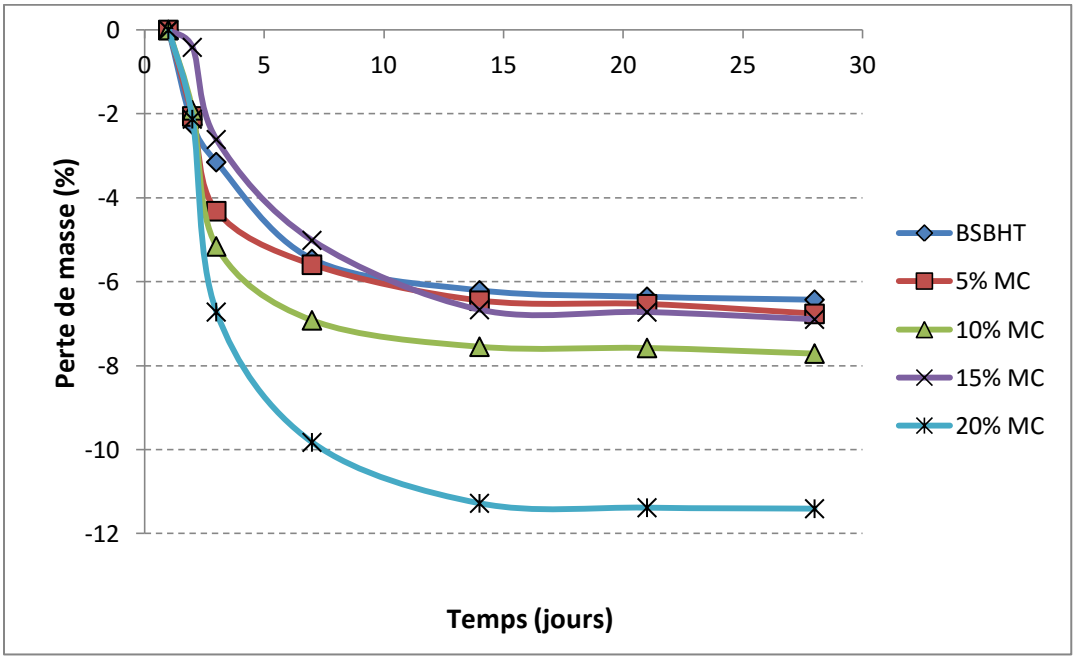


Fig. 3.22 : Perte de masse des BSBH a base du Marc de café

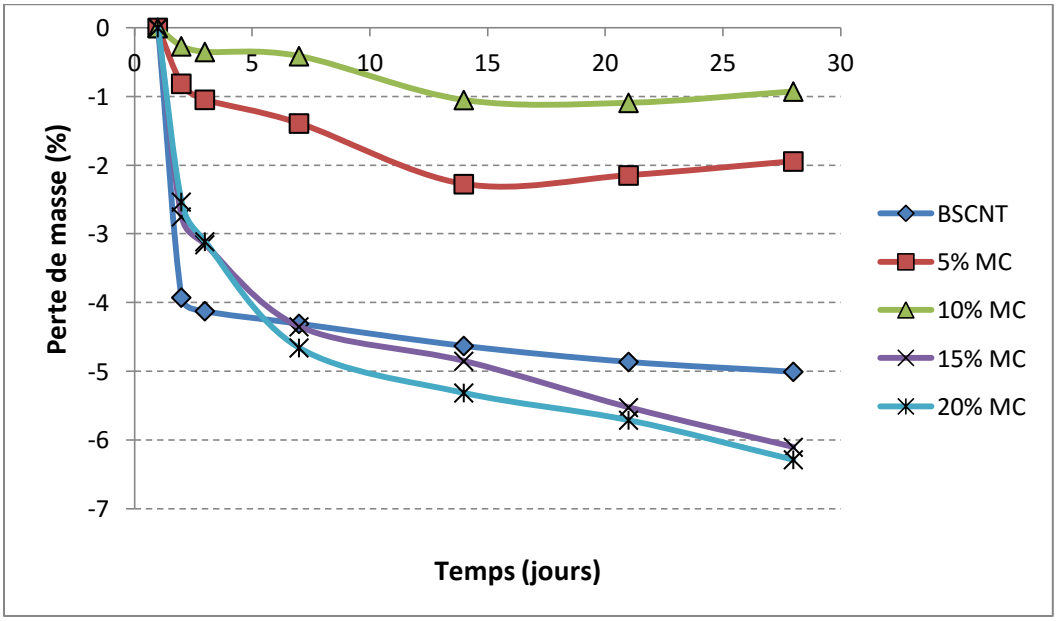


Fig. 3.23 : Perte de masse des BSCN a base du Marc de café

Les figures précédentes présentent l'évolution de la perte de masse de tous les types des bétons de sables en fonction du temps avec différents pourcentage du Marc de café, et qui devient plus faible à 28 jours. D'après les résultats obtenus, on remarque que la perte de masse de tous les BS à base du Marc de café est nettement plus importante par rapport au BS témoin.

Une exception a été enregistrée pour les BSCN à base de 5% et 10% de MC, qui ont présentés une perte de masse moins importante que BS de référence. On constate finalement que les BSBH à base du Marc de café ont des pertes de masse plus importante que celle les BSCN MC.

- **Gain de masse**

Le gain de masse des déférents bétons est illustré dans les figures ci-dessous :

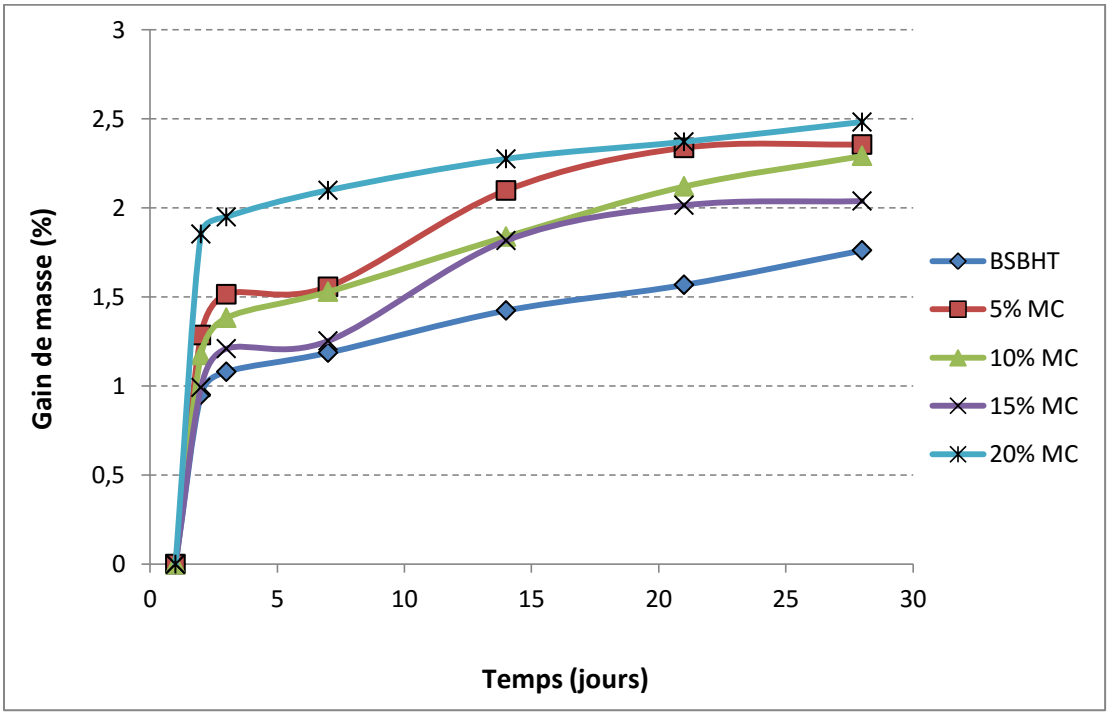


Fig.3.24: Gain de masse des BSBH a base du Marc de café

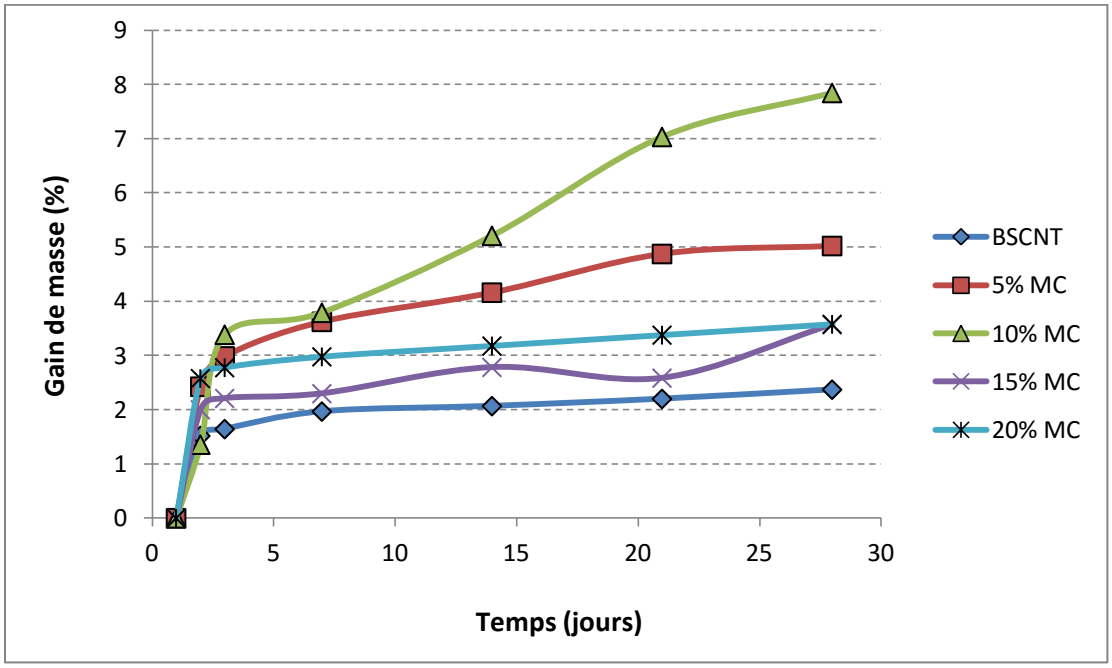


Fig.3.25: Gain de masse des BSCN a base du Marc de café

D'après les figures ci-dessus, on remarque que le gain de masse des différents bétons de sable est augmenté en fonction du temps. On constate aussi que tous les bétons de sable à base du Marc de café présentent un gain de masse plus important que celle du béton de sable de références. Ces différentes valeurs sont liées essentiellement par la porosité induit par la présence du Marc de café. On constate finalement que les BSCN à base du Marc de café ont des gains de masse plus importante que celle les BSBH MC.

3.5 Propriétés thermique

3.5. 1 La conductivité thermique

La conductivité thermique est la quantité de chaleur transférée en une unité de temps au travers d'un matériau d'une unité de surface et d'une unité d'épaisseur, quand les deux faces opposées diffèrent d'une unité de température. La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur correspondant.

Les valeurs moyennes de la conductivité thermique obtenue sont représentées dans les figures de ci-dessous :

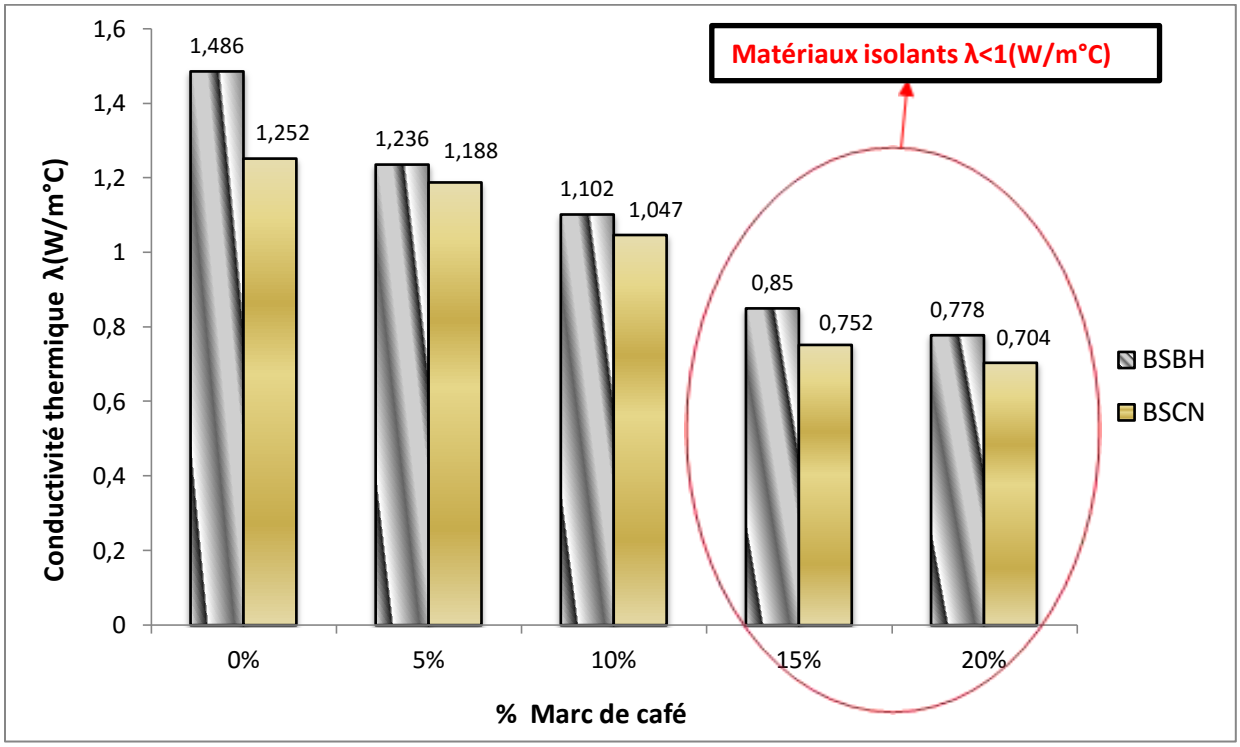


Fig.3.26. Conductivité thermique des Bétons de sable à base du Marc de café

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. La dégression est estimé à 48% et 44% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC. Cette dégression est due à la conductivité thermique du Marc de café (MC 0.30 W/m°C) qui est plus faible que celle du sable naturel substitué (2 W/m°C).En outre, la diminution de la conductivité thermique est liée aussi à l'augmentation de la porosité causé par l'augmentation du pourcentage de MC. En fait, les pores contiennent de l'air qui a une conductivité thermique (0.024 W/m°C) beaucoup plus faible par rapport au autres composants du béton de sable. La densité a aussi une influence sur la conductivité thermique du béton, plus les matériaux est léger plus la conductivité thermiques est faible ce qui confirme les résultats trouvés par plusieurs chercheurs [80,81]. Nous avons pu trouver une relation entre la conductivité thermique et la densité des BS (relation polynomiale) représenté sur les figures 3.27 et 3.28.

Enfin, les bétons de sable à base de 15% et 20% du Marc de café sont considérer comme des matériaux isolants grâce à ses conductivités thermiques (λ) qu'est inférieur à 1 (W/m°C).

L'utilisation de ces types des bétons est recommandée pour les éléments préfabriqués, (panneaux préfabriqué), la séparation dans les bâtiments, les façades, les salles de bain….ect

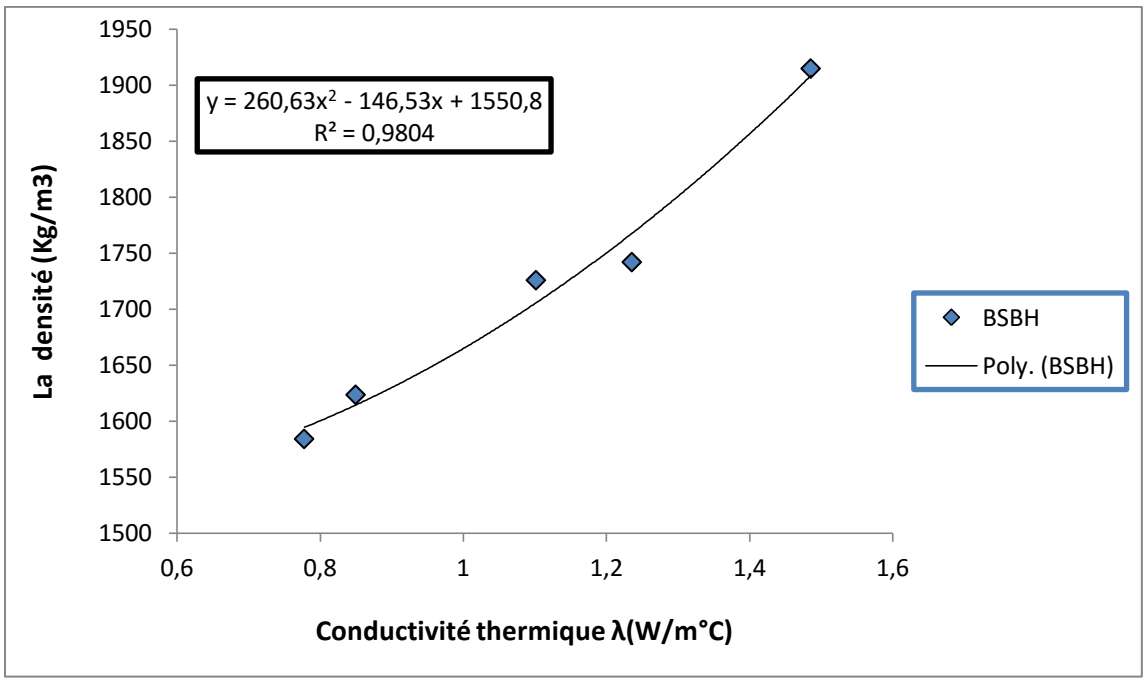


Fig. 3.27. Corrélation entre Conductivité thermique et la densité des BSBH MC

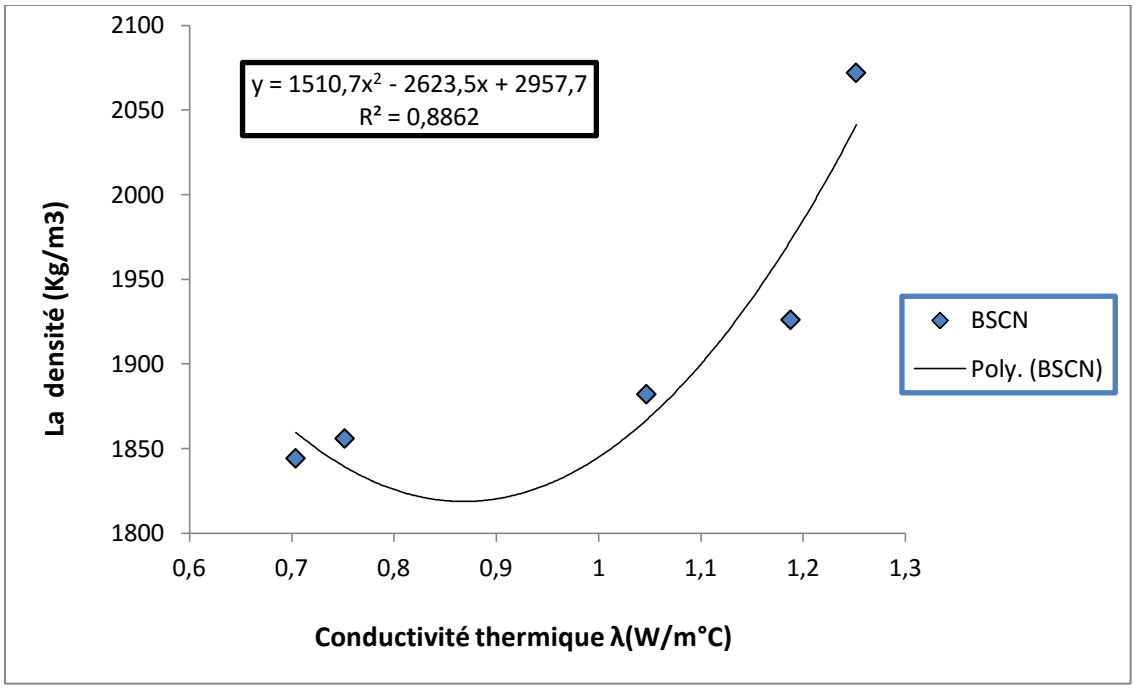


Fig. 3.28. Corrélation entre la Conductivité thermique la densité des BSBCN MC

3.5.2 La chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un corps est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1K la température de l'unité de masse de ce corps. La chaleur massique s'exprime en J. g-1. K-1 ou kJ.kg-1.K-1. Les valeurs moyennes de la chaleur spécifique obtenue sont représentées dans les figures de ci-dessous :

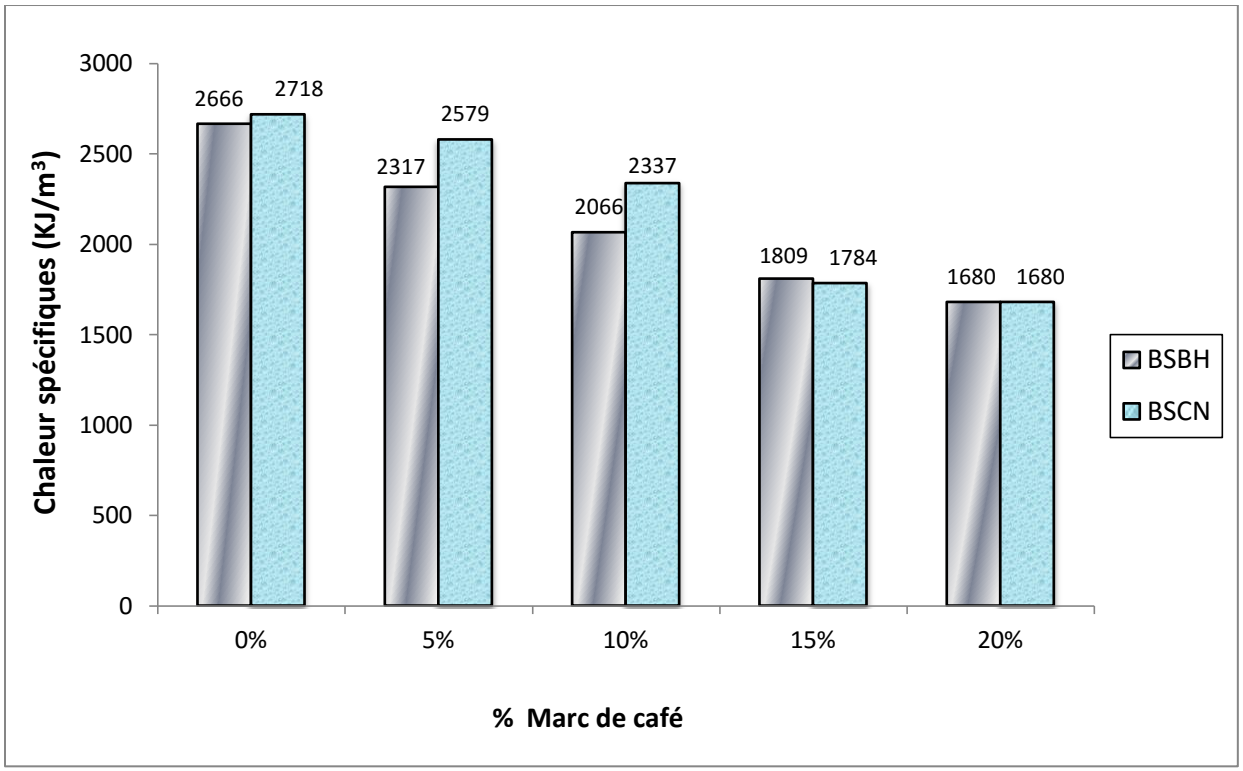


Fig.3.29. Chaleur spécifiques des Bétons de sable à base du Marc de café

Les résultats obtenus montrent que la chaleur spécifique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. La dégression est estimé à 37% et 38% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC. Nous avons trouvé une très bonne corrélation (R≈1) entre chaleur spécifique et la conductivité thermique avec une relation linaire représenté sur les Figures 3.30 et 3.31. Ce qui confirme que La chaleur spécifique est développée en fonction de la conductivité thermique.

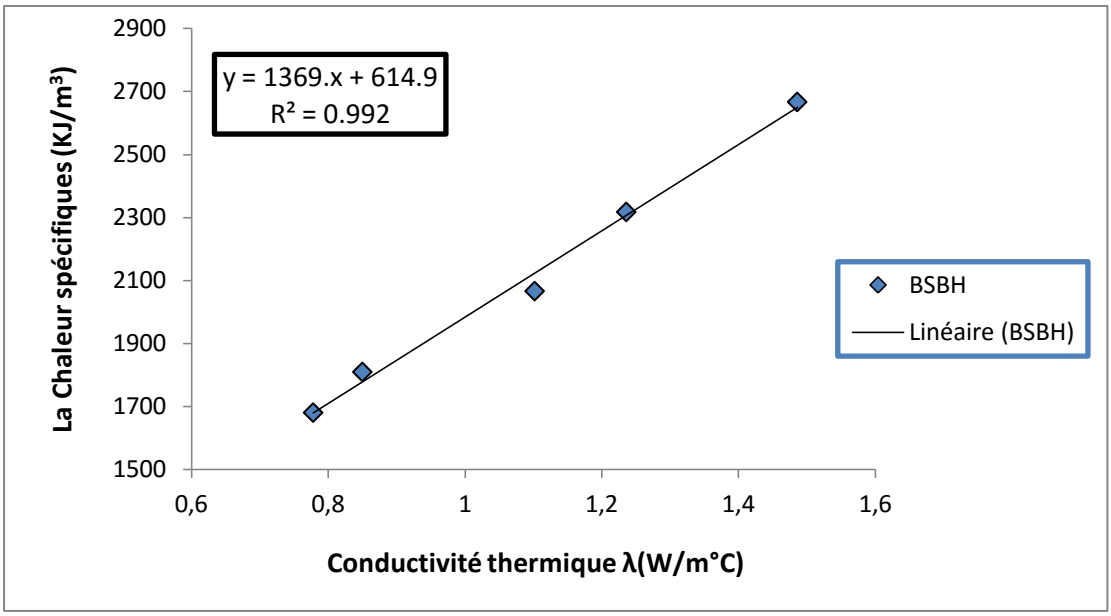


Fig. 3.30. Corrélation entre la Chaleur spécifique et la Conductivité thermique des BSBH MC

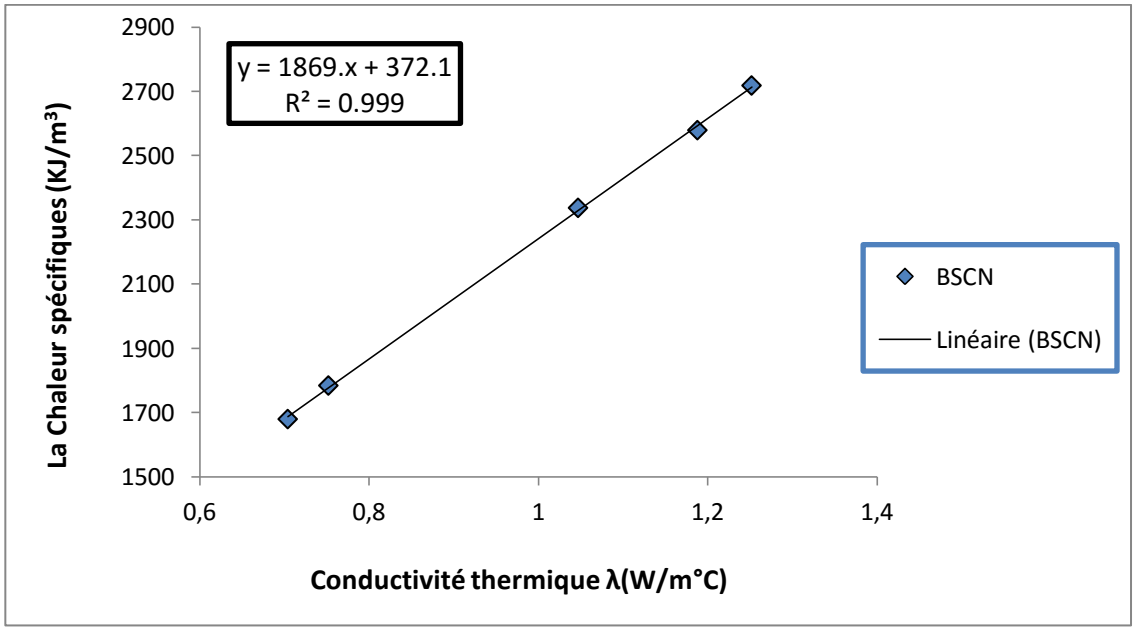


Fig. 3.31. Corrélation entre la Chaleur spécifique et la Conductivité thermique des BSCN MC

3.5.3 La diffusion thermique

La diffusivité thermique exprime l'aptitude d'un corps à transmettre la chaleur plutôt qu'à l'absorber. Par conséquent, plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible et plus la chaleur met de temps à le traverser.

Les figures ci-dessous représentent les valeurs moyennes de la diffusivité thermiques des différents bétons de sable obtenue.

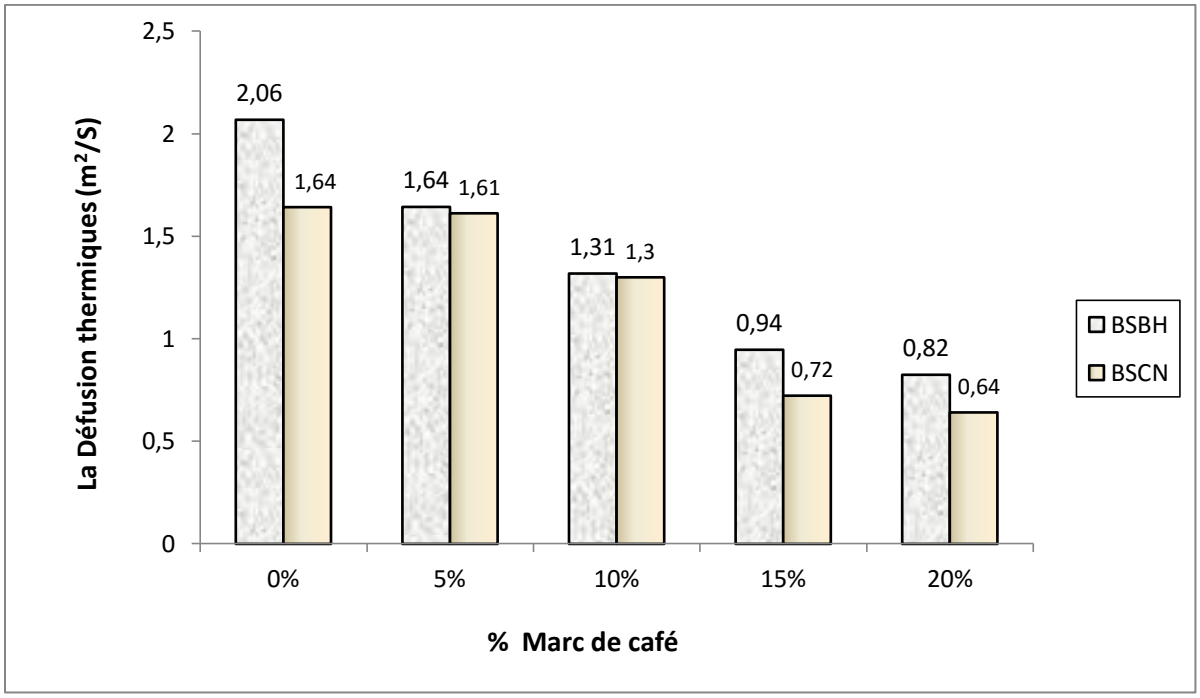


Fig.3.32. La diffusivité thermique des Bétons de sable à base du Marc de café

D'après les figures ci-dessus, on constate que tous les BS à base du Marc de café présentent des valeurs de la diffusivité thermique moins important par rapport au béton de sable témoin. On remarque aussi que la diffusivité thermique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. La dégression est estimé à 60% et 61% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC. Cette diminution est liée à la porosité plus élevé des BS induit par la présence du Marc de café, ce qu'est retardé le passage de la chaleur.

Nous avons pu déterminer une bonne corrélation entre la diffusivité thermique et la conductivité thermique avec une très bonne relation linaire (R≈1)(Fig.3.30), qui montre que la diffusivité thermique est développée en fonction de la conductivité thermique.

Une autre relation à été trouvé entre la diffusivité thermique et la densité (Linaire pour le BSBH et polynomiale pour le BSCN **(**Fig.3.31**))**, qui montre que la diffusivité thermique est augmenté en fonction de la densité des matériaux.

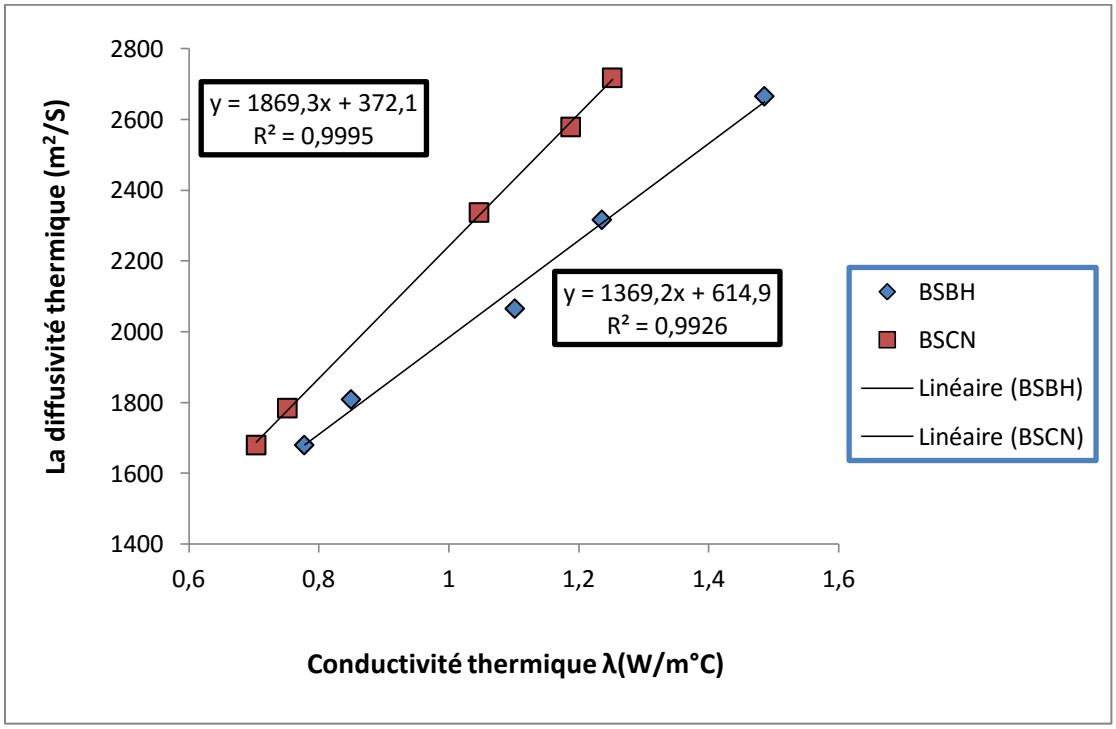


Fig. 3.33. Corrélation entre la diffusivité thermique et la conductivité thermique des BS MC

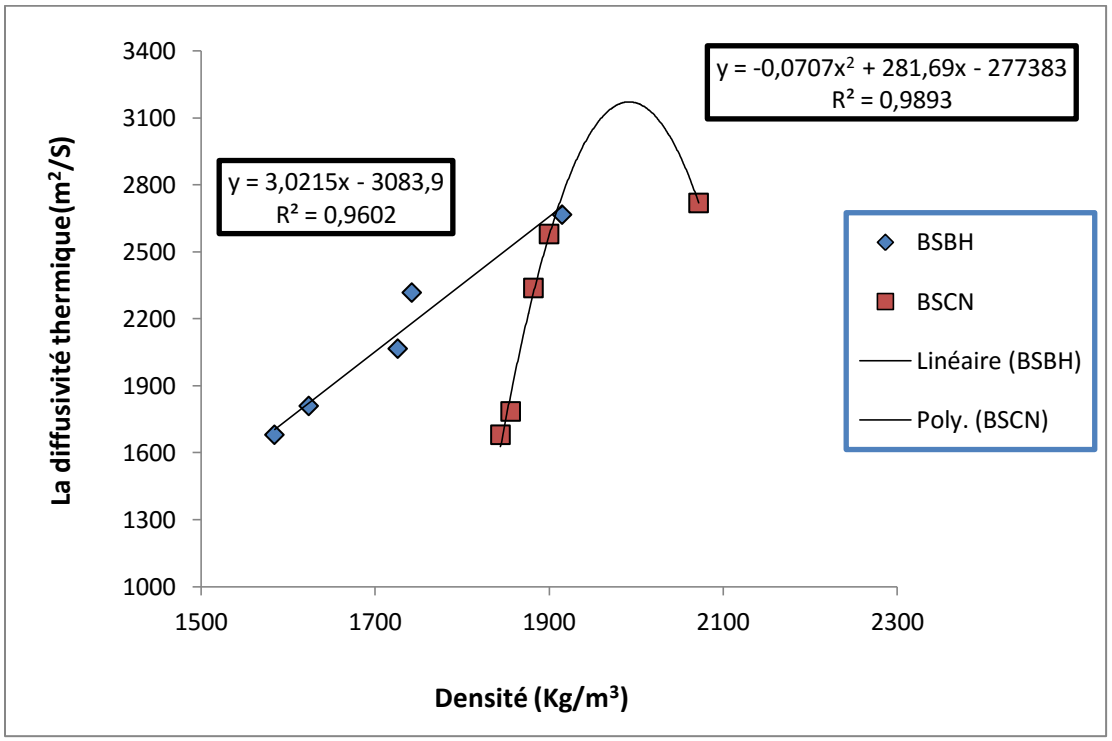


Fig. 3.34. Corrélation entre la diffusivité thermique et la densité des BS MC

3.6 Conclusion

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

- Quelque soit la nature du sable la maniabilité du BS est diminué en fonction de substitution du sable par le Marc de café.
- La densité du béton de sable est diminuée en fonction de substitution du sable par le Marc de café.
- La résistance à la compression des BS est diminuée en fonction d'augmentation de pourcentage du Marc de café. La dégression de la résistance à l'âge de 28 jours à été estimé à 35% pour les BSBH, et 57 % pour les BSCN.
- La substitution du sable par le Marc de café engendre une diminution considérable de la résistance à la traction par flexion pour tous les âges réalisés. La dégression à l'âge de 28 jours est estimé à 68 % pour le BSBH, 83% pour le BSCN.
- La capacité d'absorption d'eau de tous les BS à base de MC est moins importante que celle de BS témoin.
- La substitution du sable par le Marc de café engendre un retrait plus important et surtouts à long terme.
- Les bétons de sable à base du Marc de café ont un taux de gonflement plus important que celle du béton de sable de référence.
- La perte de masse de tous les BS à base du Marc de café est plus importante par rapport au BS témoin. Une exception a été enregistrée pour les BSCN à base de 5% et 10% de MC, qui ont présentés une perte de masse moins importante que BS de référence.
- Tous les bétons de sable à base du Marc de café présentent un gain de masse plus important que celle du béton de sable de références.
- La conductivité thermique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. La dégression a été estimé à 48% et 44% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC.

- La chaleur spécifique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. La dégression à été estimé à 37% et 38% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC.
- Tous les BS à base du Marc de café présentent des valeurs de la diffusivité thermique moins important par rapport au béton de sable témoin. La dégression à été trouvé de 60% et 61% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC.

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.

Conslusion générale et Recommandations

Conclusion générale

Les travaux de recherche du présent projet ont été menés dans le but d'atteindre deux principaux objectifs, le premier concerne la valorisation des sables locaux disponible en Algérie tels que le sable de concassage et le sable de dunes. Ce dernier très abondant dans le sud Algérien et constitue un matériau très économique qui ne nécessite pas une grande énergie dans son exploitation. Le deuxième objectif est d'étudier l'influence des déchets de café (sous forme de poudre (Marc de café)) sur le comportement rhéologique, mécanique, thermiques et durabilité des bétons de sables.

L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- Quelque soit la nature du sable, la maniabilité du BS est diminué en fonction de substitution du sable par le Marc de café.
- La densité du béton de sable est diminuée en fonction de substitution du sable (concassé ou roulé) par le Marc de café.
- La résistance à la compression des bétons de sable est diminuée en fonction d'augmentation de pourcentage du Marc de café. La dégression de la résistance à l'âge de 28 jours à été estimé à 35% pour les BSBH, et 57 % pour les BSCN. Les meilleurs résultats ont été présentés par les BSCN.
- Quelque sois l'âge du béton et le type du sable utilisés, la résistance à traction est diminué en fonction de substitution du sable par le Marc de café La dégression à l'âge de 28 jours est estimé à 68 % pour le BSBH, 83% pour le BSCN. Les meilleurs résultats ont été présentés par les BSBH.
- La capacité d'absorption d'eau de tous les BS à base de MC est moins importante que celle de BS témoin.
- La substitution du sable par le Marc de café engendre un retrait plus important par rapport au béton de sable témoin (surtouts à long terme).
- Les bétons de sable à base du Marc de café présentent un taux de gonflement plus important que celle du béton de sable de référence.

- La perte de masse de tous les BS à base du Marc de café est plus importante par rapport au BS témoin. Une exception a été enregistrée pour les BSCN à base de 5% et 10% de MC, qui ont présentés une perte de masse moins importante que BS de référence.
- Tous les bétons de sable à base du Marc de café présentent un gain de masse plus important que celle du béton de sable de références.
- La conductivité thermique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. Les bétons de sable à base de 15% et 20% du Marc de café sont considérer comme des matériaux isolants grâce à ses conductivités thermiques (**λ**), qu'est inférieur à 1 (W/m°C).
- La chaleur spécifique de tous les types de bétons de sable est diminuée avec l'augmentation du pourcentage du Marc de café. La dégression à été estimé à 37% et 38% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC.
- Tous les BS à base du Marc de café présentent des valeurs de la diffusivité thermique moins important par rapport au béton de sable témoin. La dégression à été trouvé de 60% et 61% respectivement pour les BSBH et BSCN à base de MC.

Vu les résultats obtenus de cette étude, on peut avancer que l'utilisation des matériaux locaux disponibles dans la fabrication du béton de sable peut constituer une alternative économique et technologique importante dans certains pays en voie de développement. La fabrication du béton de sable à base de sable de dune peut apporter une solution pour certains travaux dans les régions du sud du pays où ce matériau est très abondant. Par ailleurs, les sables concassés calcaires sont une source alternative intéressante au remplacement des sables alluvionnaires siliceux (roulés) pour la confection des bétons de tout genre.
La valorisation et recyclage des déchets de café dans le BS contribuent à la protection de l'environnement par la diminution de la quantité énorme.

On recommande finalement l'utilisation de ces types des bétons aux éléments préfabriqués, panneaux préfabriqué, la séparation dans les bâtiments, les façades, les fond plafond, les salles de bain….ect grâce à ses bonnes propriétés thermiques.

RECOMMANDATIONS

Nous recommandons pour des futurs travaux l'étude :

- Etude de durabilité du béton de sable à base du Marc de café.
- Effet de l'élévation de la température sur le comportement du béton de sable à base de marc de café.
- Valorisation du Marc de café dans le béton ordinaire.
- Béton autoplaçon à base du Marc de café
- L'influence du Marc de café traité sur le comportement du béton de sable léger.

.

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] institut national de la statique et des études économiques, www.insee.fr. (site Internet google.fr) 2008.

[7] 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.

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

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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)

[12] 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).

[13] 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).

[14] 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).

[15] 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.

[16] 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).

[17] 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).

[18] 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).

[19] 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).

[20] 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).

[21] 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).

[22] 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).

[23] 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)

[24] 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).

[25] Sampaio, A., Dragone, G., Vilanova, M., Oliveira, J.M., Teixeira, J.A. et Mussatto, S.I. (2013) Production, chemical characterization, and sensory profile of a novel spirit elaborated from spent coffee ground. *LWT - Food Science and Technology*, vol. 54, p. 557-563. www.elsevier.com/locate/lwt (Page consultée le 12 juin 2015).

[26] Vega, R.C., Pina, G.L., Castaneda, H.A.V. et Oomah, D. (2015) Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Food Science and Technology*, vol. 45, p. 24-36. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012 (Page consultée le 12 juin 2015)

[27] Arulrajah, A., Maghoolpilehrood, F., Disfani, M.M., Horpibulsuk, S. (2014) Spent coffee grounds as a non-structural embankment fill material: engineering and environmental considerations. *Journal of Cleaner Production*, vol. 72, p. 181-186. www.elsevier.com/locate/jclepro (Page consultée le 12 juin 2015)

[28] Mussatto, S.I., Machado, E.M.S., Maritns, S. et Teixeira, J.A.(2011b) Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *LWT - Food Bioprocess Technol*, vol. 4, p. 661-672

[29] Lee, H.K., Park, Y.G., Jeong, T. et Song, Y.S. (2015) Green nanocomposites filled with spent coffee grounds. *Journal of applied polymer science*, vol. 132. Wileyonlinelibrary.com/app (Page consultée le 12 juin 2015).

[30] Veolia Group (2014). Veolia - Biomass, the choice of spent coffee grounds. *In* YouTube. *Veolia group*. https://www.youtube.com/watch?v=ojGcMHlRCeA (Page consultée le 7 juin 2012).

[31] Castañeda, R.A., Avlijas, S., Simard, M.A. et Ricciardi, A. (2014) Microplastic pollution in St. Lawrence River sediments. *Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques,* vol. 71, p. 1767-1771. http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cjfas-2014-0281#.VZ1mUY10yUk (Page consult2 le 17 juin 2015)

[32] Franca, A.S., Oliveira, L.S. et Ferreira, M.E. (2009) Kinetics and equilibrium studies ofmethylene blue adsorption by spent coffee grounds. *Desalination*, vol. 50, p. 610-616. www.elsevier.com/ locate/desal (Page consultée le 6 juin 2015).

[33] Barbero, S. et Flore, E. (2015) The flavours of coffee grounds: the coffee waste as accelerator of new local businesses. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara– International Journal of Engineering*, tome 3. http://annals.fih.upt.ro (Page consultée le 12 juin 2015)

[34] Bio Green Tech (2007). About us. *In* BIo Green Tech Ltd. Bio Green Tech. http://www.biogreentech.com/ (Page consulté le 21 juin 2015)

[35] Lehmann, V. et Motulsky, b. (2013). *Communication et grands projets, les nouveaux défis*. 281 p. (Presse de l'Université du Québec)

[36] Yen, W.J., Wang, B.S., Chang, L.W et Duh, P.D. (2005). Antioxidant Properties of Roasted Coffee Residues. *Journal of agricultural and food chemistry*, vol. 53, p. 2658-2663. http://pubs.acs.org/journal/jafcau (Page consultée le 6 juin 2015).

[37] Yates, J. (2015). Montréal, nouvelle destination d'affaires écoresponsable. *In* Médias Transcontinental S.E.N.C. *Actualités*. http://journalmetro.com/actualites/montreal/804608/montreal-nouvelle-destination-daffaires-ecoresponsable/ (Page consultée le 5 juillet 2012).

[38] 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#

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

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

[42] BEDERINA.M, « Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable », mémoire de magistère; université de Laghouat 1998.

[43] Z.Boudaoud, « Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaâda » mémoire de Magistère, université Med Boudiaf.

[44]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).

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

[46] Mélanie SHINK, « Fissuration des matériaux cimentaires renforcés de microfibres d'aciers » Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université LAVAL CANADA (2000).

[47] Lootvoet A., " Angularité et maniabilité des sables à béton ", Symposium International sur les granulats, Nice, Mai 1984.

[48] Bédérina M., Khenfer M. M., Dheilly R. M. and Quéneudec M. "Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes", Cement and Concrete Research, 35 (2005): 1172-1179.

[49] CHAOUCHE, A.A. ; BALI A. "Étude caractéristique des bétons de sable de dune", Thèse de magister; ENP Alger, 1993.

[50] BENAISSA, A. ; MORLIER, P. ; VIGUIER, C. ; CAUVIN, J.J. "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable" ; Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics (ITBTP) N°504, juin 1992.

[51] BENAISSA, A. "Déformations différées d'un béton de sable" - Thèse de doctorat soutenue en novembre 1992 (Université de bordeaux) ; Laboratoire régional des ponts et chaussées.

[52] M .BEDERINA; « Caractérisation Mécanique et Microstructure des béton de sables locaux : Effet des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau » ; Thèse de Magister. CU de LAGHOUAT 2000, Encadré par Dr KHENFER.Med.

[53] Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussés. "Les pieux forés : recueil des règles de l'art", Décembre 1979.

[54] Coquillat G., "Béton de sable à haute performance", Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, Juin 1992.

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

[56] Ambroise J., Prea J. et Sari M. "L'adjuvantation des bétons de sable", Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, Septembre 1993.

[57] CHAUVIN, J.J. GRIMALDI, G. « Les bétons de sable », Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°157, Sept. 1988.

[58] 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.

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

[60] 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.

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

[62]. Hsu YS (2010) The application of coffee residue ash as into concrete metrical. Master Thesis, National Taipei University of Technology, Institute of Civil and Disaster Prevention, Taipei

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

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

[65] 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.

[66] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.

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

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

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

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

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

[72] 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.

[73] NF EN 993-15 .*Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses – Partie 15 détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle)* Octobre 2005.

[74]http://fr.wikipedia.org/wiki/Conductivit%C3%A9_thermique

[75] AGEDEN - Energies Renouvelables en Isère « Propriétés et performances thermiques des matériaux » ,Avril 2008. on http://www.ageden.org

[76] 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.

[77] 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.

[78] [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.

[79] 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.

[80] Semiha Akcaozog˘lu, Kubilay Akcaozog˘lu , Cengiz Duran Atis. Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containingwaste PET lightweight aggregate (WPLA). Construction and Building Materials.2013;66: 247– 258.

[81] F. Iucolano, B. Liguori, D. Caputo, F. Colangelo, R. Cioffi. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties,Materials and Design 2013 ,52 , 916–922.

Annex

Fig.A 1. Ciment MATINE

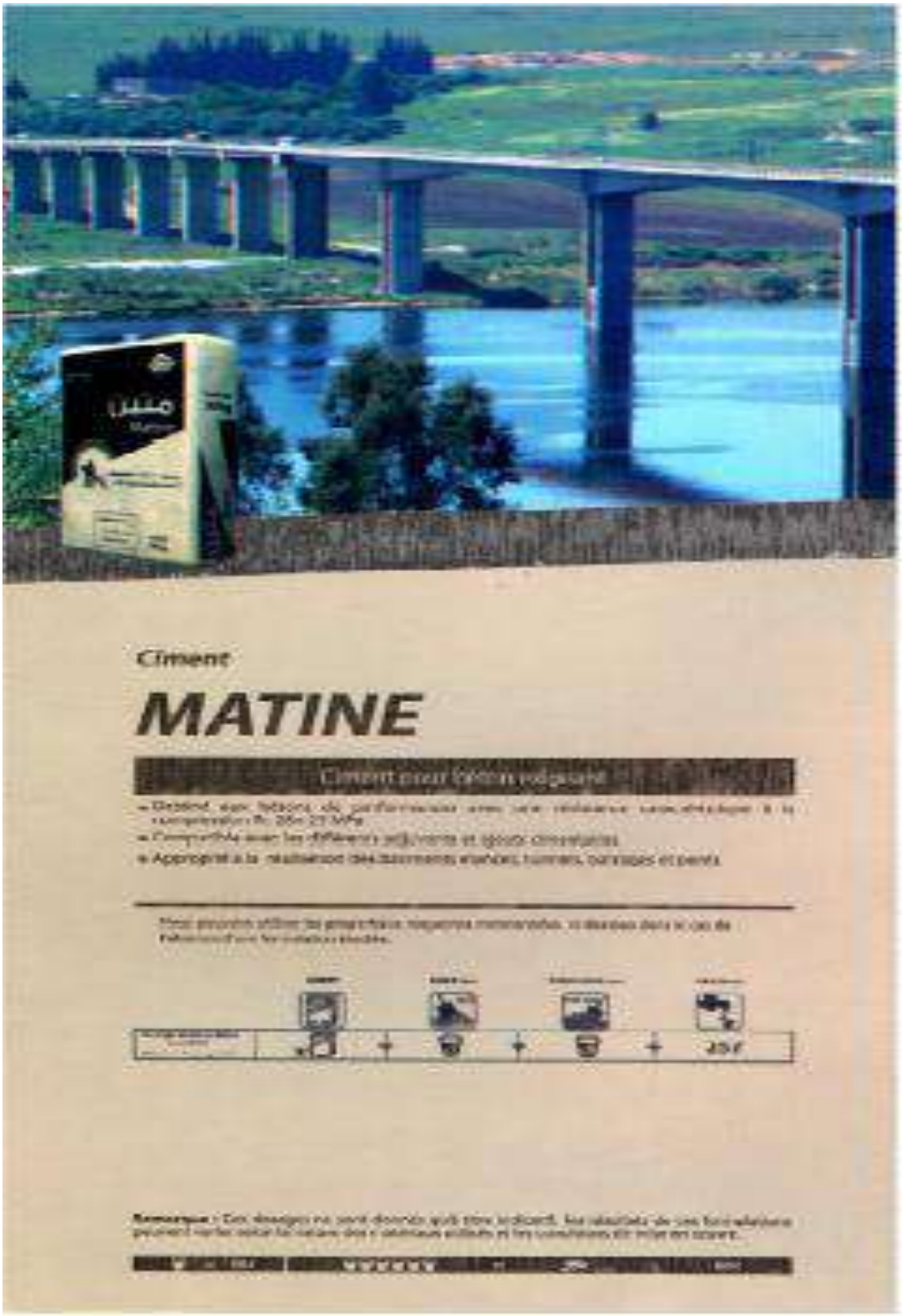


Fig.A 2. La fiche technique ciment.

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CIM 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.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. concassage par concasseur et broyage manuelle.



Fig. A.8.broyage par broyeur



Fig .A.9. Table vibreur



Fig .A.10 . Essais de la maniabilité.



Fig. A.11. Mesure de retrait et gonflement



Fig. A.12. Les éprouvettes avant l'écrasement