REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie civil

Formulation d'un béton de sable léger à base de coupeaux de bois traité avec l'argile

---

Présenté par

BOUAICHAOUI Messaoud

BEN AISSA Khadra

Proposé et Dirigé par

Dr : BOUCHERIT .D

M^{elle} : BEN CHOUAF .A

Promotion Juin 2019

Remerciement

Le présent travail

A été réalisé au sein du laboratoire du béton

De Hall de Technologie de Médéa.

Nous tenons à exprimer nos vifs Remerciements et notre profonde Gratitude à notre promoteur Dr : BOUCHERIT DALILA et On remercie également Melle. BEN CHOUAF AMINA pour leur disponibilité, leur aide durant tout le déroulement de ce projet. Grâce à leur dévouement, conseils scientifiques et suivis, nous avons pu mener à terme notre travail.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie Civil de l'université de Médéa et à tous les enseignants qui ont participé à notre formation.

Enfin nous remercions tous qui ont contribué de près ou de lion à la réalisation de mémoire.

Messaoud, Khadra

Dédicace

D'abord à ma très chère mère qui m'a comblé d'amour

Et de tendresse et dont ses Conseils étaient et resteront

Toujours bénéfiques pour moi, Que dieu la protège

et la garde pour moi.

À mon très cher père qui m'a toujours soutenu moralement,

M'a encouragé et m'a poussé à poursuivre mes études

Que dieu Le garde en bonne santé.

À mes frères Mourad, Moumen et à ma sœur Imane

et à tous les amis que j'ai connus dans ma carrière.

A tous ce qui ont aidés de loin ou de près pour la réalisation de ce mémoire.

Toute la promotion 2019.

Dédicace

Je dédie cet humble travail à mes yeux à mes chers parents,

qui ont été plantés dans le fruit d'une morale vertueuse

et d'une confiance .

À mes frères Mohammed et Hamza et à mes sœurs, en

particulier ma sœur cadette Mariam, ainsi qu'à tous

les membres de la famille d'Abdel Kader Ben aissa,

et à tous les amis que j'ai connus dans ma carrière.

A tous ce qui ont aidés de loin ou de prés pour la réalisation

de ce mémoire.

Toute la promotion 2019.

Khadra

ملخص

يندرج هذا العمل ضمن المحور الرئيس المتمثل في تثمين النفايات و استعمالها في تطوير مواد بناء ذات خواص عزل حرارية عالية و الهدف المنشود في هذه الدراسة هي النفايات المثمنة في : رقائق الخشب المتولدة من نجارة الخشب :في إطار بقاء الخواص الميكانيكية ضمن حدود مقبولة .هذه الميزات أدت إلى تطوير الخرسانة الرملية الخفيفة.

النتائج الأولية المتحصل عليها بينت القدرة على تطوير مواد بناء خفيفة ذات مميزات عزل حرارية عالية باستعمال رقائق الخشب المعالج بالمقابل فإنه تبين انخفاض محسوس في المقاومة الميكانيكية للخرسانة الرملية الخفيفة مع ازدياد نسبة رقائق الخشب نظرا لدرجة الامتصاص المعتبرة للخشب.

هذه النتائج الأولية وإن كانت مشجعة، تبقى غير كافية إذا لم تستكمل الدراسة في ظروف مناخية متغيرة.

Résumé

Ce travail fait partie de l'axe principal de la valorisation des déchets et de son utilisation dans le développement de matériaux de construction à haute isolation thermique. Ces caractéristiques ont conduit au développement du béton de sable léger.

Résultats préliminaires obtenus La possibilité de développer des matériaux de construction légers à haute isolation thermique à l'aide de copeaux de bois traités a montré une diminution significative de la résistance mécanique du béton de sable léger avec une proportion croissante de copeaux de bois en raison du degré d'absorption du bois.

Ces résultats préliminaires mais encourageants restent insuffisants si l'étude n'est pas terminée dans des conditions climatiques variables.

Abstract

This work is part of the main axis of waste valuation and its use in the development of building materials with high thermal insulation properties. The objective of this study is the waste that is included in: wood chips from wood carpentry: in the survival of mechanical properties within acceptable limits. These features led to the development of light sandy concrete. Preliminary results obtained The ability to develop lightweight building materials with high thermal insulation properties using treated wood chips showed a significant decrease in the mechanical resistance of light sand concrete with increasing proportion of wood chips due to the degree of absorption of wood.

These preliminary but encouraging results remain insufficient if the study is not completed in changing climatic variable.

Remerciements
Dédicaces
Résumés
Sommaire
Liste des figures
Liste des tableaux
Notation et Abréviation
Introduction générale

Sommaire

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I-1-Introduction 1
I-2-Beton de sable 1
I-2-1- Historique 1
I-2-2- Définition 2
I-2-3- Composition du béton de sable 2
I-2-3-1- Les sables 2
I-2-3-2- Les ciments 3
I-2-3-3- Les fines ajouts (ou addition) 3
I-2-3-4- L'eau 8
I-2-3-5- Les adjuvants 9
I-2-4- propriétés des bétons de sable 9
I-2-4-1- Granulométrie et maniabilité 9
I-2-4-2- Résistance 10

I-2-4-3- L’adhérence aux armatures 12
I-2-4-4- Durabilité des bétons de sable 13
I-2-4-5- Résistance au gel et au dégel 14
I-2-4-6- Retrait 14
I-2-4-7- Fluage 15
I-2-4-8- Comportement thermique du béton de sable 16
I-2-4-9- Phénomène de ségrégation des constituants 16
I-2-4-10- Techniques particulières 17
I-2-5- Domaines d'emploi des bétons de sable 19
I-2-5-1- La préfabrication 19
I-2-5-2- La projection 20
I-2-5-3- Béton de sable coulé 20
I-2-6- Méthode de formulation de béton de sable [32] 21
I-2-6-1- Méthode théorique de formulation 21
I-2-6-1-1- La compacité et les méthodes de formulation des bétons 21
I-2-6-1-2- Estimation de dosage en fines d'un béton de sable 22
I-2-6-1-3- Dosage en eau d'un béton de sable 23
I-2-6-1-4- Estimation du dosage en sable 25
I-2-6-1-5- Estimation de la résistance en compression 26
I-2-6-2- Méthode expérimentale de formulation 28
I-2-6-2-1- Présentation générale de la méthode expérimentale 28
I-2-6-2-2- Les différentes étapes de la formulation 28
I-3- Béton léger 32
I-3-1- Définition 32
I-3-2- Classification du béton léger 32
I-3-3- Différence entre bétons classiques et bétons légers 33
I-3-4- Domaine d’utilisation des bétons légers 35

I-3-5- Les bétons de granulats légers 35
I-2-5-1- Définition 35
I-3-5-2- Classification des granulats légers 36
I-3-5-3- Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers 37
I-3-5-5- granulat d'argile 40
I-3-5-6- Les granulats de bois 40
I-4 - Conclusion 43

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAI EXPRIMENTALE

II-1- Introduction 44
II-2- Les caractiristique des matériaux utilisés 44
II-2-1- Ciment 44
II-2-2- Sable 45
II-2-3- Eau de gâchage 47
II-2-4- Super plastifiant 47
II-2-5-Ajouts (fillers) 48
II-2-6- L'argile calcinée 49
II-2-7- Coupeaux de bois 50
II-2-7-1- Traitement du bois 50
II-3- Formulation du béton 52
II-4- Les essais effectués sur le béton du sable 54
III-4-1- Essai à l'état frais 54
II-4-1-1- Essai de Maniabilimètre L.C.P.C 54
II-4-1-2- La densité 56
II-4-1-3- Mesure de la teneur en air occlus 56
II-4-2- Essai à l'état durcis 56

II-4-2-1 : Essai de traction par flexion 57
II-4-2-2- Essai de compression 58
II-4-2-3 - Retrait et gonflement 58
II-4-2-4 -Absorption d'eau par capillarité 60
II-4-2-5 – Porosité 61
II-4-2-6 - Conductivité thermique 62
II-4-2-7 -Résistance au feu 63
II-5- Aspect interne des bétons élaborés 64
II-6-Conclusion 66

CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

III-1- Introduction 67
III-2- Béton frais 67
III-2-1- Maniabilité 67
III-2-2- La densité 69
III-2-3- Air occlus 70
III-3- Béton durcis 71
III-3-1- Résistances à la traction 71
III-3-2- Résistances à la compression 72
III-3-3-Retrait 73
III-3-4-Gonflement 74
III-3-5-Absorption 75
III-3-6- porosité 77
III-3-7 - Conductivité thermique 78
III-3-8 – Résistance au feu 79

Liste des figures

Figure I- 1 : Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte)……...2

Figure I- 2 : Fines anguleuses……..4

Figure I- 3 : Fines sphériques……..4

Figure I- 4 : Microstructure du fumé de silice (forme sphérique)…….6

Figure I- 5 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de calcaire……..7

Figure I- 6 : Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS……..7

Figure I-7 : Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux de calcaire…….8

Figure I- 8 : Le temps d'écoulement en fonction du module de finesse……..10

Figure I- 9 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression 10

Figure I-10 : Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance à la compression.....11

Figure I-11: Effet de la granularité sur la résistance……..11

Figure I- 12 : Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation…..…...12

Figure I-13 : Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures…….....13

Figure I- 14 : Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores…….14

Figure I- 15 : Retrait d'auto-dessiccation……..15

Figure I- 16 : Retrait total……..15

Figure I- 17 : Fluage d'auto-dessiccation……16

Figure I- 18 : Fluage total……..16

Figure I- 19 : Eprouvettes non vibrées non piquées……...17

Figure I- 20 : Le béton de sable dans la préfabrication …….19

Figure I- 21 : Le béton de sable en projection ……..……20

Liste des figures

Figure I- 22 : Réalisation d'une piscine…….……20

Figure I- 23 : Tunnel d'accès au métro de Leningrad……21

Figure I- 24 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines……...……..23

Figure I- 25 : Influence du dimension d sur le porosité minimale du béton pour deux tailles du sable ……24

Figure I- 26 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée……...25

Figure I- 27 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)……...…..27

Figure I- 28 : Evalution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'adition ……31

Figure I- 29 : Masse volumique apparente en fonction-dû dosage en fines d'addition……..31

Figure I- 30 : Représentation schématique des différents types du béton légers ……..34

Figure I- 31 : Classification des bétons légers d'après Lafarge bétons granulats d'après ……34

Figure I- 32 : Coupeaux de bois……...……..42

Figure II-1 : Type de ciment utilisé……...44

Figure II-2 : Sable utillisé……..45

Figure II-3 : Courbe granulometrique de sable…….46

Figure II-4 : Adjuvant utilisé…….47

Figure II-5 : Calcaires utillisé……47

Figure II-6 : Protocole d'obtention des finesses de calcaire……48

Figure II-7 : Argile utilisé……..49

Figure II-8 : Protocole d'obtention de traitement du bois……...50

Figure II-9 : Coupeaux du bois traité……50

Figure II-10 : Analyse granulométrique des copeaux de bois compris le sable……....51

Figure II-11 : Malaxage du béton de sable……...53

Figure II-12 : Maniabilimètre à béton de sable ……..……..54

Figure II-13 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à béton de sable……...55

Figure II-14 : Mesure la densité du béton de sable……...55

Figure II-15 : Mesure de l'air occlus de BS de bois à l'aide d'un aéromètre……56

Figure II-16 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction……..57

Figure II-17: Dispositif de rupture à la compression……58

Figure II-18 : La mesure à l'aide de retractomètre……59

Figure II-19 : Appareillage pour la mesure du retrait……...60

Figure II-20 : Absorption d'eau par succion capillaire……..60

Figure II-21 : Mesure de la porosité accessible à l'eau…….61

Figure II-22 : Mesure conductivité thermique……...62

Figure II-23 : Echauffement de l'éprouvette par le four …….63

Figure II-24 : Echantillons de BSBH en %.....64

Figure II-25 : Echantillons de BSBS en %.....64

Figure II-26 : Variables étudiées……...65

Figure III-1 : Eprouvette de 50 % de BS BH……..67

Figure III-2 : Eprouvette de 50 % de BS BH…….....67

Figure III-3 : Temps d'écoulement du BS en fonction du % de BH……..68

Figure III-4 : Temps d'écoulement du BS en fonction du % de BS……68

Figure III-5 : La densité en fonction de % de BS……....69

Figure III-6 : La densité en fonction de % de BH……69

Figure III-7 : Air occlus en fonction de % de BH……70

Figure III-8 : Air occlus en fonction de % de BS…….70

Figure III-9 : Résistance à la traction en fonction de % de BH……71

Figure III-10 : Résistance à la traction en fonction de % de BS……..71

Figure III-11 : Résistance à la compression en fonction de % de BH……....72

Figure III-12 : Résistance à la compression en fonction de % de BS…….72

Figure III-13 : Evolution du retrait du BSBH en fonction de l'âge……73

Figure III-14 : Evolution du retrait du BSBS en fonction de l'âge…….73

Figure III-15 : Evolution du gonflement du BSBH en fonction de l'âge……...74

Figure III-16 : Evolution du gonflement du BSBS en fonction de l'âge……75

Figure III-17 : Absorption d'eau des BSBH……75

Figure III-18 : Absorption d'eau des BSBS……76

Figure III-19 : porosité en fonction de % de BH…….77

Figure III-20 : porosité en fonction de % de BS……..77

Figure III-21 : Conductivité thermique en fonction de % de BH……..…….78

Figure III-22 : Conductivité thermique en fonction de % de BS…….78

Figure III- 23 : Résistance à la compression en fonction de % de BH……..79

Figure III- 24 : Résistance à la compression en fonction de % de BS……...……79

Figure III- 25: Résistance à la compression des BSBH chauffés à T=200 °C et T=400 °C à T= 600 °C……..……..80

Figure III- 26: Résistance à la compression des BSBS chauffés à T=200 °C et T=400 °C à T= 600 °C……80

Figure III-27 : Perte de masse des BSBH chauffés à T=200 °C et T=400 °C et à T= 600 °C. ……..81

Figure III-28 : Perte de masse des BSBS chauffés à T=200 °C et T=400 °C et à T= 600 °C. ……..81

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Classification fonctionnelle des bétons légers …….32

Tableau I-2 : Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87……...33

Tableau I-3 : Choix des granulats en fonction des classes de béton ……38

Tableau I-4 : Caractéristiques des granulats légers……...……...39

Tableau I-5 : Influence du type de traitement des granulats de bois sur les propriétés physico mécaniques du béton de bois …….43

Tableau II-1 : Analyse chimique du ciment et composition du clinker …….45

Tableau II-2 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé……...45

Tableau II-3 : Caractéristiques du sable…...……...46

Tableau II-4 : Caractéristiques du calcaire……..48

Tableau II-5 : Caractéristiques d'argile utilisé……..…..49

Tableau II-6 : Caractéristiques physiques des granulats du bois…….51

Tableau II-7: Composition des différents bétons de BH pour un 1 m^3……..52

Tableau II-8 : Composition des différents bétons de BS pour un 1 m^3……..53

Notation et Abréviation

A : Addition

O : Octaédrique.

T : Tétraédriques.

BS : Béton de sable.

BST : Béton de sable témoin.

BSBH : Bétons de sable de bois traité humide.

BSBS : Bétons de sable de bois traité sec.

CPJ : Ciment portland composé.

E/C : Eau / Ciment.

Rc : Résistance à la compression.

R_f : Résistance à la flexion.

Rt : Résistance à la traction.

Mair : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air.

Msec : La masse d'éprouvette sèche.

Meau : La masse d'éprouvette immergée dans l'eau.

γ_{bs} : La masse volumique sèche.

C : Ciment.

Introduction Générale

Problématique

Pour les conditions climatiques dans des environnements sévères, de nouveaux bétons destinés à la construction de murs extérieurs et de toits sont réellement nécessaires pour offrir une meilleure résistance thermique et rivaliser avec les matériaux de construction traditionnels. Les déchets de bois sont générés en masse en raison de l'essor des activités industrielles dans le monde. De centaines de tonnes de déchets de bois sont jetées quotidiennement dans les décharges, y compris les coffrages en bois de l'industrie de la construction et les palettes en bois de l'industrie du transport maritime.

Objectif

Par conséquent, la valorisation de déchets d'industrie par leur transformation en matériaux de construction isolants. L'idée d'une réduction de la masse volumique, entraînant une augmentation des performances thermiques de ces matériaux peut donc se révéler intéressante. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du facteur d'allégement sur les caractéristiques physicomécaniques des bétons calcaires légers, ainsi que l'intérêt d'une telle procédure d'allégement sur l'amélioration des performances thermiques des matériaux élaborés.

Pour se faire cet étude sera présentée sous trois titre :étude bibliograhique,essais et matériaux expérimentale, interprétation des résultat .

Le premier chapitre composé de deux partie : dont la première ce chapitre est une étude bibliographique à travers des diverses documentations concernant le béton de sable et les bétons légers et plus particulièrement les bétons du granulat léger. Ainsi un état de connaissance sur l'influence du bois sur le comportement physiquomécanique et sur la durabilité du béton spécialement aux transferts thermiques dans les matériaux poreux

Dans le deuxième chapitre nous exposons en détail les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que les différentes étapes de l'étude expérimentale réalisée sur deux séries de bois dont la substitution du sable a été par deux types de traitement de bois

Les résultats obtenus ont été exposés ,interprétés et analysés sans le troisième chapitre à la fin , nous terminons ce travail pour une conclusion général dont laquelle nous rappelons les principaux résultats obtenus

Chapitre I

I-1-Introduction

Le béton de sable prend aujourd'hui sa place dans ces famille et propose, ainsi que précédent exposé, des caractéristiques spécifiques qui peuvent en faire un matériau recherche pour un usage donné.

Ce chapitre est une synthèse bibliographique à travers des diverses documentations concernant les bétons légers et plus particulièrement les bétons du granulat léger. Ainsi un état de connaissance sur l'influence du bois sur le comportement physiquomécanique et sur la durabilité du béton spécialement aux transferts thermiques dans les matériaux poreux.

I-2-Beton de sable

I-2-1- Historique

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le béton aggloméré confectionné par F.coignet dans le 3ème quart de XIX(19ème)siècle. Il était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement à Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Saïd en Egypt. (Hauteur : 52m) et du pont de New-York.

Les premières tentatives de correction granulaire restent l'apanage de François. Coignet qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872,mélange a un sable fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction.

Cette technique a été mise au point depuis des décennies, en URSS, en témoignent la réalisation du port Kaliringrad en Prusse- Orientale en béton de sable au début du siècle et aussi du pont de Chernavskif coulé sur place à Voronej (500Km de Moscou).

A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder a permis l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines : (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.). **[1]**



Figure I- 1 : Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte). **[2]**

I-2-2- Définition

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø< 10 mm **[3]**

I-2-3- Composition du béton de sable

I-2-3-1- Les sables

Les sables utilisables sont ceux conformes aux spécifications des bétons classiques, mais des sables considérés non performants peuvent également être employés.

Les sables sont de quatre origines :

- ✓ Les sables alluvionnaires propres : ils s'épuiseront à terme.
- ✓ Les sables marins : leur exploitation est peu développée.
- ✓ Les sables géologiques anciens: généralement mal gradués et pollués, ils sont appelés à remplacer les sables alluvionnaires fluviaux. Le sable de dunes (sable éolien) pourrait être classé dans cette catégorie de sable.
- ✓ Les sables de concassage et de broyage de roches massives. **[4]**

❖ **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. **[5]**

I-2-3-2- Les ciments

Le ciment est un liant hydraulique, il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine, qui mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. **[6]**

Pour les bétons de sable, les dosages en ciments sont du même ordre de grandeur que ceux des bétons classiques (entre 200 et 400 Kg/m3). Dans cette fourchette et pour un même usage que des bétons classiques. **[7]**

I-2-3-3- Les fines ajouts (ou addition)

Par définition, le béton de sable contient une (ou plusieurs) addition(s), il s'agit essentiellement de fillers- calcaires, siliceux, de laitier - de cendres volantes, mais aussi d'autres fines (argile calcinée, ultra-fines...).

Les additions proviennent directement du sable (cas dessables fillérisés) et/ou d'apport. Elles comblent en partie les vides du sable : elles augmentent donc sa compacité naturelle et créent une granulométrie aussi continue que possible, mais elles participent également à l'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange, elles permettent ainsi d'augmenter les performances sans augmenter le dosage en ciment en évitant ainsi les risques de retrait et d'excès de rigidité provoques par un surdosage en ciment. **[8]**

On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fume de silice, pouzzolanes broyées…) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives…). **[9]**

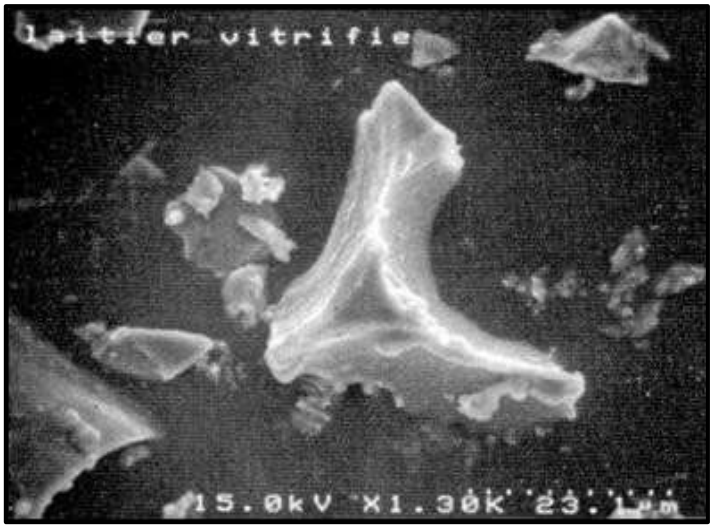


Figure I- 2 : Fines anguleuses.

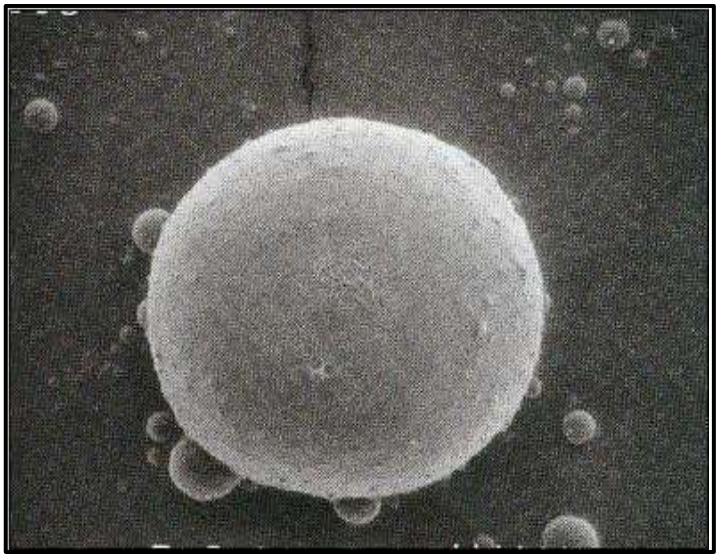


Figure I- 3 : Fines sphériques.

- **Les cendres volantes**

Les cendres volantes sont aussi appelées cendres pulvérisées de combustible. Elles sont recueillies à partir des installations de dépoussiérage électrostatique ou mécanique des fumées de centrales thermiques de charbon. Les particules de cendres volantes sont sphériques donc avantageuses vis-à-vis de la demande en eau. **[10]**

Elles ont une finesse très élevées avec un diamètre compris entre (1 et 100 μm). Leurs surfaces spécifiques de Blaine sont généralement comprises entre 250 et 600 m²/kg. Elles sont composées essentiellement de SiO_2 et de Al_2O_3. **[10]**

- **Le laitier granulé de haut fourneau**

C'est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidie par aspersion d'eau. C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de (40 -50%), de silice (25 – 35%) de l'alumine (12 – 30%) et de la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. Tous ces éléments sont pratiquement les mêmes que ceux du clinker. **[11]**

- **Les pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont des produits naturels issus des roches volcaniques ou des roches sédimentaires, composées essentiellement de silice $SiO_2 \geq$ %, d'alumine Al_2O_3 et d'oxyde ferrique FeO_3. Selon la norme ASTM C 618 **[12]** la totalité des trois Oxydes (SiO_2 + Al_2O_3+ FeO_3) doit être supérieure à 70%.

- **Fumé de silice**

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 μ m, 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. **[13]**

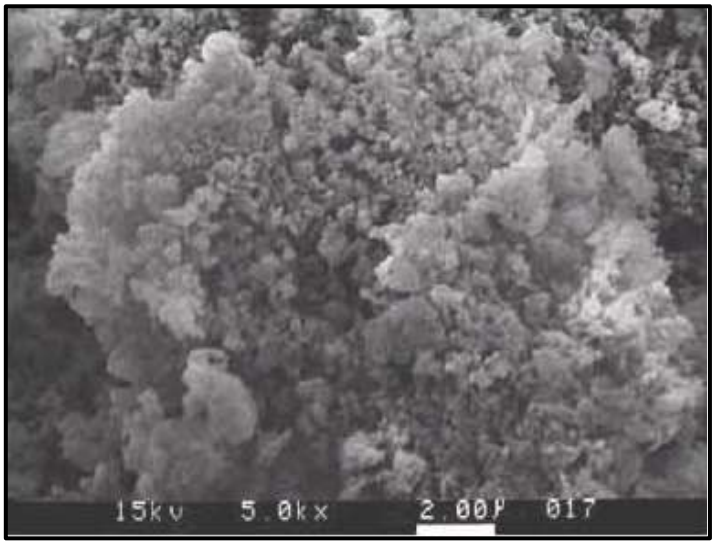


Figure I- 4 : Microstructure du fumé de silice (forme sphérique). **[14]**

- **Filler calcaire**

Le filler calcaire n'est pas considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif. Son avantage est sa finesse qui peut être utilisée pour optimiser la granulométrie de mélanges de béton. **[3]**

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. **[15]**

Les résultats obtenus par les recherches précédentes ont mené à conclure que la quantité de calcaire ayant une influence significative sur le comportement du béton recyclé et du béton ordinaire, à l'état frais et durci.

A- Effet des fillers calcaires sur le béton à l'état frais

- ✓ **Ouvrabilité**

Plusieurs études ont montré que l'incorporation des fillers calcaires influe sur la maniabilité. en variant les pourcentages des fillers calcaires dans le béton de 0,5,10,17.5,20 et 25%, les auteurs ont remarqué que l'eau de gâchage est proportionnelle à l'augmentation du pourcentage des fines calcaires et donc Les bétons ordinaires ont une ouvrabilité plastique et très plastique pour les compositions BO 5% et BO 10%, à l'exception de la composition BR 5% qui donne une ouvrabilité plastique. **[16]**

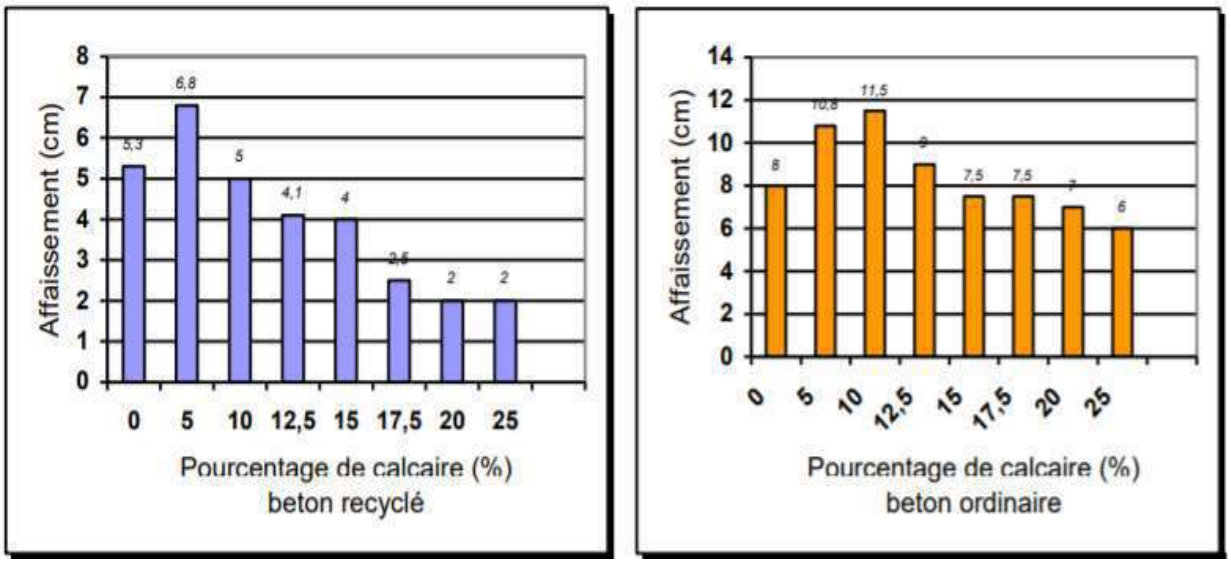


Figure I- 5 : Variation de l'affaissement en fonction du pourcentage de calcaire. **[16]**

✓ **Compacité**

Un béton de sable se diffère d'un béton traditionnel par sa granulométrie fine. Donc, la porosité dans ce cas 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 béton de sable ne sera finalement qu'un mortier. A cet effet, le calcaire, avec une finesse plus grande que celle du ciment utilisé, s'insère dans les vides et pores capillaires : il densifie ainsi le squelette du béton. **La figure I-6** montre l'effet des fillers calcaires sur la densité de différents sables sable alluvionnaire RS, sable de dune DS et le mélange RDS. **[17]**

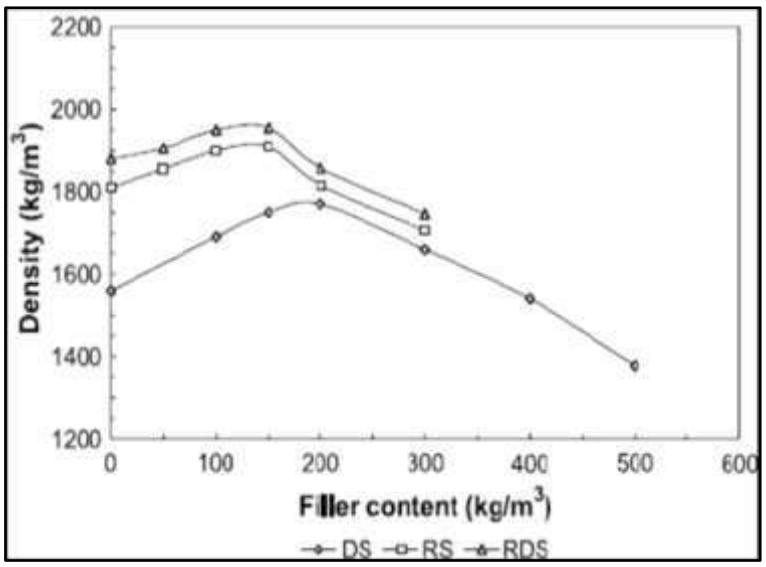


Figure I- 6 : Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS. **[18]**

B- Effet des fillers calcaires sur le béton à l'état durci

✓ **Résistance à la compression**

Ont trouvé que l'ajout d'une quantité optimale de filler calcaire contribue à l'évolution de la résistance à la compression à court et long terme pour les bétons ordinaires et le bétons recyclés, ce qui illustré par les **figures I-1-7** respectivement. D'après les deux figures, on conclue que le calcaire, à raison de 10% et de 12,5%, engendre une augmentation importante de la résistance à la compression pour les bétons ordinaires et les bétons recyclés respectivement. Ont montré que L'incorporation des fines a amélioré la résistance à la traction par flexion pour tous les âges. Cette résistance a une tendance semblable à celle observée pour la résistance à la compression des mortiers correspondants. L'augmentation était plus prononcée a jeune âge. Apres 28 jours, l'effet de toutes les fines de pierres était essentiellement le même indépendamment de leurs compositions et leurs quantités dans le mélange. **[19]**

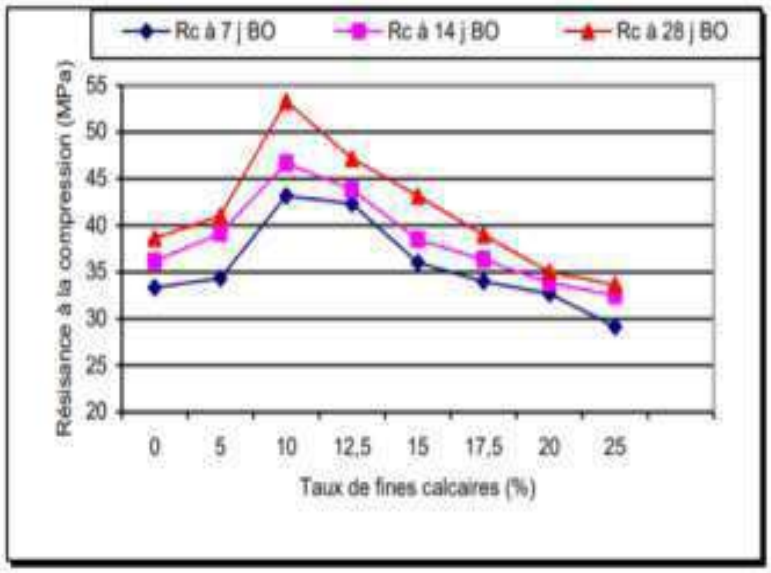


Figure I-7 : Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux de calcaire. **[17]**

I-2-3-4- L'eau

Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante. Le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des traditionnels et pour le réduire on a recours à des adjuvants. En général, le rapport E/C est compris entre 0,6 et 0,7. **[4]**

I-2-3-5- Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques «purs » ou de mélanges des produits organiques ou minéraux qui sont généralement incorporés aux bétons lors du malaxage ou lors de la mise en- œuvre. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton.

L'utilisateur peut être amené à utiliser simultanément plusieurs adjuvants ayant des fonctions différentes, soit pour obtenir des effets conjoints, soit pour corriger des effets secondaires non recherchés ou amplifier l'une des fonctions principales.

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant peuvent varier en fonction de son dosage dans le béton et les divers composants de celui-ci, en particulier du ciment. Pour l'interaction adjuvant-adjuvant, l'employeur doit s'assurer que les adjuvants utilisés sont compatibles entre eux, et qu'ils sont de même marque.**[20]**

I-2-4- propriétés des bétons de sable

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. **[21]**

I-2-4-1- Granulométrie et maniabilité

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

D'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport E/C+A (A=Addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau : plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité. **[22]**

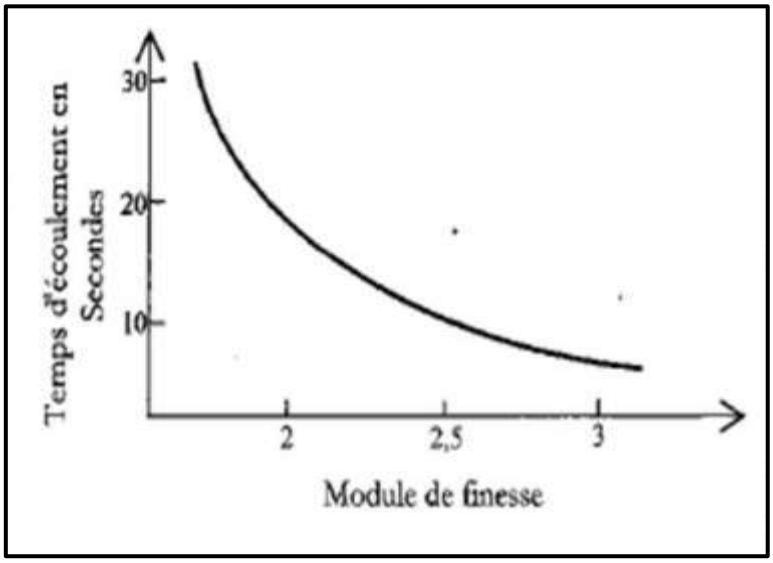


Figure I- 8 : Le temps d'écoulement en fonction du module de finesse. **[22]**

I-2-4-2- Résistance

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

a- La finesse de l'addition

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 quel que soit la granulométrie du sable (sable alluvionnaire, sable de dune…). **[22]**

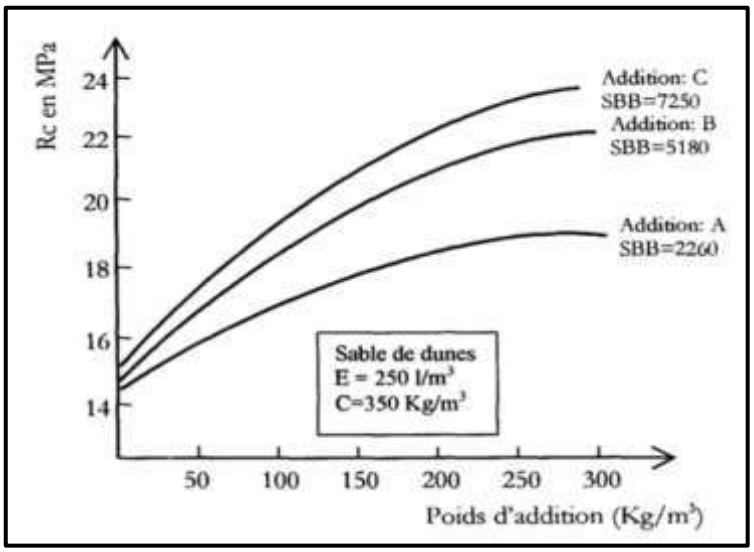


Figure I- 9 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance à la compression. **[22]**

b- La nature de l'addition

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. **[23]**

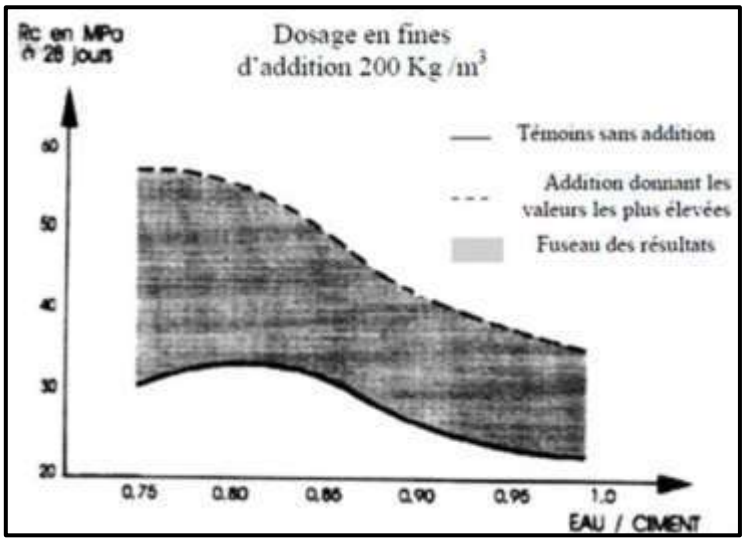


Figure I-10 : Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance à la compression. **[23]**

c- La dimension du D_{max} (0/D)

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate que l'effet du diamètre D_{max} du plus gros granulat est peu important et en tout état de cause, pas défavorable aux sable. Cependant on constant que la maniabilité est très différente selon le type de sable . **[23]**

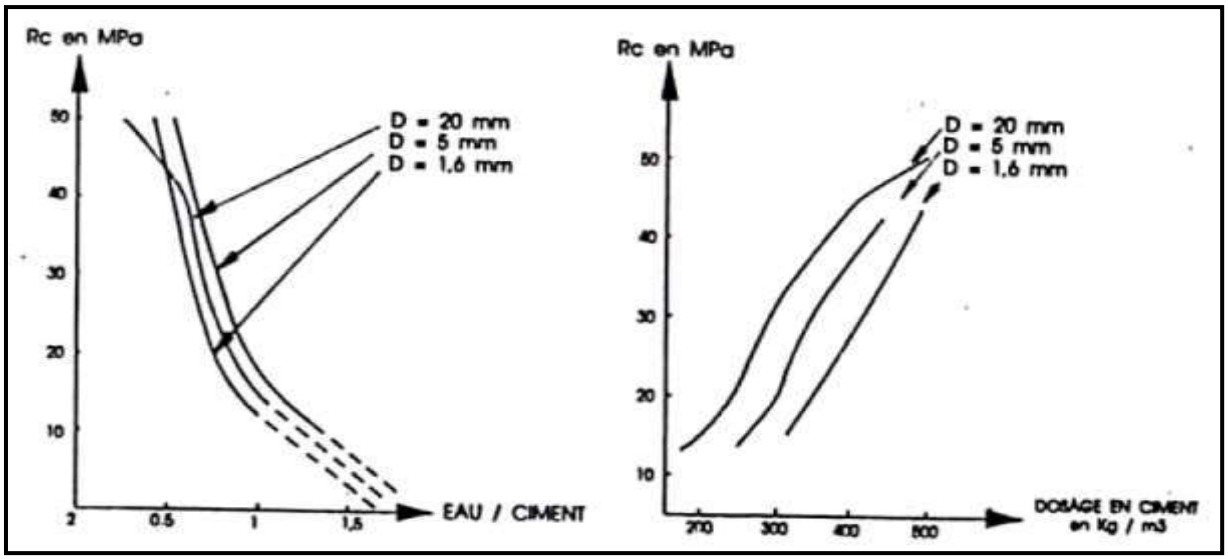


Figure I-11: Effet de la granularité sur la résistance. **[23]**

I-2-4-3- 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. **[24]**

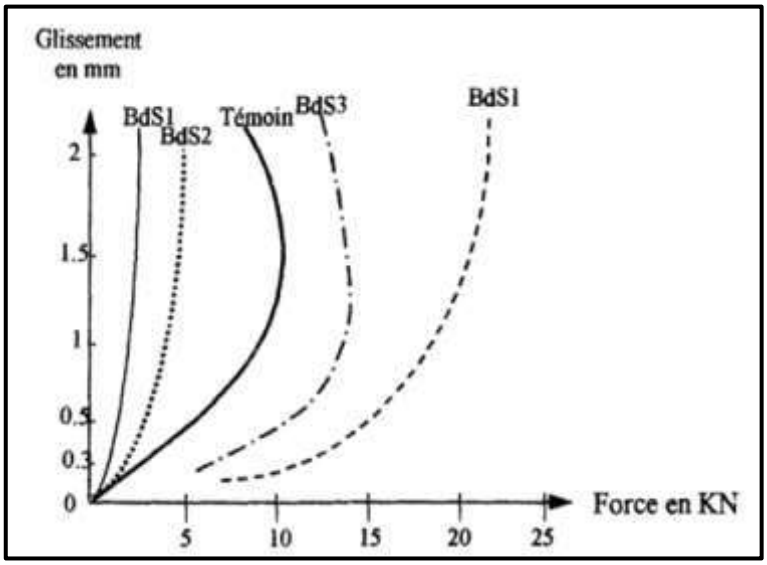


Figure I- 12 : Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation. **[24]**

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. **[25]** 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.

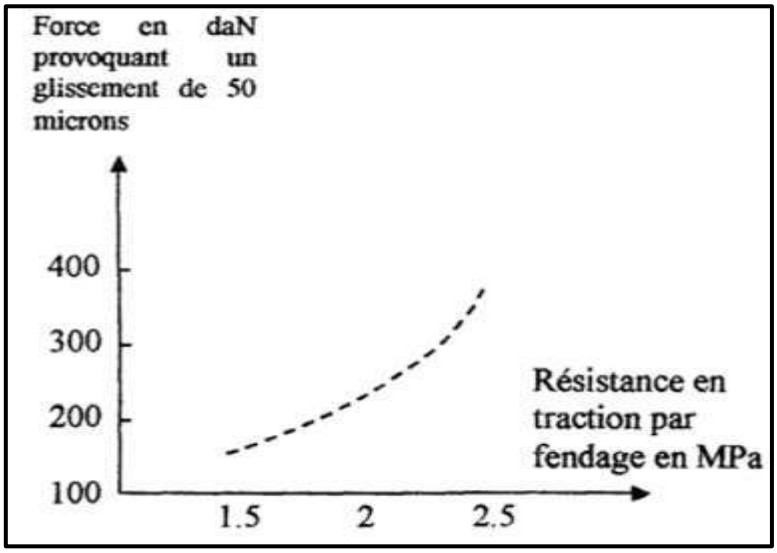


Figure I-13 : Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures. **[25]**

I-2-4-4- Durabilité des bétons de sable

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques…etc, c'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité.

Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en œuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.

En fin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la vanne, phare de Port –Said en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du trocadéro à Paris, etc. **[26]**

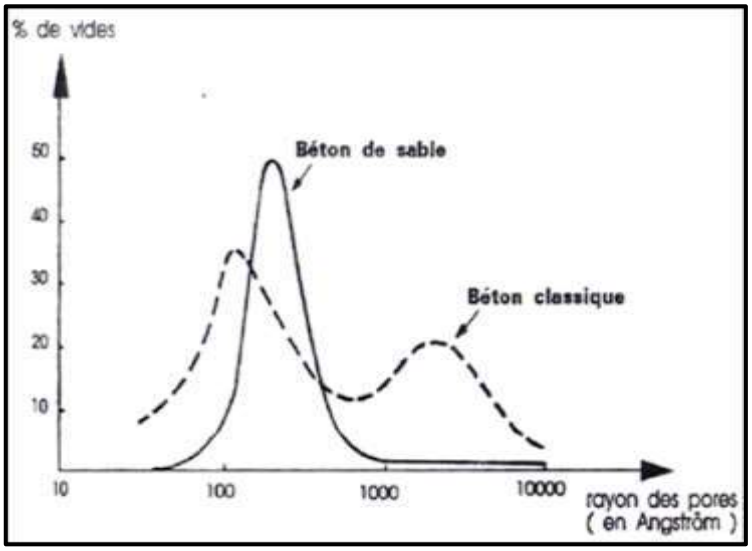


Figure I- 14 : Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores. **[23]**

I-2-4-5- 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. **[23]**

I-2-4-6- Retrait

Il existe deux sortes de retraits :

- **Retrait endogène**

Ce type de retrait est la conséquence de l'absorption de l'eau des pores capillaires due à l'hydratation du ciment non encore hydraté, phénomène connu comme l'auto dessiccation.

- **Retrait de séchage**

L'eau qui s'évapore d'un béton conservé dans l'air non saturé provoque du retrait, dit de séchage. Une partie de ce mouvement est irréversible et doit être distinguée de celui réversible dû à une conservation où alternant des conditions de séchage et d'humidité.

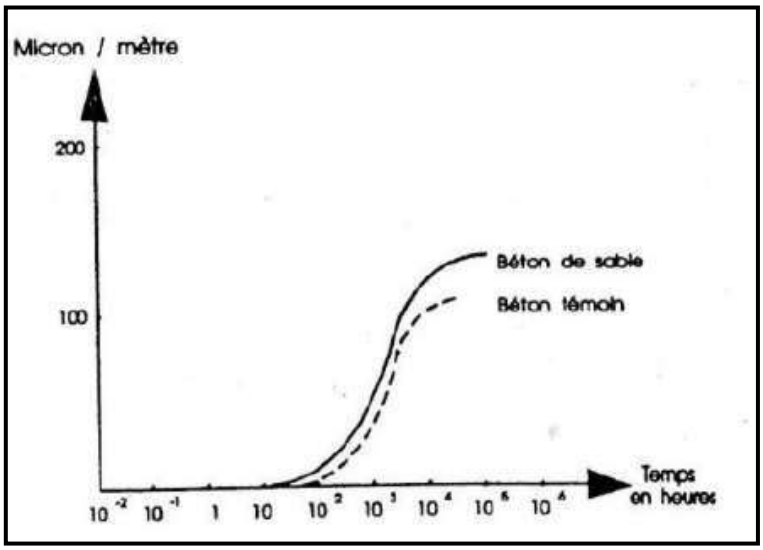


Figure I- 15 : Retrait d'auto-dessiccation. **[27]**

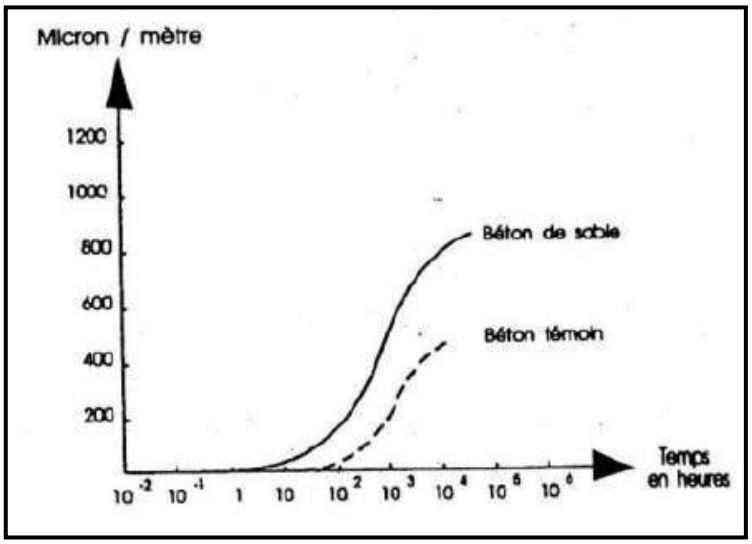


Figure I- 16 : Retrait total. **[27]**

I-2-4-7- Fluage

Le fluage est une déformation qui résulte de l'effet d''une contrainte constante appliquée au béton**..** Les valeurs du fluage du béton de sable, sont deux fois que celles du béton ordinaire. Ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25MPa. **[28]**

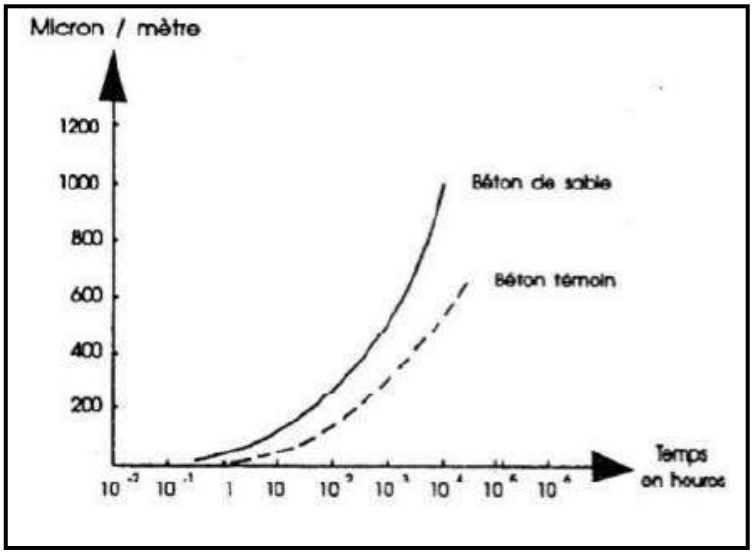


Figure I- 17 : Fluage d'auto-dessiccation. **[28]**

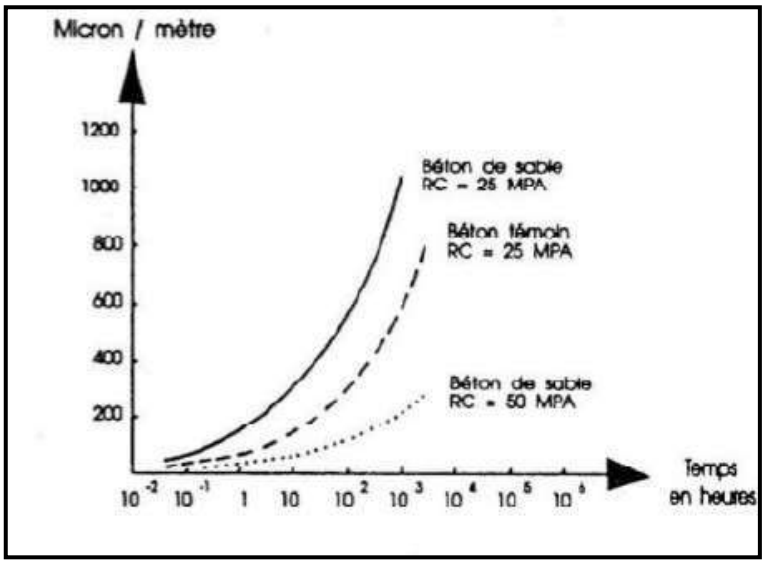


Figure I- 18 : Fluage total. **[28]**

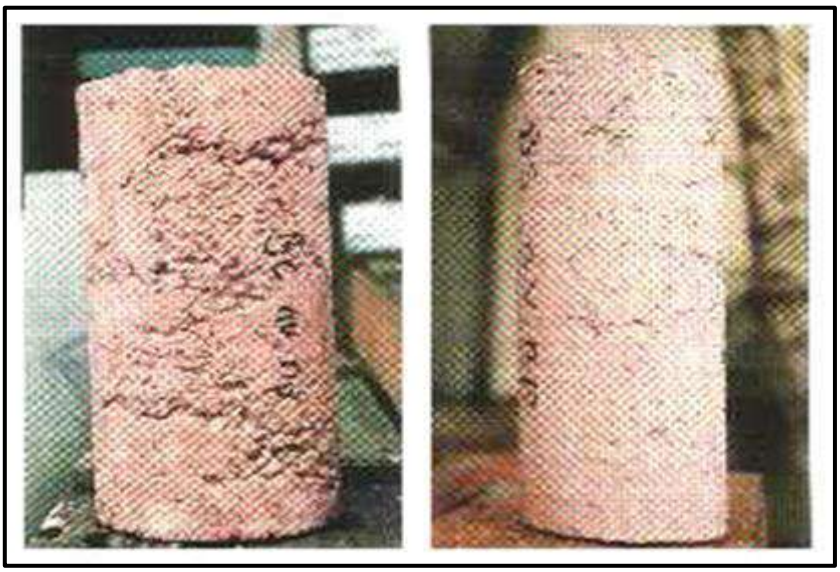
I-2-4-8- Comportement thermique du béton de sable

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. **[28]**

I-2-4-9- 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 oeuvre 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). **[29]**



Béton ordinaire Béton de sable

Figure I- 19 : Eprouvettes non vibrées non piquées. **[29]**

I-2-4-10- Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégies dans certains cas l'utilisation des béton de sable par rapport aux bétons traditionnels, dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du béton de sable 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. **[23]**

- ✓ **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. **[29]**

La projection de béton de sable est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines par sa finesse granulométrique, le béton

de sable 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 béton de sable projeté, sa granulométrie fine et donc sa pompabilite en fait du béton de sable projeté une solution adapté à des problèmes mal résolus par les bétons traditionnels. **[29]**

- ✓ **Bétons de sable fluides**

Les bétons fluides ont été développes 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 béton de sable s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le béton de de sable minimise le risque de ségrégation.**[30]**

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

Les bétons de sable fluides sont intéressants pour certaines applications en génie civil comme les pieux forés, les injections et les reprises en sous-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 béton de sable.

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 lie à l'utilisation des bétons de sable, il pourra être mieux adapté aux cas suivants :

- Risques de ségrégation préjudiciables.
- Forte densité de ferraillages.
- Recherche d'un produit fini.

Le béton de sable fluidifié présente un surcoût allant de 10 à 25 % par rapport à un béton traditionnel. Par exemple, les bétons de sable nécessitent des dosages plus élevés en fluidifiants et additions que les bétons traditionnels, pour avoir des performances identiques. **[30]**

I-2-5- Domaines d'emploi des bétons de sable

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles tiennent davantage à ses propriétés spécifiques. Les figures suivantes illustrent ces applications : **[5]**

I-2-5-1- La préfabrication

Le béton de sable peut être utilisé dans la préfabrication pour des murs architecturaux, pour des mobiliers urbains, en bâtiment et en voirie (**Figure I- 20)**. **[31]**



Figure I- 20 : Le béton de sable dans la préfabrication. **[31]**

I-2-5-2- La projection

Le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments. **[5]**



Figure I- 21 : Le béton de sable en projection. **[31]**

I-2-5-3- Béton de sable coulé

Il peut être coulé sur place dans les routes et autoroutes, dans les aérodromes et en bâtiment. **[5]**



Figure I- 22 : Réalisation d'une piscine. **[31]**



Figure I- 23 : Tunnel d'accès au métro de Leningrad. **[31]**

I-2-6- Méthode de formulation de béton de sable

I-2-6-1- Méthode théorique de formulation

I-2-6-1-1- La compacité et les méthodes de formulation des bétons

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion et écoulement) puis joue le rôle d'une colle per mettant de développer les propriétés mécaniques et de durabilité du 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 **[32]** . Caquot a pu établir à partir des résultats expérimentaux une relation mathématique entre le volume des vides (V) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D max).

$$\mathbf{V= V_0(d/D_{max})^{1/5}} \text{..... (1)}$$

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.

I-2-6-1-2- Estimation de 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 µm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.

2- Toute l'étendue du sable comprise entre 80µm et le diamètre maximal du sable D max, 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 80µm et l'étendue du sable comprise entre 80 µm et le diamètre maximal, la porosité (Ps) du sable peut être calculée selon la formule de Caquot :

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

La constante expérimentale (V_0) est prise comme étant la moyenne des valeurs extrêmes (0.7-0.8).

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

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

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

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

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

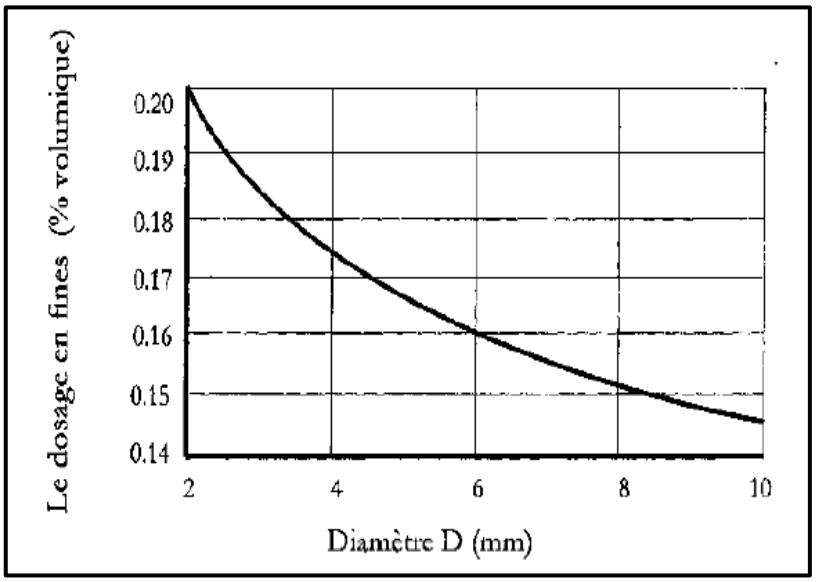


Figure I- 24 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. **[32]**

I-2-6-1-3- Dosage en eau d'un béton de sable

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

$$(e + v)\ min = 0.8\ (d/D_{max})^{1/5} \quad \text{.....(4)}$$

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 dé floculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

d = (60/(f)) mm × ρ…….(5)

Avec:

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

ρ : Densité du constituant exprimée en g/cm^3.

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

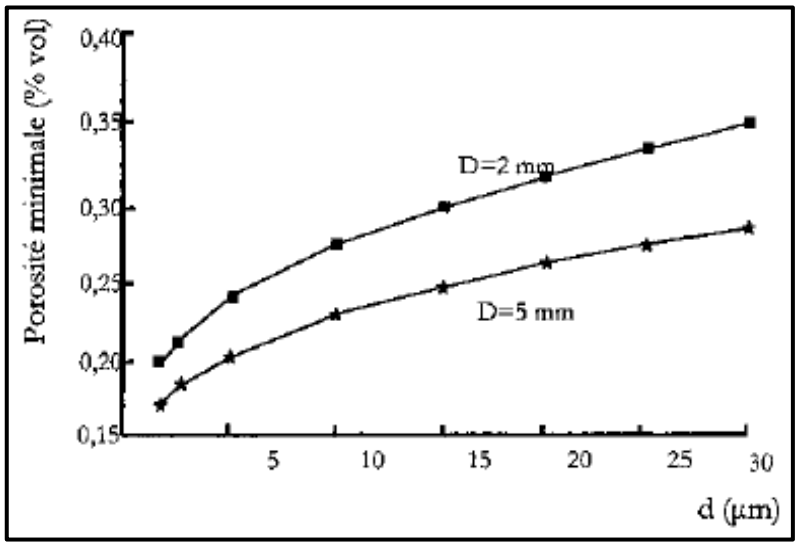


Figure I- 25 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles du sable. **[32]**

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.

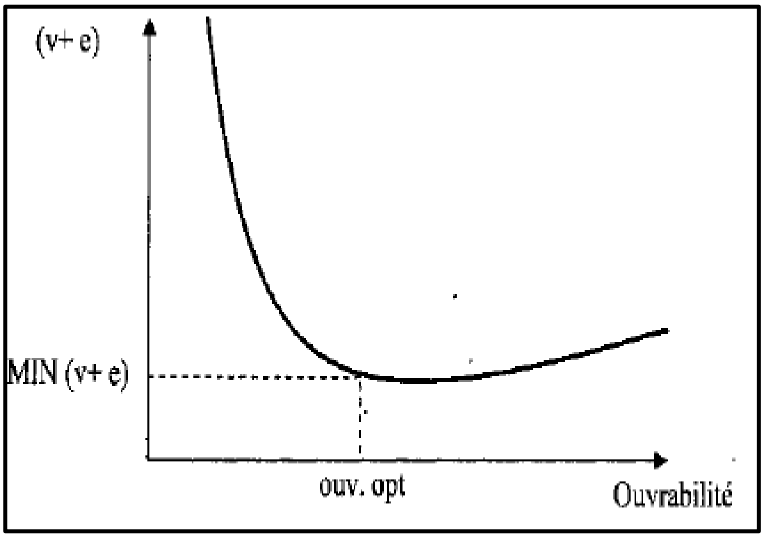


Figure I- 26 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée. **[32]**

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piégera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e + v) supérieure à (e + v) min, alors pour des quantités d'eau supérieures à 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]……………………………………………(6)

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

I-2-6-1-4- Estimation du dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, (1m3), 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)…….(7)

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

I-2-6-1-5- 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 formule de FERET a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{Kf \times Rc}{\left(1+\frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)} \text{……..……(8)}$$

Avec :

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5.

Rc : Classe vraie du ciment (MPa).

E : dosage en eau total (1/m3) ;

V : air piégé (1/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

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

Avec :

K_1 = K cv (CV/C) + K fs (FS/C)

0.2 < K cv < 0.4 0.2 < K fs < 3.3 K1 ≤ 0.5

K_2 = K fil (Fil / C)

0 < K fil ≤ 0.4 K1 < 0.2

K_1: coefficient pouzzolanique.

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire.

K cv, K fs, K fil : coefficients d'équivalence en ciment de différentes additions en fines.

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

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

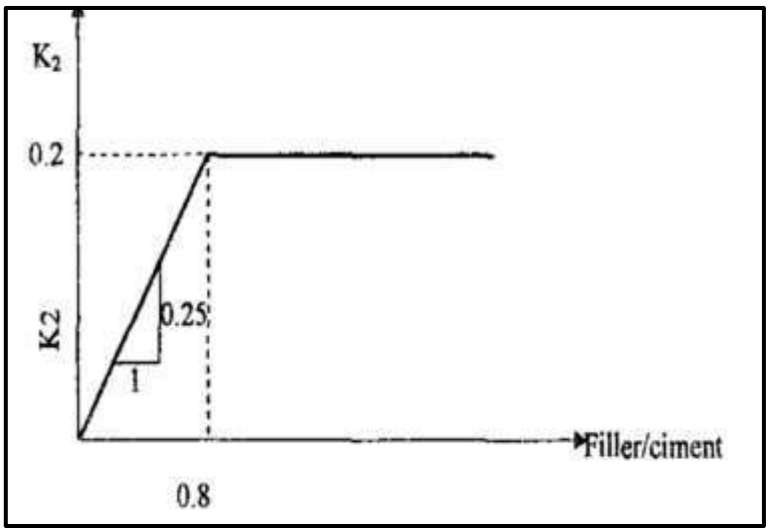


Figure I- 27 : Coefficient d'activité du filler calcaire

(modèle). **[32]**

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

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

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

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.

I-2-6-2- Méthode expérimentale de formulation

I-2-6-2-1- Présentation générale de la méthode expérimentale

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 fixe, 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 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.

Différentes 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.

I-2-6-2-2- Les différentes étapes de la formulation

A- 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.

- **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).

- **Dosage en eau**

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E ($1/m^3$), suffît.

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.

- **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 dé floculer 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 :

$$\mathbf{Vair + V\,c + V_E + V\,adj + V\,sable = 1\,000\ (En\ litres)} \ldots\ldots\ldots\ldots\mathbf{(9)}$$

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule de un mètre cube du béton S (Kg/m^3).

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

Lorsqu'on fait la confection de la formule initiale du béton, et la détermination de :

- La valeur du temps d'écoulement « **t** » au Maniabilimètre LCPC.
- La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

Cette formule doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$\mathbf{S_i = S_{i-1}(MVT_{i-1} - MVR_{i-1}) + V \times MVA_{Sable}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\mathbf{(10)}$$

Avec :

$\mathbf{S_i}$: Dosage en sable après correction.

$\mathbf{S_{i-1}}$: Dosage en sable avant correction MVAT, MVAR.

MVA $_{\textbf{Sable}}$: La masse volumique absolue du sable.

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

Tel que : (MVAT) et (MVAR) représentent respectivement la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle du béton.

Si le temps d'écoulement au Maniabilimètre est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si le temps d'écoulement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (-V dans l'équation).

Après chaque correction, la masse volumique apparente théorique devra être comparée à la masse volumique apparente réelle.

B- 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 :

$$\mathbf{S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1})} \quad \textbf{.....(11)}$$

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 :

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

b- Fine d'addition N°2 : Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m^3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.

c- Fine d'addition N° 3 : Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m^{3}de fines.

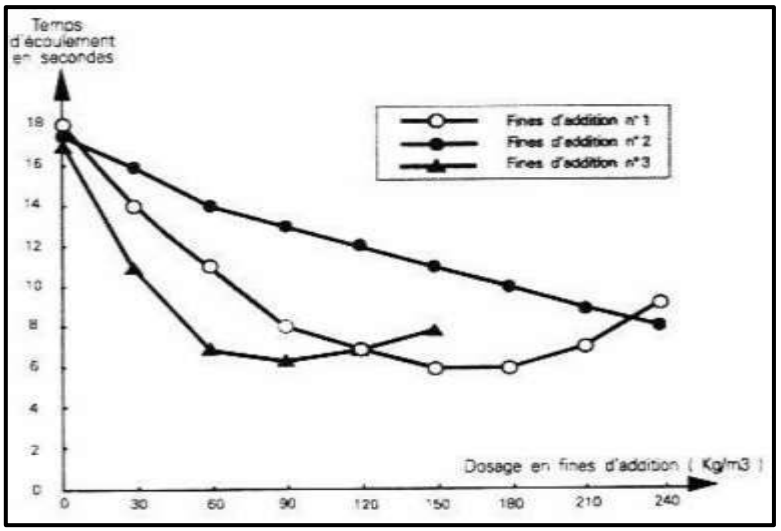


Figure I- 28 : Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition. **[32]**

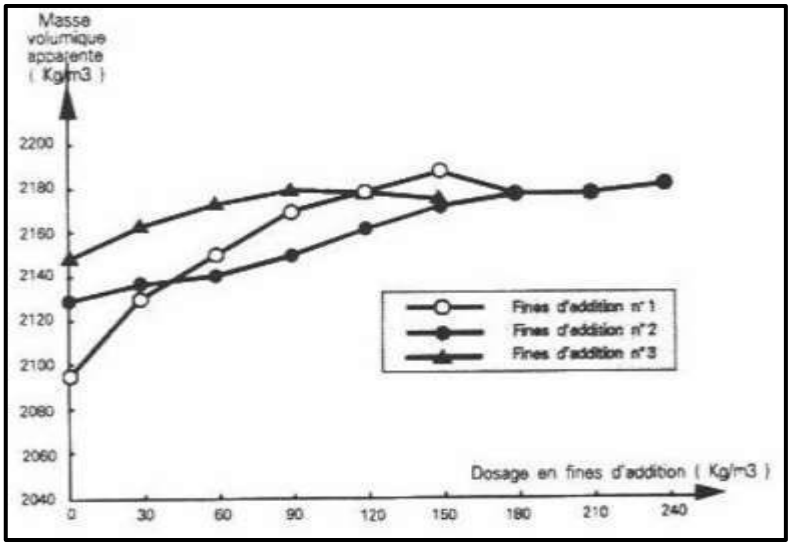


Figure I- 29 : Masse volumique apparente en fonction-dû dosage en fines d'addition. **[32]**

I-3- Béton léger

I-3-1- Définition

Les bétons légers sont des bétons constitués de granulats de faible densité (billes de polystyrène, argile, schiste, particules de bois…etc.) ou éventuellement de mousse cellulaire.

Ils ont des utilisations très importantes dans le demain de la construction, en raison de leur faible masse volumique et leurs caractéristiques d'isolation thermiques et phoniques, ce qui nous permet d'économiser la consommation d'énergie. **[33]** La commission des bétons légers RILEM **[34]** propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont La masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 Kg/m^3. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'American Concrète Institute **[35]** la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m3 après séchage à l'air pendant 28 jours **[36]**

I-3-2- Classification du béton léger

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. il s'agit :

- de la masse volumique sèche, désignée par γ_{bs}.
- de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours. **[37]**

Tableau I- 1 : Classification fonctionnelle des bétons légers**. [38]**

Classe	I	II	III
Type de béton léger	Béton léger de construction	Béton léger de construction et d'isolation	Béton léger d'isolation
Masse volumique (kg/m^3)	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	>15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W.m^{-1}.K^{-1})	–	< 0.75	< 0.30

Une autre classification des bétons légers est celle de la norme ACI 21 213R-87. Celle-ci classifie les bétons légers en fonction de la masse volumique en trois catégories. **[39]**

Tableau I- 2 : Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87. **[39]**

Classe du béton	Masse volumique (kg/m^3)	Résistance à la compression (MPa)
Béton de granulats légers de structure	1350 à 1900	≥ 17
Le béton de résistance moyenne	800 à 1350	7 à 17
Le béton léger de faible masse volumique	300 à 800	_

I-3-3- Différence entre bétons classiques et bétons légers

Malgré leurs bonnes qualités, les bétons classiques ont toujours présenté des inconvénients à savoir :

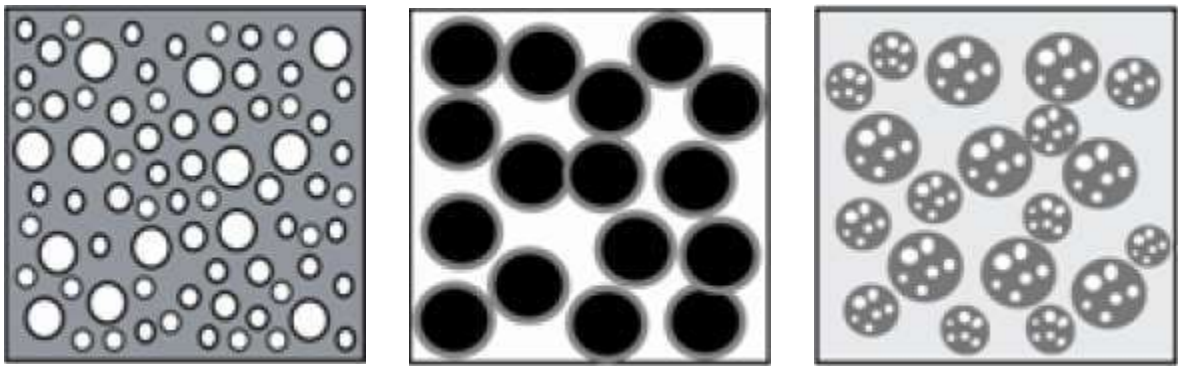
- Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres. **[40,41]**

En revanche l'utilisation d'un béton de faible masse volumique peut être bénéfique en terme :

- D'éléments porteurs de faible section
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance.
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique. **[11]**

La faible masse volumique des bétons légers provient de leur porosité élevée. Cette porosité peut être localisé dans trois endroits :

- Au sein des granulats : c'est le cas **des bétons de granulats légers**.
- Dans la pâte du ciment : c'est le cas **des bétons cellulaires.**
- Entre les gros granulats par suppression des granulats fins : c'est le cas **des bétons caverneux**.



Béton Cellulaire Béton caverneux Béton de granulats légers

Figure I- 30 : Représentation schématique des différents types de béton légers.

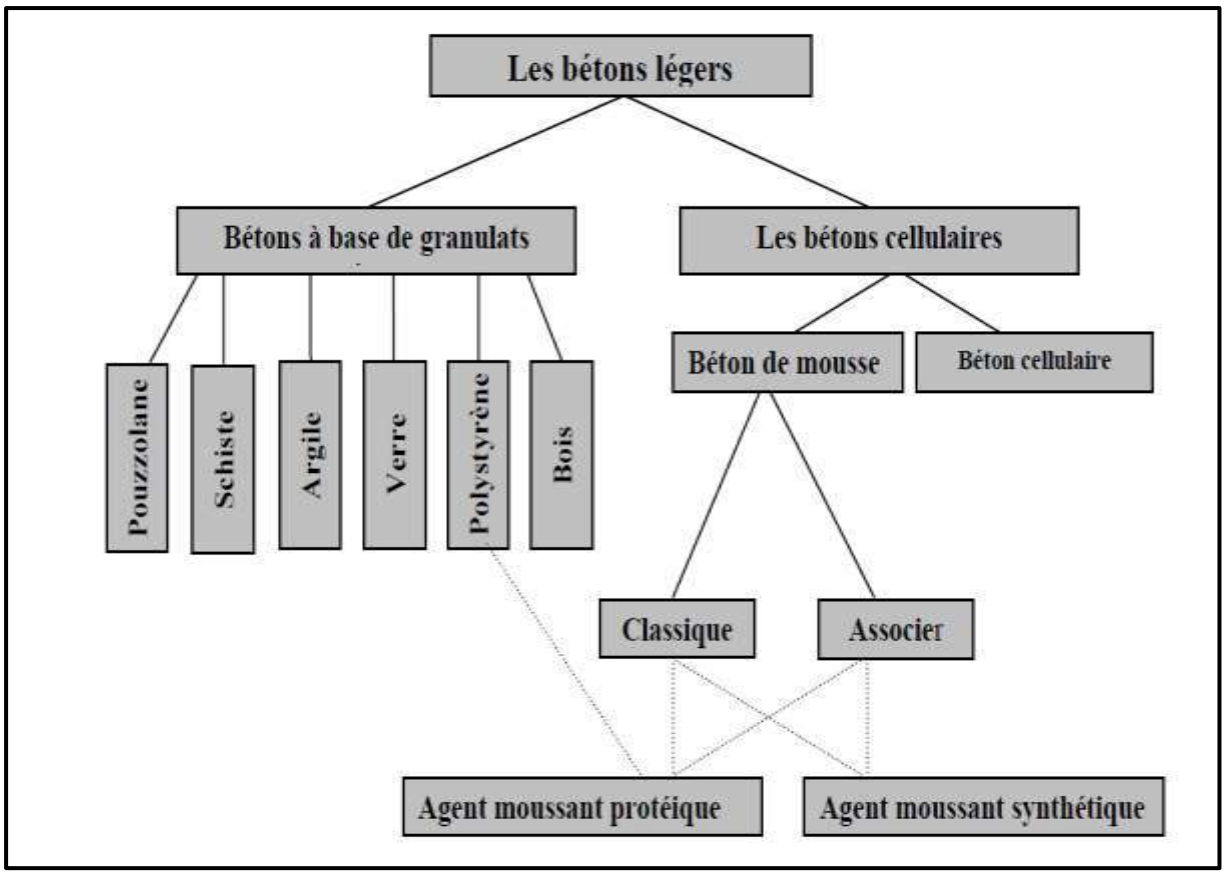


Figure I- 31 : Classification des bétons de granulats légers. **[42]**

I-3-4- Domaine d'utilisation des bétons légers

Selon leur résistance, les bétons légers sont utilisés soit comme :

Béton de structure : c'est le cas des bétons léger de haute performance, les bétons au laitier expansé, à l'argile frittée Expansée, aux cendres volantes. …etc.

Isolant porteur : c'est le cas des bétons à la pierre ponce, béton à l'argile expansé…etc.

Isolants : leur résistance est faible, dans cette catégorie on peut citer :

- ✓ Les bétons de bois.
- ✓ Les bétons de polymère.
- ✓ Les bétons à la perlite.
- ✓ Les bétons à là vermiculite.
- ✓ Les bétons cellulaires.

Dans la construction on les utilise comme :

- ✓ Bloc de maçonnerai
- ✓ Panneau préfabriqué.
- ✓ Mur anti-bruit.
- ✓ Bardage.
- ✓ Ouvrage extérieur.
- ✓ Elément de cave.
- ✓ Les pavés. **[43]**

I-3-5- Les bétons de granulats légers

I-2-5-1- Définition

Ce sont des bétons dans lesquels des granulats normaux ont été remplacés par des granulats légers, ils peuvent être pleins ou caverneux, dans ce dernier cas, la granulométrie est fortement discontinue et les éléments fins sont partiellement ou totalement supprimés.

Les comportements physiques et mécaniques des bétons de granulas légers sont dictés par le type de granulats légers utilisés, et par leurs propriétés physiques et mécaniques d'une part, et d'autre part par la nature de la matrice utilisée. Selon les exigences demandées et selon le béton utilisé, le choix du type de granulats et de la nature de la matrice s'avère important. **[43]**

I-3-5-2- Classification des granulats légers

Les granulats légers peuvent être classés selon leur nature comme suit :

- **Matériaux minéraux naturels non préparés** : Par définition ce sont des matériaux qui n'ont subi que des traitements mécaniques tels que lavage, broyage, tamisage. Les granulats les plus connus dans cette catégorie sont : la ponce les pouzzolanes, roches d'origines volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques. **[44]**
- **Matériaux minéraux naturels préparés :** Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emplois dans le béton légers, cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier : l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.
- **Déchets industriels non préparés :** Ce sont des déchets de l'industrie qui ne subissent pas de traitement particulier à part, dans certains cas un traitement mécanique de tri.
Le principal granulat dans ce type est le mâchefer, résidu de la combustion des charbons gras du coke ou des ordures ménagères. **[44]**
- **Déchets industriels préparés :** Ce sont en générale des sous-produits de l'industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granulats légers. Les granulats de ce type les plus répandus sont : le laitier expansé ou granulé, les cendres volantes frittées ou expansés et le verre expansé. **[44]**
- **Matériaux organiques :** dans cette catégorie on classe des produits qui sont soit des polymères solides de synthèse, soit des matériaux d'origine végétale, on peut ranger dans cette catégorie les granulats de polystyrène expansé qui sont assez répondus les granulats de bois (copeaux ou sciure). **[44]**

Les deux derniers types de granulats ont fait l'objet de plusieurs études puisque leur utilisation rentre dans le cadre de la valorisation des déchets qui est une politique suivie dans presque tous les pays visant le coté économique de ces types de granulat, ainsi que l'aspect environnemental. **[44]**

En effet plusieurs travaux ont été réalisés où la matrice est composée essentiellement de déchets industriels ou de matières locales. **[44,45,46]** L'allégement de la matrice a été réalisé par différents procédés à savoir, l'utilisation de granulats légers, notamment, les granulats de bois et de caoutchouc, ou la création d'une structure cellulaire, soit par réaction chimique, ou par entraînement d'air. Tous ces travaux ont montré l'intérêt de l'allégement des matériaux

élaborés dans l'amélioration des performances thermiques, tout en conservant une résistance mécanique suffisante. **[45]**

I-3-5-3- Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers

Chaque propriété des granulats légers peut avoir une influence sur les caractéristiques du béton frais ou du béton durci. Le choix du type de granulats légers doit prendre en considération chaque propriété du granulat. Les propriétés spécifiques des granulats pouvant avoir une influence sur les caractéristiques du béton sont :

- **Forme des grains et aspect de surface**

La forme et en particulier l'aspect de surface influent sur l'adhérence matrice-ciment. Les granulats légers peuvent présenter des différences considérables quant à la forme et l'aspect des grains, suivant l'origine et les procédés de fabrication, la forme peut être cubique et assez régulière, en majorité arrondie ou anguleuse et irrégulière. Les aspects de surface peuvent aller depuis l'aspect relativement lisse avec des alvéoles fins jusqu'à l'aspect irrégulier avec des alvéoles petits ou gros. **[47]**

- **Taille des granulats**

La taille des granulats légers a une influence très importante sur presque toutes les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons. Selon leurs grosseurs les granulats légers sont classés en deux classes :

- ✓ **Les granulats légers fins**

Ils sont principalement composés de matériaux cellulaires d'origine minérale, conforme aux prescriptions suivantes :

a) - Ils conviennent à la fabrication de béton léger.

b) - Ils ont une granulométrie inférieure à 5 mm.

c) - Ils ont une densité sèche inférieure à 1100 kg/m^3. **[47]**

- ✓ **Les gros granulats légers**

a) - Ils conviennent à la fabrication de béton léger de structure.

b) - Ils ont une granulométrie de 5 à 19 mm.

c) - Ils ont une densité sèche inférieure à 880 kg/m^3. **[47]**

➢ **Masse volumique**

Grâce à leur structure cellulaire, les granulats légers ont une masse volumique plus faible que celle des granulats normaux. Elle est fortement liée à la porosité du granulat et à la densité de la matière d'origine du granulat. **[47]**

Tableau I- 3 : Choix des granulats en fonction des classes de béton. **[47]**

Dénomination	Classe du béton	Masse volumique apparente des granulats (kg/m^3)		
		< 350	De 350 à 550	> 550
Isolant thermique	I	(+)	+	0
Isolant thermique	II	(+)	+	0
Isolant thermique et/ou porteur	III	+	(+)	+
De structure	IV	0	(+)	+
De structure de haute Résistance	V	0	+	(+)

(+) utilisation recommandée + utilisation possible 0 utilisation impossible

➢ **Résistance des granulats**

La résistance des granulats varie selon leur type et leur origine, les granulats de béton de structure, généralement durs et résistants et contribuent en conséquence dans la résistance du béton. Pour les bétons destinés à la fabrication d'éléments de construction isolants et isolants porteurs, la résistance des granulats n'est pas d'une grande importance, puisqu'en générale ces granulats sont friables et peut solides et ne contribuent en aucun cas à la résistance, bien évident, ils sont à l'origine des faibles résistances de ces bétons. Il n'y a pas de corrélation nette entre la résistance des granulats légers et celle du béton. **[43]**

➢ **Porosité et absorption**

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75%. **[48]** La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption. Par ailleurs, la porosité des granulats varie proportionnellement à la taille des grains.

➢ **Caractéristiques thermiques des granulats légers**

En générale, les propriétés thermiques des bétons légers sont directement liées à celles des granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau. Les granulats légers manufacturés, obtenues à partir de procédés à très haute température, sont généralement caractérisés par une meilleure stabilité thermique que les granulats rigides naturels.

Tableau I- 4 : Caractéristiques des granulats légers. **[43]**

Granulats	Masse volumique (kg/m^3)			Porosité (%)	Taux d'absorption à 28 jours	Conductivité thermique ($W.m^{-1}K^{-1}$)
	Masse volumique de la matière (kg/m^3)	Masse volumique des grains (kg/m^3)	Masse volumique apparente (kg/m^3)			
Bois résineux légers **[49,50]**	450/550	255	120	72	150/300	0.12
Bois résineux mi lourds **[51]**	300/450	300	/	58	100/250	0.15
Polystyrène expansé **[52,53]**	1100	20/80	10	90/97	1.37/4.63	0.027/0.037
Argile expansé **[49,54]**	2660	848/1212	518/656	68	30	0.14
Schiste expansé **[54]**	2710	1193	698	56	11.3	/
Laitier expansé **[54,55]**	2900	1550	700/850	50	11	/
Perlite **[54]**	/	30/180	/	/	/	0.06
Vermiculite **[54]**	/	50/125	/	/	/	0.07
Pouzzolane **[47]**	/	1865	780/910	55	21	/

I-3-5-5- granulat d'argile

Du point de vue du géotechnicien, les argiles désignent la fraction des particules du sol dont la taille est inférieure à 0.004 mm (= 4µ). La limite de de taille de 2µ constitue elle un héritage historique : les particules de moins de 2µ ne sont plus visibles avec un microscope optique. Il faut alors recourir à la sédimentométrie pour pouvoir déterminer la quantité de particules contenues dans un sol et en déterminer la nature à l'aide de méthodes basées sur la diffraction des rayons X. En effet, la nature des argiles ont une grande incidence sur les propriétés mécaniques des sols, en particulier sur leur comportement avec l'eau. **[56]**

Les argiles constituent la fraction la plus fine des sols. A l'opposé, la fraction la plus grossière des sols est appelée « squelette » et comprend les pierres et les blocs. Entre ces deux extrêmes, on trouve la fraction des limons ou silts, des sables et des graviers. **[56]**

La définition géotechnique des argiles est liée aux caractéristiques chimiques de ceux-ci.

Les argiles sont des minéraux : les phyllosilicates. Ils se distinguent par une structure en feuillets formés de cristaux en arrangement octaédrique (O) ou tétraédriques (T) capable d'intégrer des cations hydratés (Ca, Na, Fe, Al etc.) dans les espaces interfoliaires (voir plus bas). Le critère de classement des argiles se base sur la forme de succession des couches dans les feuillets. Il y a 3 grande classes : les feuillets TO, TOT et TOTO. La pratique utilise très souvent le terme générique de « fines ». Il s'agit alors des argiles telles qu'elles sont définies plus haut et des limons. Les normes européennes définissent les fines comme le pourcentage (massique) des passants au tamis de 0,063 mm. **[56]**

I-3-5-6- Les granulats de bois

De la préhistoire à l'avènement de l'ère industriel, le bois a joué un rôle fondamental dans le rapport de l'homme avec son environnement, globalement les essences productrices peuvent être classées en deux catégories :

- ✓ Les gymnospermes : groupe auquel se rattache l'ordre des conifères ou résineux
- ✓ Les angiospermes : groupe auquel appartient les dicotylédones ou feuillus.

A ces deux familles correspondent des structures anatomiques et par conséquent des propriétés (physiques, chimiques, mécaniques) différentes. **[44, 47]**

- ✓ Les résineux : environ 400 espèces sont souvent des arbres de grande taille 40 à 50m de hauteur il fournissent près de 3/5 de la production ligneuse mondiale.
- ✓ Les feuillus (plusieurs milliers d'espèces), présentent une très grande variété dans leur forme, leurs feuilles et leurs fruits.

L'aspect hétérogène et anisotrope du bois apparaît nettement sur la plupart des essences.

- **Structure anatomique du bois**

Le bois est un matériau fibreux; les fibres sont constituées de cellules allongées de 1 à 3cm de long et d'environ 2/100 mm de large, elles sont disposées parallèlement à l'axe du tronc. Ce sont elles qui donnent au bois sa résistance, le bois sera d'autant plus résistant que la densité de fibres sera plus grande.

- **Composition chimique du bois**

Le bois est essentiellement constitué de cellulose et de lignine **[58]**

1- La cellulose est "le matériau de construction " des tissus du bois, c'est un polyoside macromoléculaire linéaire, la réunion en parallèles de plusieurs de ces macromolécules forme une fibrille dont la cohésion est assurée par des liaisons hydrogène s'établissant d'une molécule à une autre à partir de groupements hydroxyles. La réunion de ces fibrilles constitue les fibres, forme sous laquelle se présente la cellulose. Les celluloses usuelles sont des mélanges et dans le bois en particulier on a des ligno-célluloses, association de cellulose et de lignine.

2- La lignine est un polymère mais n'est pas un polyoside, elle est plus riche en carbone que la cellulose; elle incruste les tissus végétaux en leur donnant leur dureté. **[44]** Dans le bois on peut estimer les teneurs respectives en cellulose et lignine à 40 à 50% pour la première, 25 à 30% pour la seconde. L'eau contenue dans le bois joue un rôle très important sur toutes les propriétés physiques et mécaniques, elle peut atteindre 100% (et parfois plus) de la masse sèche du bois, elle est présente dans le bois comme pour tout matériau de construction à trois niveaux différents **[59]**, on distingue :

- ✓ L'eau de constitution : combinée chimiquement à la matière ligneuse, elle reste présente dans le bois.
- ✓ L'eau d'imprégnation, contenue dans les membranes des cellules
- ✓ L'eau libre qui remplit les vides des tissus et l'intérieur des cellules lorsque les membranes sont saturées d'eau. **[60]**



Figure I- 32 : Coupeaux de bois.

- **Optimisation du traitement des copeaux**

Nous avons vu précédemment que les copeaux à caractère fortement hygroscopique devaient: subir un traitement de saturation en eau pendant 24 h, avant malaxage avec le ciment. Ainsi, nous évitons que l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment ne soit absorbée par les copeaux et n'assure plus l'hydratation complète du ciment anhydride.

Dans une autre étude sur des bétons légers à base de balles de riz (Jauberthie et al., 2003), nous avons constaté que la présence de silice amorphe dans les balles avait un rôle bénéfique sur la liaison pâte de ciment - balle. Par analogie, un traitement des copeaux de bois dans une solution de silicate devrait conduire à un phénomène similaire. La silice étant très faiblement soluble dans l'eau, nous avons utilisé une solution de silicate de sodium. Nous avons donc traité des copeaux dans une solution de silicate de sodium avec une concentration de 100 $kg.m^{-3}$. Après ce traitement, les copeaux de bois subissent un ressuage avant malaxage avec le ciment. **[61]**

Tableau I-5 : Influence du type de traitement des granulats de bois sur les propriétés physico mécaniques du béton de bois. **[45]**

Traitement	Absorption des granulats (%)	Absorption du composite (%)	Densité sèche (kg/m^3)	R_c (MPa)	R_f (MPa)	$\Delta L/L$ (mm/m)	λ ($w.m^{-1}.K^{-1}$)
Sans traitement	240	49	0.85	8.9	3.8	3.5	0.22
Traitement à la chaux	99	25	1.11	12.7	4.95	1.18	0.27
Bouillonner dans l'eau+chaux	89	23	1.12	13.1	5.1	0.95	0.27
Traitement au ciment	87	22	1.20	12.4	4.4	1.35	0.33
Bouillonner dans l'eau+ciment	78	20	1.2	12.6	4.8	1	0.28
Traitement à l'huile de lin	42	22	22	8.5	2.9	2.2	0.25

I-4 - Conclusion

La formulation des bétons de sables relève de l'optimisation de la compacité d'un mélange : sable, ciment et calcaire. En effet, l'avantage du béton de sable c'est qu'il est un matériau présentant moins de fissures.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons légers, leurs définitions et classement ainsi ses caractéristiques physico-mécaniques d'une part. D'autre part présenter le comportement des bétons légers exposés aux températures élevées.

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. il est employé en remplacement total ou partiel des agrégats naturels. Ces agrégats artificiels sont légers et mieux adaptés aux conditions économiques du monde moderne pour alléger et améliorer certaines caractéristiques des bétons.

Chapitre II

II-1- Introduction

L'objectif dans ce chapitre est d'etudie une formulation de béton avec les caractérisations des matériaux ainsi que les propriétés du béton de bois traité (sèche , humide) à l'etat frais et durci.

II-2- Les caractiristique des matériaux utilisés

II-2-1- Ciment

Le ciment utilisé est CPJ-CEM II/A (Matine) **(Figure II-1**), est un ciment Portland ordinaire dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de Lafarge (M'sila) .



Figure II-1 : Type de ciment utilisé.

Le **tableau II-1** résume l'analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment. **[62]**

Tableau II-1 : Analyse chimique du ciment et composition du clinker.

Analyse chimique du ciment					Composition hypothétique du clincker	
Perte au feu (%)	Résidus Insolubles (%)	Teneur en Sulfates SO_3 (%)	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Teneur en Chlorures (%)	Silicates Tricalciques C_3S (%)	Aluminates Tricalciques C_3A (%)
7.00-9.50	1.50-3.00	2.00-2.50	1.90-2.30	0.01-0.03	58.00-64.00	6.00-8.00

Tableau II-2 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

Masse volumique absolue kg/m^3	ρ_s =3100
Masse volumique apparente kg/m^3	ρ_a =1030.05
Consistance normale	E/C= 0.28
Début de prise h	DP =11.45
Fin de prise h	FP =15.20
Surface spécifique Blaine cm^2/g	SSB=3700

II-2-2- Sable

Le sable utilisé dans notre travail est un sable de dune provient de la région de Oued-Souf situé à 500 Km au sud de l'Algérie.



Figure II-2 : Sable utillisé.

Les caractéristiques physiques de sable utilisée sont donnée dans le **tableau II-3**.

Tableau II-3 : Caractéristiques du sable.

Caractéristique	Type de sable
Provenance	Oued Souf (0/5)
Le module de finesse	2.2
La masse volumique absolue (g/cm^3)	2.68
La masse volumique apparente (g/cm^3)	1.65
Equivalent de sable à vue (%)	82,65
Equivalent de sable à piston (%)	77,00
Taux d'absorption d'eau (%)	0.9

L'analyse granulométrique de sables utilisés est présentée sur la **Figure II-3** suivant :

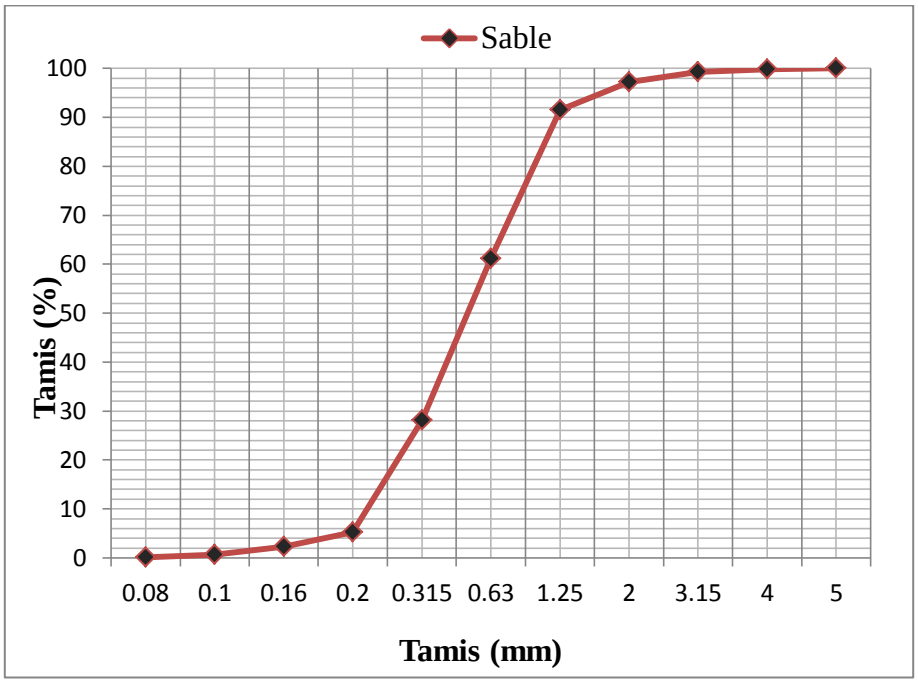


Figure II-3 : Courbe granulométrique de sable.

II-2-3- Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est l'eau du robinet de notre laboratoire sans passer par l'analyse chimique. Sa température était comprise entre 10 et 22°C.

II-2-4- Super plastifiant

Pour cette étude, nous avons utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération et de forme liquide brun clair, d'un PH égal à 6± 1, de densité 1,06 ± fabriqué par la société SIKA et commercialisé sous le nom suivant : **VISCOCRETE TEMPO 12** sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5% à 2% du poids de ciment, **(Annexe B)**.



Figure II-4 : adjuvant utilisé.

II-2-5-Ajouts (fillers)

Les fillers utilises dans notre cas sont du fillers de calcaires. Ils sont obtenus par broyage des déchets de concassage d'une carrière de meftah à la wilaya de Blida. Ce calcaire est destiné pour la fabrication cimenteries de Gika Mefta. Rappelons que le calcaire est le plus adaptés au béton et donne de meilleures performances.



Figure II-5 : Calcaires utillisé.

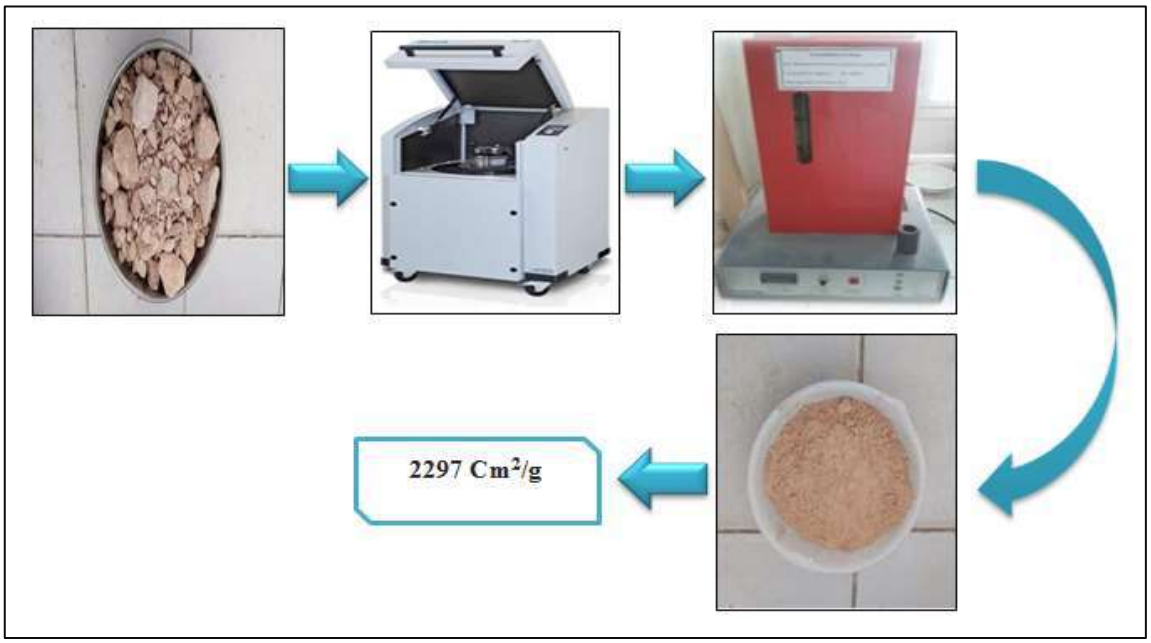


Figure II-6 : Protocole d'obtention des finesses de calcaire.

Leurs caractéristiques physiques sont mentionnées dans le **tableau II-4** suivant :

Tableau II-4 : Caractéristiques du calcaire.

Caractéristique	**Calcaire**
La masse volumique absolue (g/cm^3)	2.59
La masse volumique apparente (g/cm^3)	0.9
Surface spécifique blaine(cm^2/g)	2297

II-2-6- Argile calcinée

L'argile utilisé est un argile calciné, produit par la cimenterie de Lafarge (M'sila). dont les caractéristiques sont regroupées dans les tableaux qui suivent :



Figure II-7 : Argile utilisé.

Tableau II-5 : Caractéristiques d'argile utilisées.

Caractéristiques	Argile
La masse volumique absolue (g/cm^3)	2.63
La masse volumique apparent (g/cm^3)	0.51
Surface spécifique blaine(cm^2/g)	3338

II-2-7- Coupeaux de bois

Nos coupeaux de bois utilisées dans notre étude proviennent de les récupération de déchets de bois types bois rouge, et ajouter dans la masse du béton de sable par substitution volumique du sable avec des pourcentages de 10, 20, 30, 40, et 50% pour le cas de bois traité humide et 10, 20, 30, 40 et 50% pour le cas de bois traité sec.

II-2-7-1- Traitement du bois

- **Bois traité humide**

Les copeaux à caractère fortement hygroscopique devraient : subir un traitement de saturation en eau pendant 24 h, avant malaxage avec l'argile.

Ainsi, nous évitons que l'eau nécessaire à l'hydratation du ciment ne soit absorbée par les copeaux et n'assure plus l'hydratation complète de l'argile calcinée.

Enfin on a choisi le traitement avec argile le mode de traitement effectuée est comme suit : **100 g** argile **+1000 g** bois.



Figure II-8 : Protocole d'obtention de traitement du bois.

- **Bois Sec**

100 g argile **+1000 g** bois.

Séchée à l'air.



Figure II-9 : Coupeaux du bois traité.

Tableau II-6 : Caractéristiques physiques des granulats du bois.

Caractéristique	Type de bois
Masse volumique absolue de bois non traité (g /cm^3)	0.86
Masse volumique apparente de bois non traité (g /cm^3)	0.07
Masse volumique apparent de bois traité humide (g /cm^3)	0.21
Masse volumique absolue de bois traité humide (g /cm^3)	1.96
Masse volumique apparente de bois traité sec (g /cm^3)	0.19
Masse volumique absolue de bois traité sec (g /cm^3)	1.49
Module de finesse	5.41
Taux d'absorption d'eau de bois normale (%)	14.74

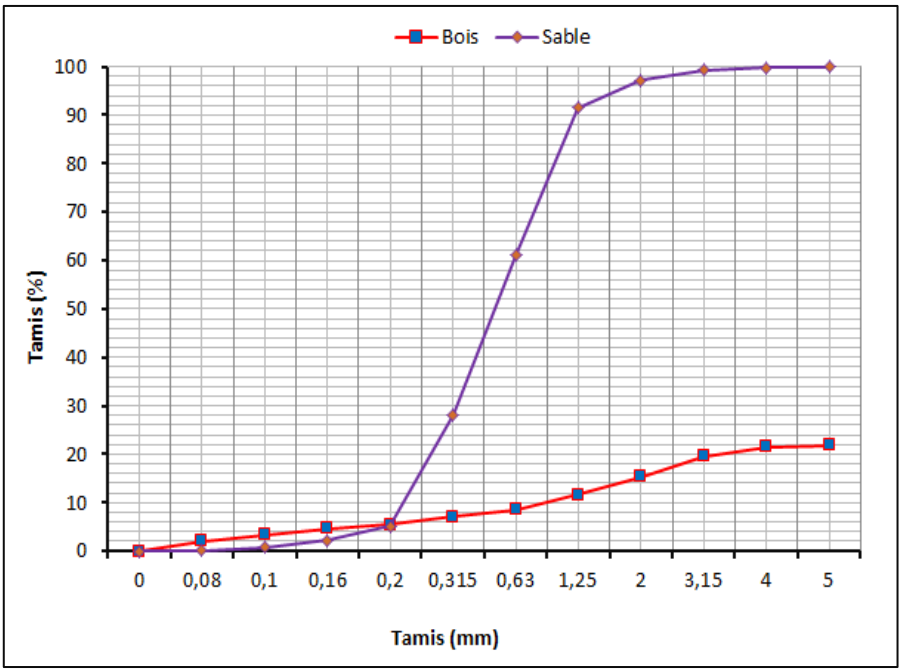


Figure II-10 : Analyse granulométrique des copeaux de bois compris le sable.

II-3- Formulation du béton

Cette formulation est fondée sur la méthode expérimentale de SABLOCRETE 1994 **[63, 64,65]** qui est basé sur 04 étapes du :

- ❖ Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :
  - ➢ Fixation de la teneur en ciment.
  - ➢ Choix d'une teneur en eau.
  - ➢ Détermination d'un dosage en sable.
  - ➢ Réglage de la maniabilité et du rendement.
  - ➢ Détermination du dosage en fines d'addition.
- ❖ Adaptation de la maniabilité de la mise en œuvre.
- ❖ Contrôle des résistances.

On a allégé le béton de sable témoin par les coupeaux de bois traités qui sont introduits comme substitution part apport au volume du sable à des niveau situés entre 0 % jusqu'à 40% pour chaque état de saturation en eau du bois traité (sec et humide) et comparé avec le béton témoin. Les résultats sont définis sur le tableau suivant :

Tableau II-7 : Composition des différents bétons de BH pour un 1 m^3.

Mélange	Composition (kg/m^3)					
	Ciment	Sable	Bois	Eau	Adjuvant	Calcaire
0%	350	1470	0	220	2.1	110
10%	350	1323	107,506	220	1.75	110
20%	350	1176	215,012	220	2	110
30%	350	1029	322,51	220	3	110
40%	350	882	430,024	220	4	110

Tableau II-8 : Composition des différents bétons de BS pour 1 m^3.

Mélange	Composition (kg/m^3)					
	Ciment	Sable	Bois	Eau	Adjuvant	Calcaire
0%	350	1470	0	220	2.1	110
10%	350	1323	81.86	245.646	1.75	110
20%	350	1176	163.45	271.562	2	110
30%	350	1029	245.179	297.331	3	110
40%	350	882	326.90	323.124	4	110

- **Préparation du mélange (Malaxage)**

La procédure de malaxage est effectuée dans malaxeur à axe vertical d'une capacité de 5 L pour la confection des éprouvettes 4 x 4 x 16.

Après avoir pesé les quantités des matériaux suivant : l'eau, l'adjuvant, bois en mélange les ingrédients en premier temps pendant 30 sec puis on ajoute le calcaire et le ciment 30 sec et le sable pendant 30 sec et l'eau 15 sec à vitesse rapide 1 min 30 sec apprêt on arrêt le malaxage pendant 15 sec et on le relancer à 2 min a vitesse rapide .

Pour chaque gâcher, on veuille toujours à effectuer un bon malaxage qui a pour but d'obtenir une matière homogène et ouvrable.



Figure II-11 : Malaxage du béton de sable.

II-4- Les essais effectués sur le béton du sable

III-4-1- Essai à l'état frais

II-4-1-1- Essai de Maniabilimètre L.C.P.C

Selon les normes L.C.P.C **[66]** et [NF P 15-437] **[67]** le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du béton de sable avant prise, et classer le béton de sable suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide) **[68]**

Dans cet essai la consistance est caractérisé par le temps que met le béton de sable pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le béton de sable sera plus fluide.

L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à béton de sable LCPC (**figure II-12)** et comporte :

- Unique boîtier parallélépipédique métallique (30 cm x15 cm x15 cm).
- Une cloison amovible.
- Un vibrateur.
- Un chronomètre.

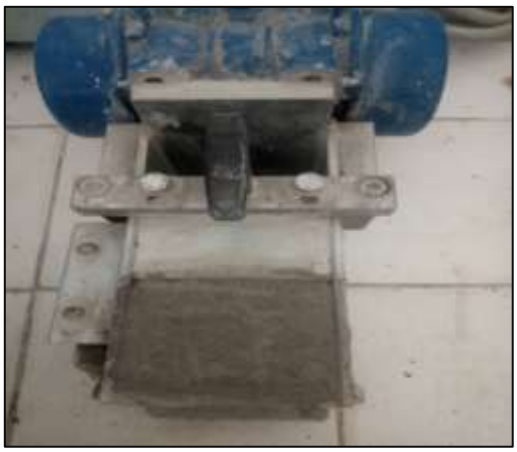


Figure II-12 : Maniabilimètre à béton de sable.

Le principe de fonctionnement du maniabilimètre à béton de sable est résume comme suite :

1. Huiler légèrement les parois internes de la cuve.

2. Remplir le béton de sable.

Le béton de sable est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches.

1. Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piquage.

2. Araser la dernière couche.

La cloison est retirée e, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre même temps que la cloison est retirée, sous l'effet de la vibration le béton de sable s'écoule.Le chronomètre est arrêté quand le béton de sable atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le béton de sable pour s'écouler caractérise sa consistance, L'état du béton de sable avant et après l'essai est illustré dans la (figure **II-13**).

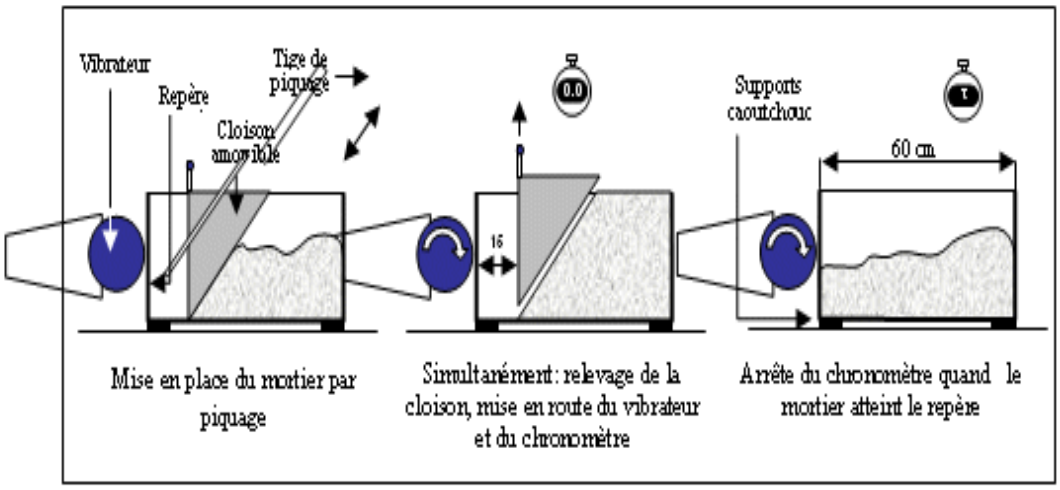


Figure II-13 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à béton de sable.

II-4-1-2- La densité

La masse volumique du Béton de sable a été mesurée selon la norme EN 12350-6**[69]** voir le **figure II-14**



Figure II-14 : Mesure la densité du béton de sable.

II-4-1-3- Mesure de la teneur en air occlus

Pour la mesure de l'air occlus du BS de bois **(figure -15)**, on a utilisé la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française. **[70]**

Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécaniques de notre béton.



Figure II-15 : Mesure de l'air occlus de BS de bois à l'aide d'un aéromètre.

II-4-2- Essai à l'état durcis

II-4-2-1 : Essai 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), 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, 14, 28 jours.

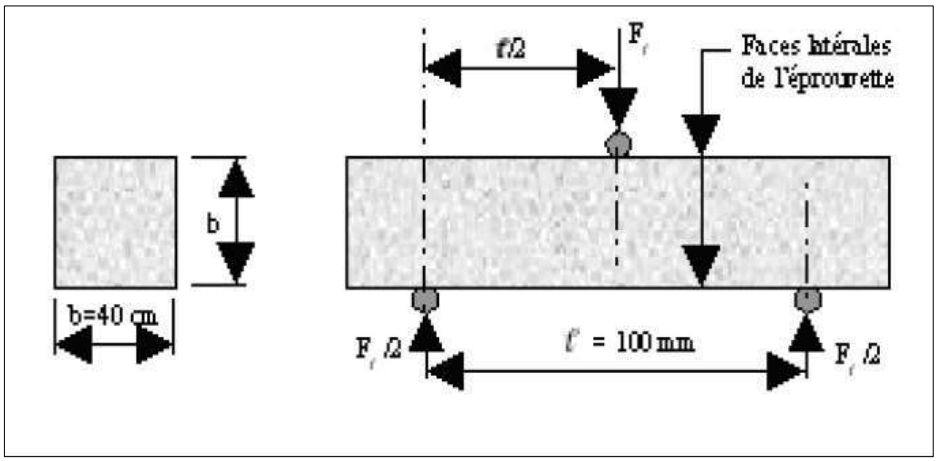




Figure II-16 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction.

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

$$\sigma_t = \frac{M}{I} V$$

Avec :

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

$$M = F_f \ L/4$$

I : Moment d'inertie de la section transversale :

$$I = a^4 / 12$$

V: La distance de la fibre la plus éloignée :

$$V = a / 2$$

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

$$\sigma_t = (1.5 \ F_f \ L) / a^3$$

II-4-2-2- Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme NF EN 196-]**[72]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions(4×4×16) cm, à 7, 14, 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 KN conforme à la norme NF P 18-412 **[73]**. 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.14j.28j).

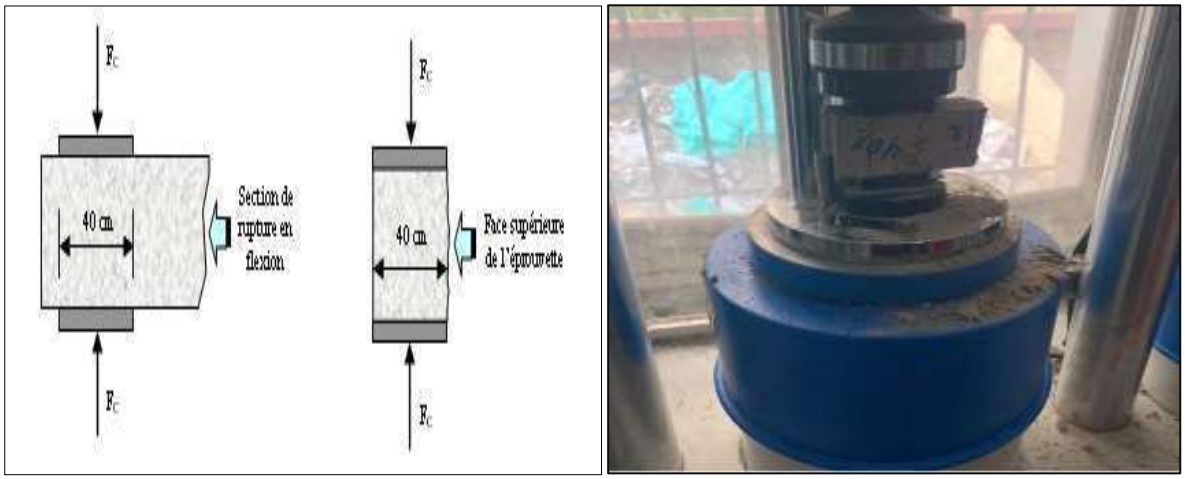


Figure II-17 : Dispositif de rupture à la compression.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la **figure III-19**, la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$\mathbf{Rc} = \frac{\mathbf{Fc}}{\mathbf{b^2}}$$

II-4-2-3 - Retrait et gonflement

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

Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques (4×4×16cm) conformément à la norme NF P 15-404. **[74]**

Ces éprouvettes au nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 heure placées dans un réctractomètre) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait à

tout moment à court terme et moyenne terme (de 1j jusqu'à 28 jours).conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 30°C, et le gonflement la conservation des éprouvettes est fait à un bac d'eau de température de 25à 30°C.



Figure II-18 : La mesure à l'aide de retractomètre.

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

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

$$\mathbf{l = L + dl\ (t)}$$

Soit $\mathbf{l\ (t_0)}$ 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 :

$$\mathbf{\Delta l\ (t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl\ (t_0)}$$

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

$$\boldsymbol{\varepsilon t = \frac{\Delta l\ (t)}{L} = \frac{dl\ (t) - dl(t_0)}{L}}$$

ΔL(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.

Avec :

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

L_0 : Longueur de base, prise égale à 160 mm.

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

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

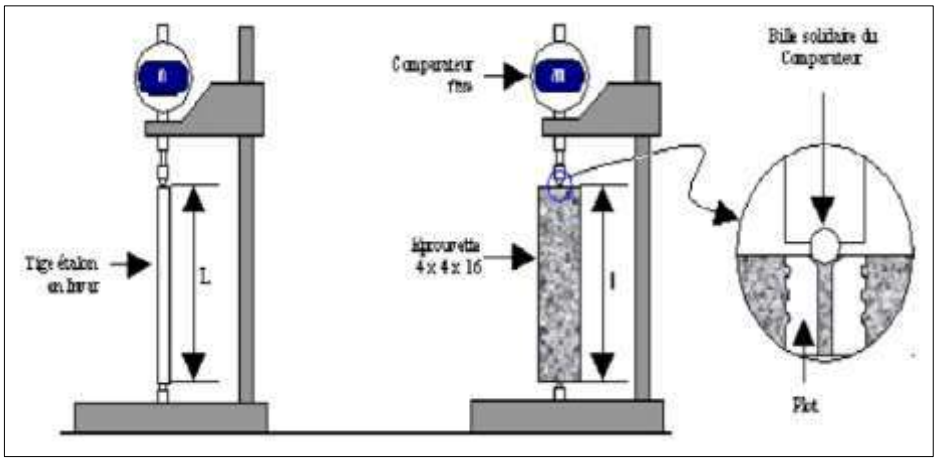


Figure II-19 : Appareillage pour la mesure du retrait.

II-4-2-4 -Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher et on le pesé (m_0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau (**Figure II-20**), pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (mi- m0) (NE 13057) . **[75]**

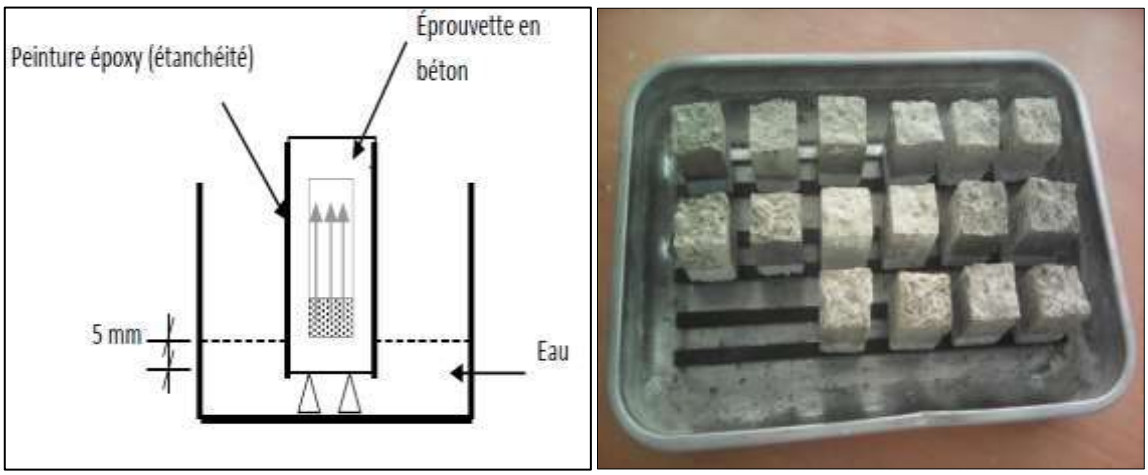


Figure II-20 : Absorption d'eau par succion capillaire.

II-4-2-5 – Porosité

À la fin de la cure, les demi-prismes d'éprouvette 4x4x16cm sont séchés dans un étuve ventilée à 40 ± 5 °C jusqu'à poids constant ; elles sont ensuite prolongé dans l'eau, jusqu'à poids constant. L'échantillon est passé ensuite à imbibition sous vide, et après saturation une pesée sous eau (Meau) et une autre dans l'air (Mair) sont réalisées.

L'échantillon est séché dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à poids constant et à nouveau, une mesure de masse (Msec) est réalisée selon la recommandation L'AFPC-AFREM.

La porosité volumique accessible à l'eau Ɛ exprimée en pourcentage, est donnée par l'équation :

$$\varepsilon(\%) = \frac{\mathbf{Mair - Msec}}{\mathbf{Mair - Meau}} \times \mathbf{100}$$

Mair : La masse d'éprouvette imbibée pesé dans l'air.

Msec : La masse d'éprouvette sèche.

Meau : La masse d'éprouvette immergée dans l'eau.



Figure II-21 : Mesure de la porosité accessible à l'eau.

II-4-2-6 - Conductivité thermique

Le CT METRE Norme de référence NF EN 993-15 [76]

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.



Figure II-22 : Mesure conductivité thermique.

II-4-2-7 -Résistance au feu

Préparer des demi prismes d'éprouvettes ($4\times4\times16cm^3$) pour le traitement thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant 6 jours puis étuvées à 105°C Pendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leurs masses.

Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle à différentes températures 200°C, 400°C et 600°C et avec une vitesse de chauffage égale à 10°C/min maintenues la température constante dans le four pendant une heure conformément à la norme ISO 834. **[77]**

Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont ensuite refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasés. Pour chaque température, des mesures de pertes de masse ont été effectuées. Le degré de déshydratation (Perte de masse (%)) est évalué par la relation suivante :

$$\textbf{[Perte de masse (\%)]} = [(M_1-M_2)/M_1)] \times 100$$

Avec :

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



Figure II-23 : Echauffement de l'éprouvette par le four.

II-5- Aspect visuel des bétons élaborés

Des coupes d'échantillons de différents dosages pour les deux types de bétons, ont été photographiées et représentés dans les **figures II-24** pour le BSBH et dans les **figures II-25** pour le BSBS.

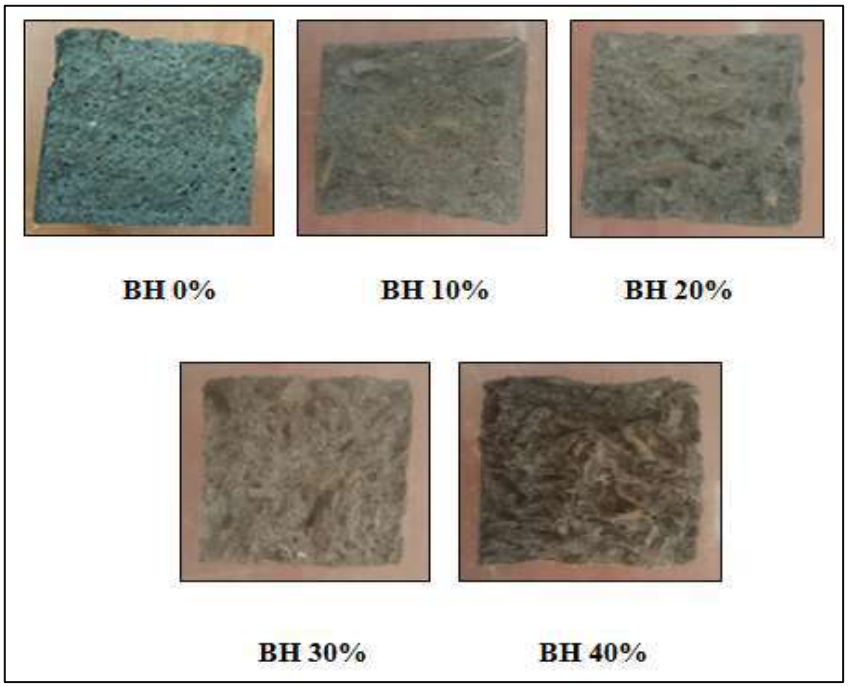


Figure II-24 : Echantillons de BSBH en %.

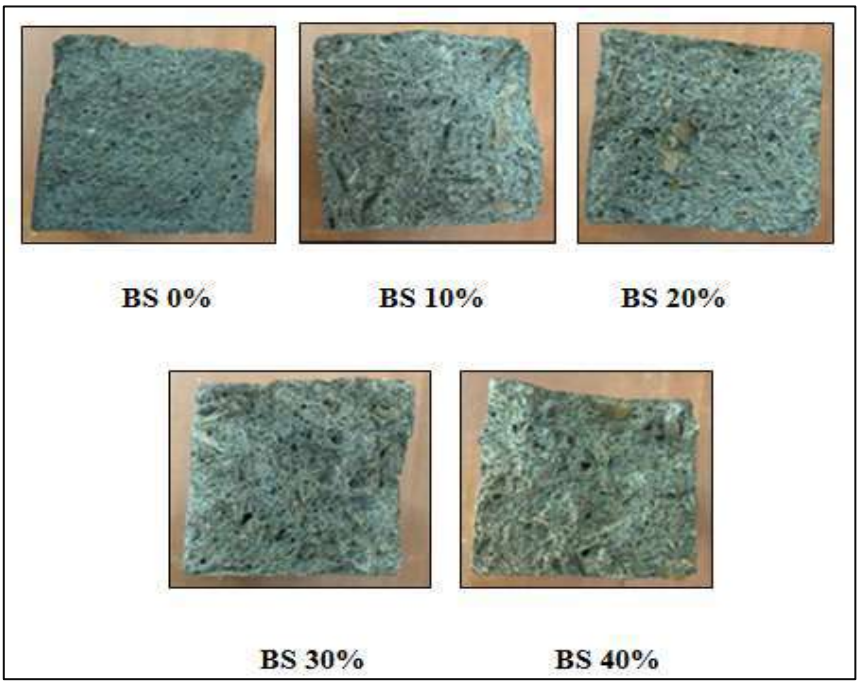


Figure II-25 : Echantillons de BSBS en %.

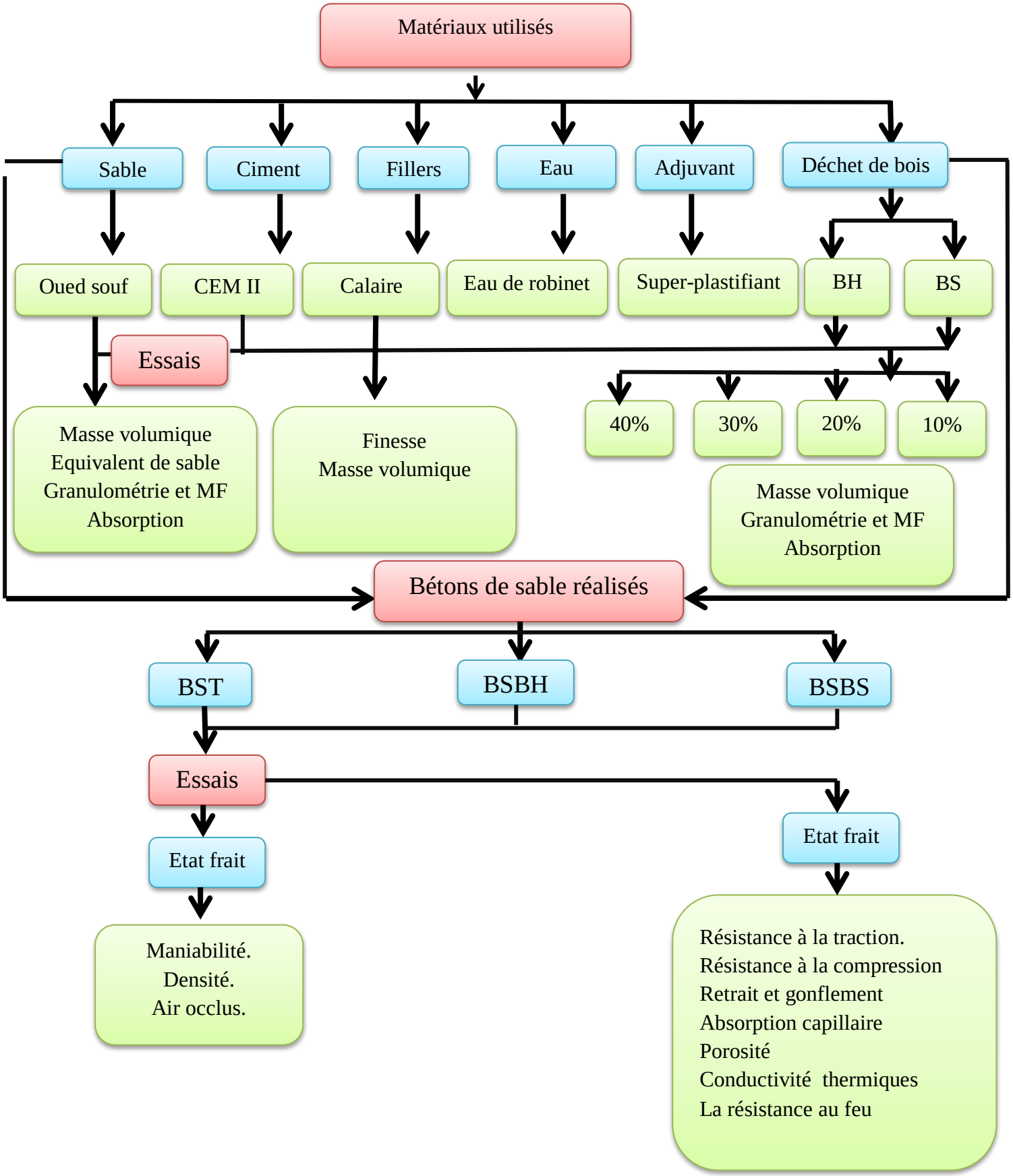


Figure II-26 : Variables étudiées.

II-6- Conclusion

Cette recherche présente une contribution à l'étude de l'effet de bois traité sur les propriétés frais et durci des bétons de sables .

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

- Caractérisation physique et mécanique et thermique des matériaux utilisés dans les compositions des BSBH et BSBS
- Les procédures expérimentales et les essais réalisés sur les différents bétons de sable à base de granulat léger à l'état frais et durci au cours de cette étude.

Chapitre III

III-1- Introduction

Dans ce dernier chapitre on présente les résultats obtenus pour les différents essais réalisés sur le béton de sable à l'état frais et durci. Les résultats sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

III-2- Béton frais

III-2-1- Maniabilité

La figure III-3 et **La figure III-4** montrent l'effet du pourcentage de bois sur le temps d'écoulement de béton de sable. Pour tous les mélanges, le temps d'écoulement se situe entre (7 et 10 Sec), avec un rapport E/C efficace constant dans les deux séries de béton : BSBH et BSBS et un dosage de super plastifiant variable et fixe dans les deux BSBH et BSBS.

Après décoffrage, il a été remarqué une ségrégation sur les éprouvettes de béton de sable pour un taux de substitution de 50 % **figureIII-1 et figureIII-2**.



Figure III-1 : Eprouvette de 50 % de BS BH.



Figure III-2 : Eprouvette de 50 % de BSBS.

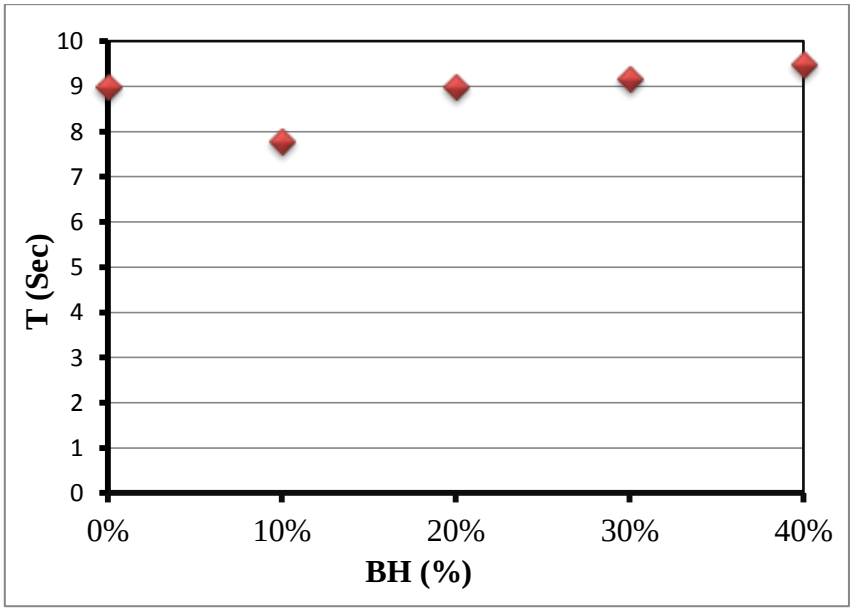


Figure III-3 : Temps d'écoulement du BS en fonction du % de bois traité humide.

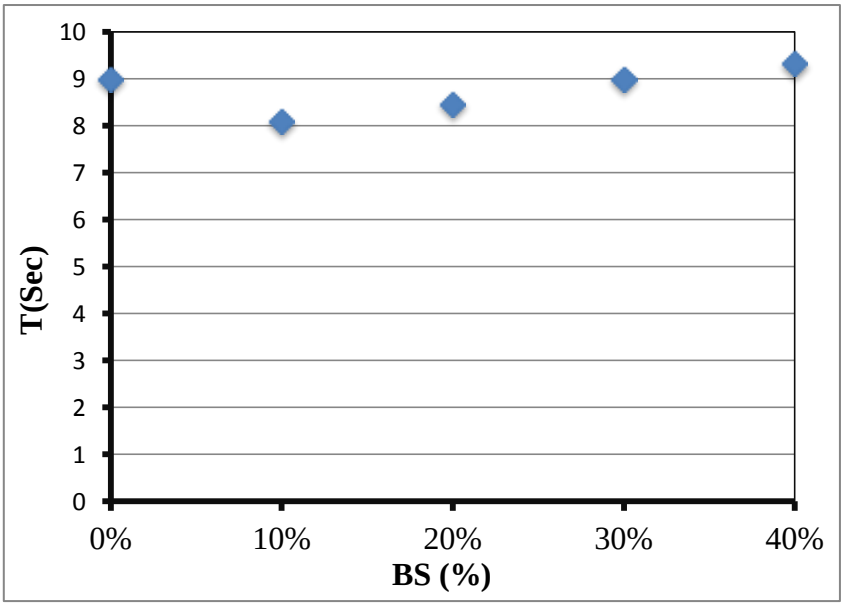


Figure III-4 : Temps d'écoulement du BS en fonction du % de bois traité sec.

.

III-2-2- La densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les **figures III-5** et **figures III-6** ci-dessous :

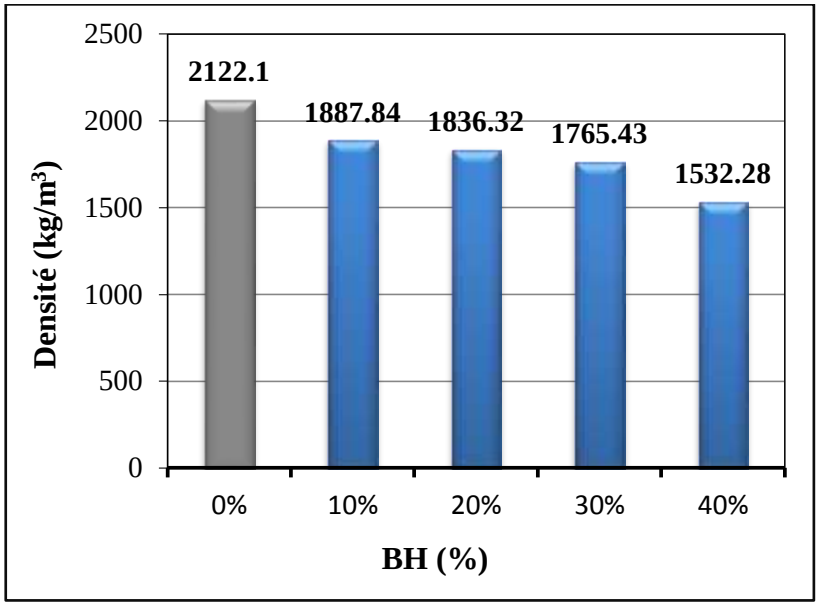


Figure III- 5 : La densité en fonction de % de BH.

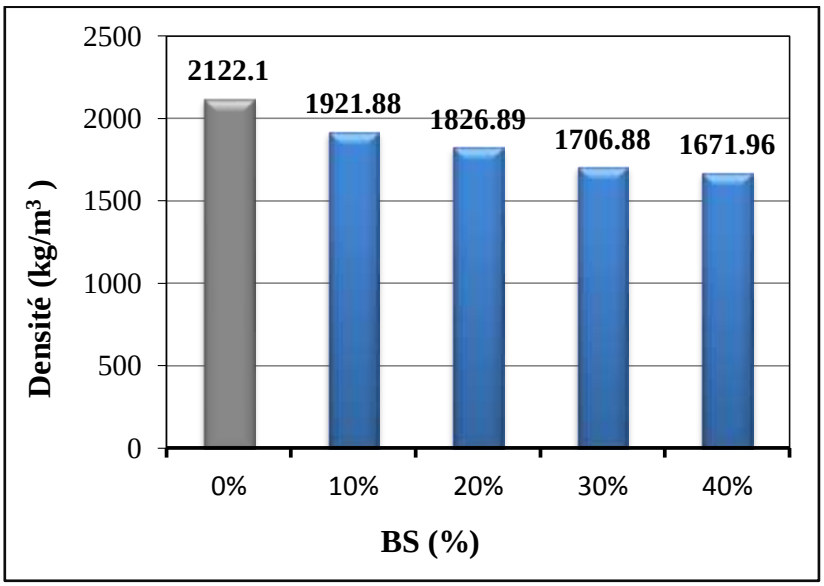


Figure III- 6 : La densité en fonction de % de BS.

Les résultats obtenus montrent que la densité diminue en fonction du taux de substitution de sable par le coupeaux de bois traité par rapport au BST. On enregistre une diminution de 28% et 21%, avec BSBH40% et BSBS40% respectivement. Cette diminution est engendrée

par la faible densité du bois qui résulte du fait de l'augmentation de la porosité totale du béton. Ces résultats sont conforment aux recherches antécédentes .**ZIREGUE [44]**

III-2-3- Air occlus

Les résultats obtenus sont résumés dans les **figures III-7 et figures III-8** suivantes. Ces résultats sont représentés sur un histogramme qui permet de comparer des valeurs d'une catégorie à l'autre.

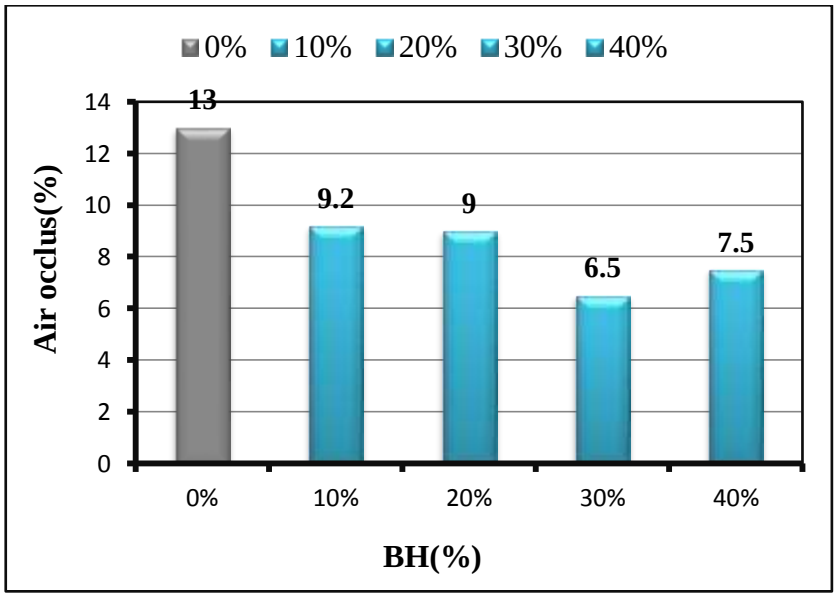


Figure III- 7 : Air occlus en fonction de % de BH.

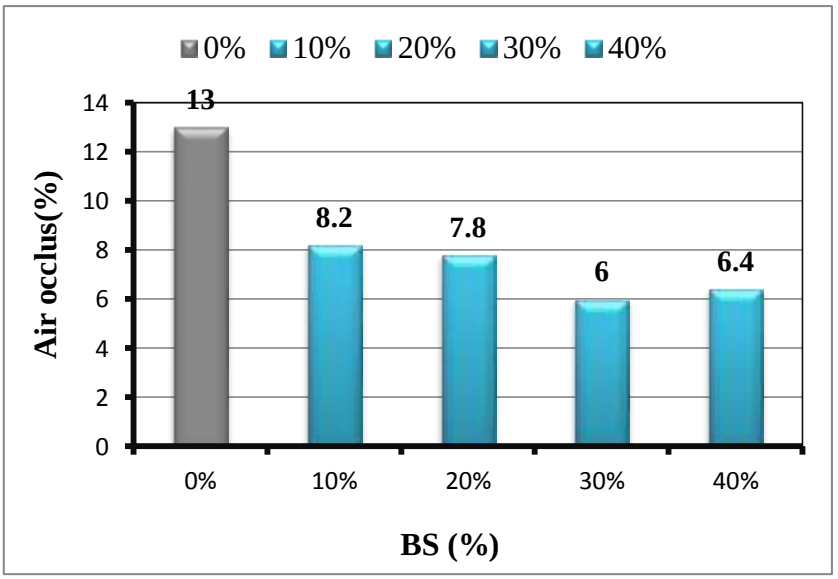


Figure III- 8 : Air occlus en fonction de % de BS.

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'incorporation de bois traité diminue le porcentage d'air et par rapport au BST en BSBH10%,20%30% et BSBS10%,20%,30%. Cette dimunition est causé par l'augmentation de la quantité d'argile à traitement au bois.

III-3- Béton durcis

III-3-1- Résistances à la traction

Les résultats sont illustrés dans les **Figures III- 9** et **Figures III- 10** ci-dessous :

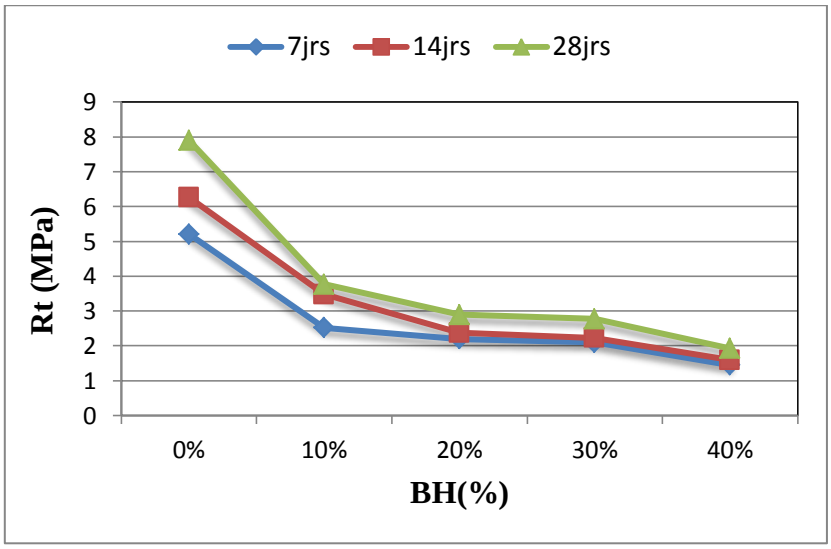


Figure III- 9 : Résistance à la traction en fonction de % de BH.

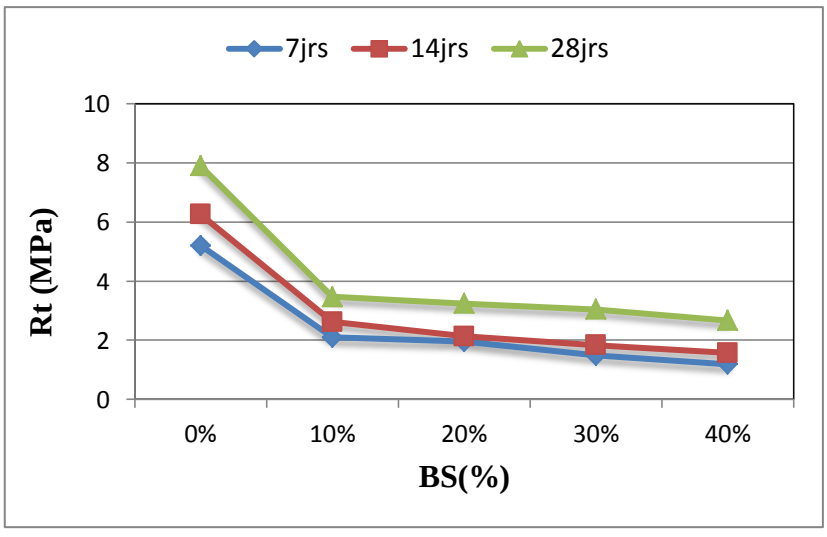


Figure III- 10 : Résistance à la traction en fonction de % de BS.

Les résultats de la résistance à la traction des BS obtenus à 7,14, et 28 jours avec différents pourcentage de BSBH et BSBS montrent que la résistance diminue en fonction du taux de bois. Cela est au fait de sa faible densité et sa faible résistance par rapport BST. On enregistre

une diminution de 7% et 66%, avec BSBH40% et BSBS40% et par rapport les résultats dans le tableau en diminution.

III-3-2- Résistances à la compression

Les résultats sont illustrés dans **les figures de III-11 a III-12** suivantes :

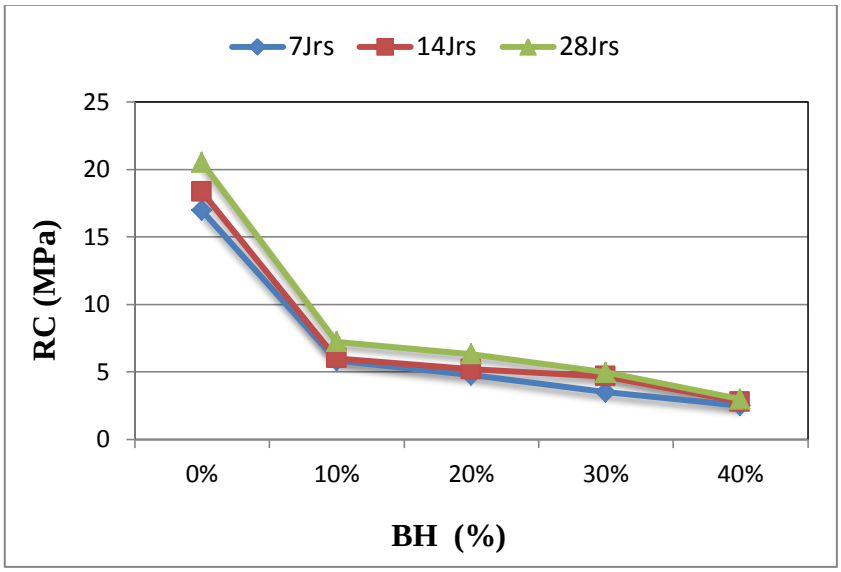


Figure III- 11 : Résistance à la compression en fonction de % de BH.

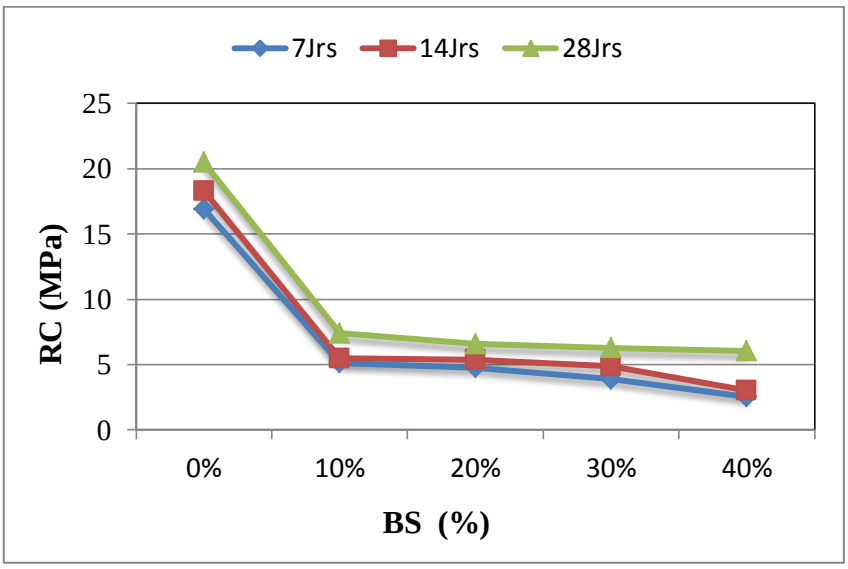


Figure III- 12 : Résistance à la compression en fonction de % de BS.

Les résultats de la résistance à la compression des BS obtenus à 7,14, et 28 jours avec différents pourcentage de BSBH et BSBS sont résumés relation entre la résistance et la densité du BS. On constate que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de BSBH et BSBS par rapport BST à 28jours.On enregistre une diminution de

85% et 70%, avec BSBH40% et BSBS40% et par rapport les résultats dans le tableau en diminution.

III-3-3-Retrait

La **figure III-13 et figure III-13** résume les résultats trouvés sur le retrait du BSBH et BSBS en fonction du temps.

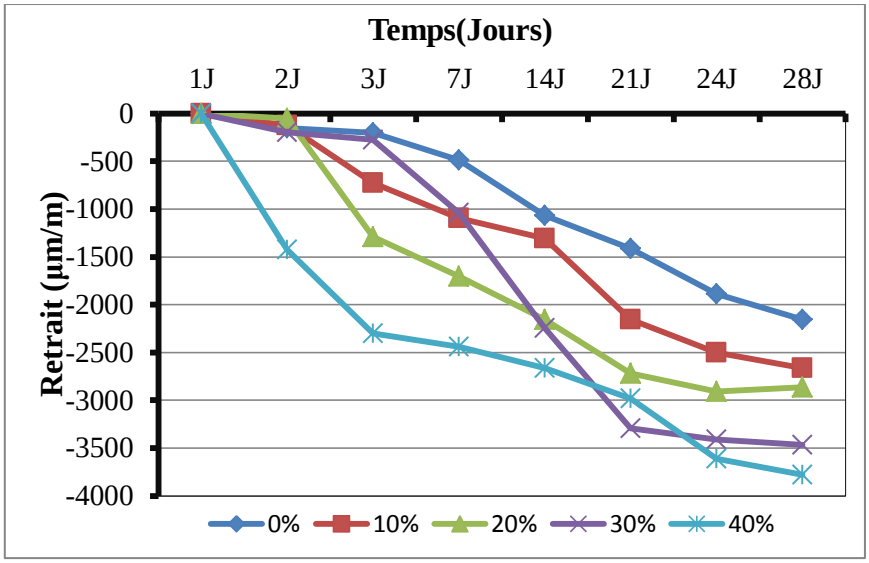


Figure III- 13 : Evolution du retrait du BSBH en fonction de l'âge.

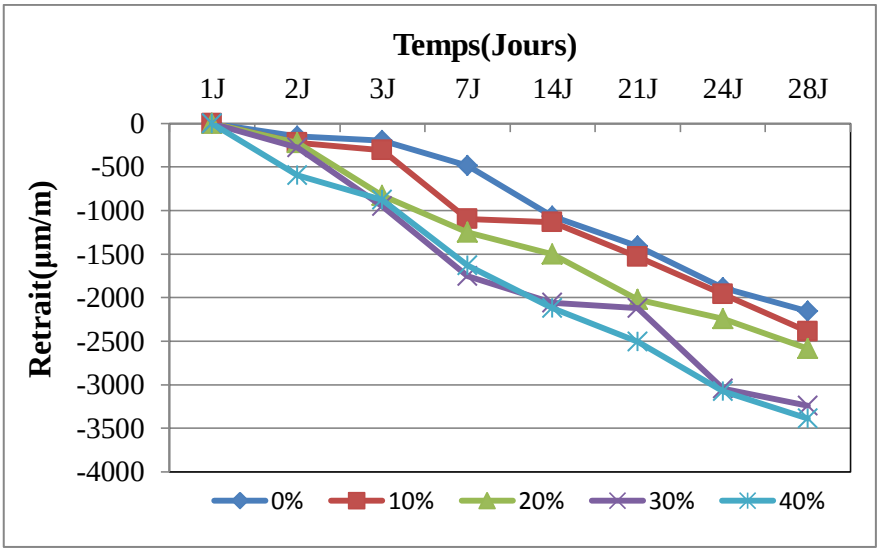


Figure III- 14 : Evolution du retrait du BSBS en fonction de l'âge.

Les variations du retrait de BS en fonction de l'âge pour les deux substitutions de bois sont représentées dans les **figure III- 13** et **figure III- 14** Pour le béton de bois, le phénomène de retrait est différent, en effet pour le BSBH et BSBS le retrait augmente au court du temps, et cela est due au retrait propre des granulats de bois après départ de l'eau. D'autre part on

voit que pour les dosages importants en granulats de bois le retrait est très important, ceci est dû au faite que la proportion volumique est dominante par rapport à celle de la matrice, ce qui fait que le retrait du béton sera en grande partie le retrait des granulats de bois. **ZIREGUE [44]**

Le retrait du BSBH est légèrement supérieur à celui du BSBS, est grande plus le retrait est important.

III-3-4-Gonflement

La **figure III-15 et figure III-16** résume les résultats trouvés sur le gonflement du BSBH et BSBS en fonction du temps.

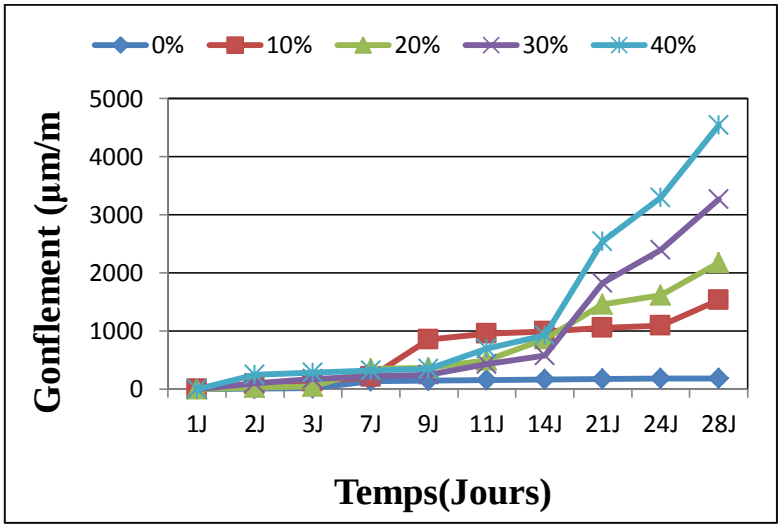


Figure III- 15 : Evolution du gonflement du BSBH en fonction de l'âge.

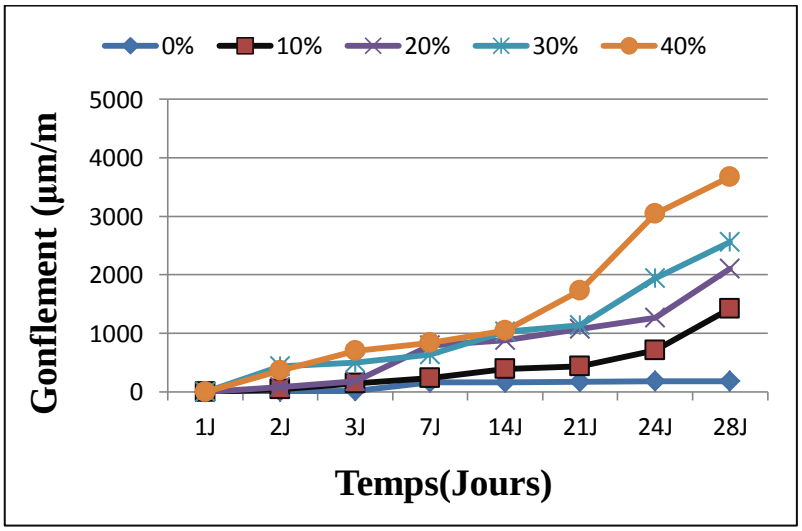


Figure III- 16 : Evolution du gonflement du BSBS en fonction de l'âge

Les résultats obtenus ici montrent que tous les types de béton ont des gonflements sous eau très important par rapport au BST et on remarque que plus le pourcentage de BSBH et augmente plus le gonflement augmente aussi. Aussi que BSBS et les BSBH présentent des taux de gonflement plus grand que les autres types des BS.

III-3-5-Absorption

La **figure III-16 et figure III-17** résume les résultats trouvés sur 'absorption du BSBH et BSBS en fonction du temps.

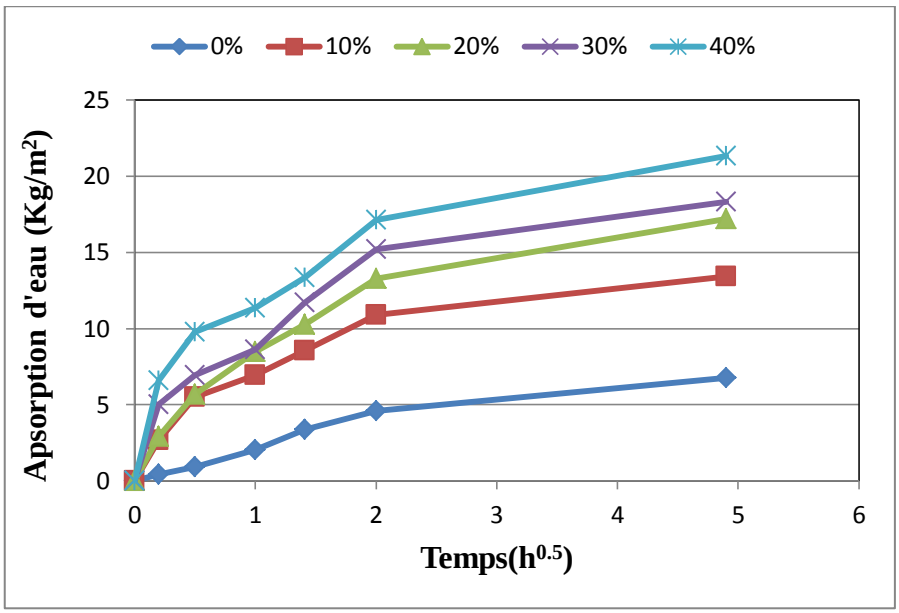


Figure III- 17 : Absorption d'eau des BSBH.

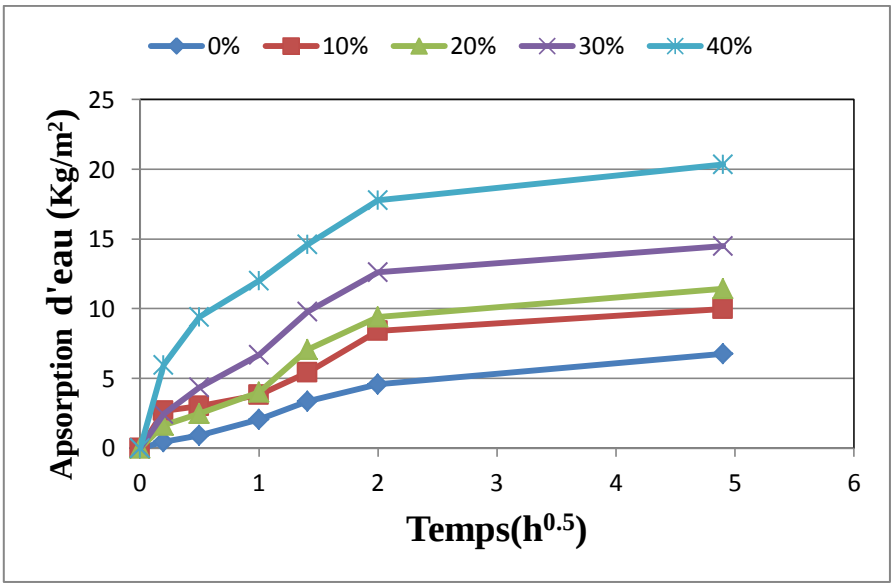


Figure III- 18 : Absorption d'eau des BSBS.

Les résultats d'absorption qui sont présenté ici, obtenus sur des demi-prismes des éprouvettes (4×4×16cm³) en contact avec une nappe d'eau de 5mm, représentent effectivement l'état pyrométrique des premiers millimètres de l'éprouvette. on remarque que le béton de sable absorbe plus d'eau légèrement par rapport au BST. La quantité d'eau absorbée par le béton augmenté avec l'augmentation de bois. On constate l'absorption de BSBH plus grande pour BSBS. Ce résultat confirme aussi l'importance de l'absorption d'eau durant les premiers instants pour évaluer la porosité de surface du béton de sable de bois par rapport BST.

III-3-6- porosité

La **figure III-19 et figure III-20** illustre les résultats de la porosité des différents BS étudiés en fonction du pourcentage de bois.

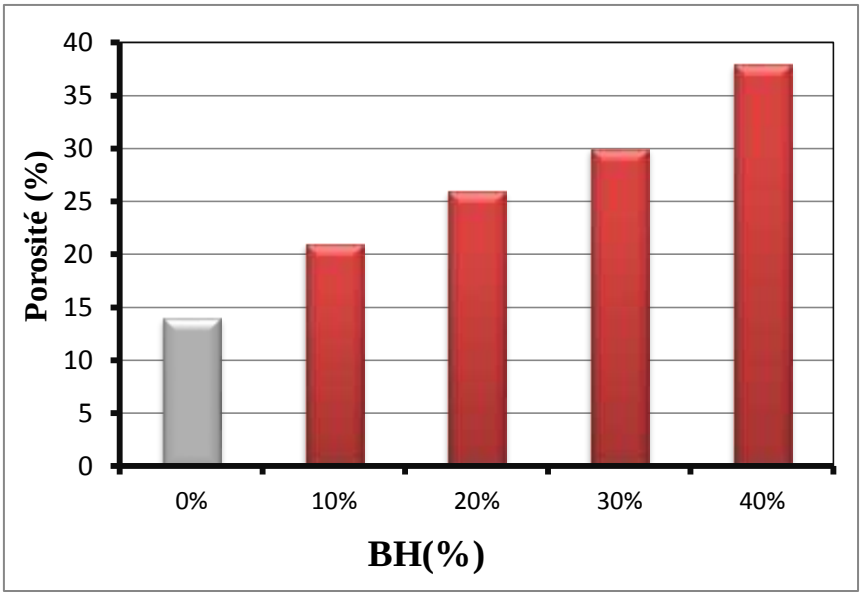


Figure III-19 : porosité en fonction de % de BH.

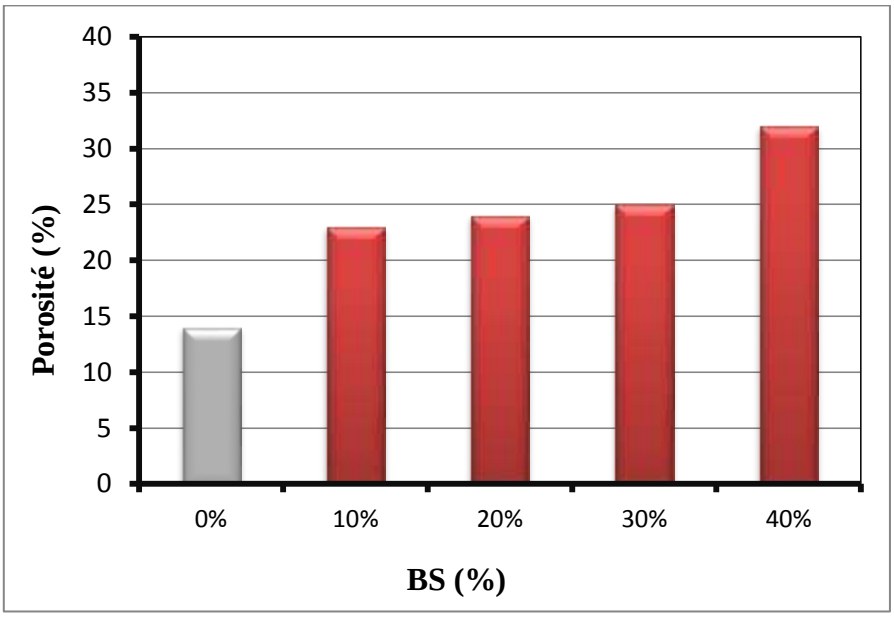


Figure III-20 : porosité en fonction de % de BS.

D'après les résultats obtenus on remarque que la porosité des BS de bois est plus élevé que celle du BST. On remarque aussi que la porosité des BSBH plus grande 63% par rapport

BST que celle des BSBS 56%, on peut dire ici que l'adhérence de BSBH et plus faible de BSBS.

III-3-7 - Conductivité thermique

Les valeurs des conductivités thermiques obtenues décrite et identifiée dans les **Figure III-21 et Figure III-22** comme suit :

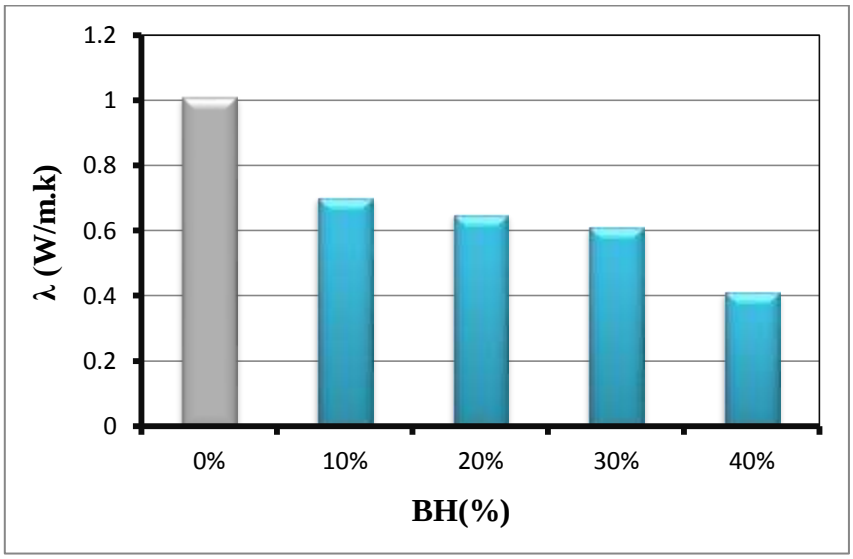


Figure III-21 : Conductivité thermique en fonction de % de BH.

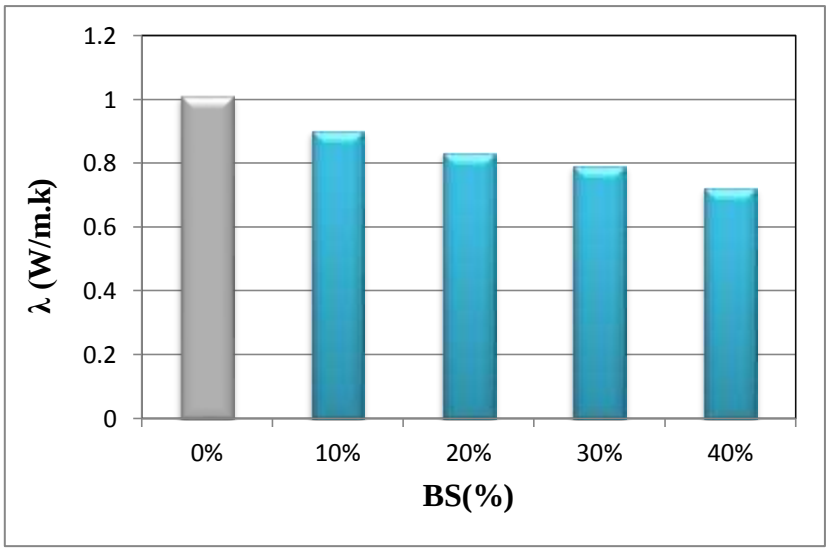


Figure III-22 : Conductivité thermique en fonction de % de BS.

Les résultats obtenus dans **figures III-21** et **figures III-22** montrent que la conductivité thermique de BS diminue avec l'augmentation de pourcentage de BSBH et BSBS. Cette

diminution est varié d'un BS à l'autre, par exemple, BSBH40% et BSBS40% une réduction de la conductivité thermique de 59% et 87% par rapport au BST. Ceci vient du fait de l'incorporation d'une quantité d'eau différente dans le mélange pour le BSBS.

III-3-8 – Résistance au feu

A- La résistance à la compression

Les résultats obtenus sur la résistance à la compression après le chauffage des éprouvettes à 200 °C,400°C et 600 °C sont représenté sur les **figures III-23 et figures III-24 et figures III-25 figures III-26** suivantes :

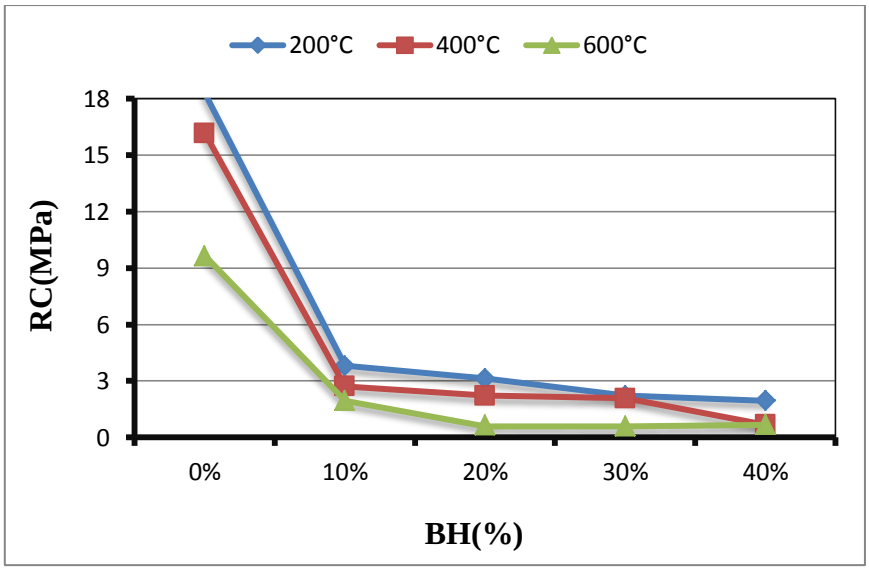


Figure III- 23 : Résistance à la compression en fonction de % de BH.

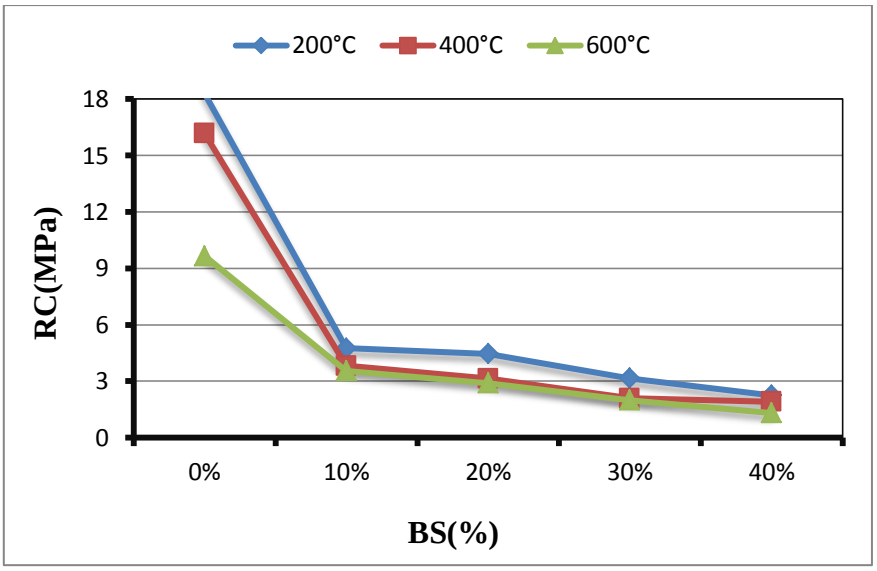


Figure III- 24 : Résistance à la compression en fonction de % de BS.

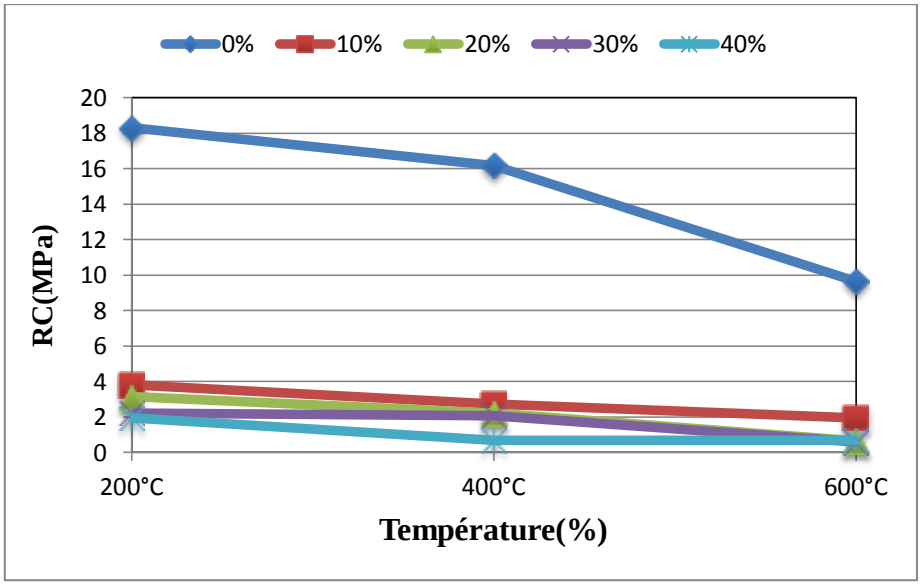


Figure III-25 : Résistance à la compression des BSBH chauffés à T=200 °C et T=400 °C à T= 600 °C.

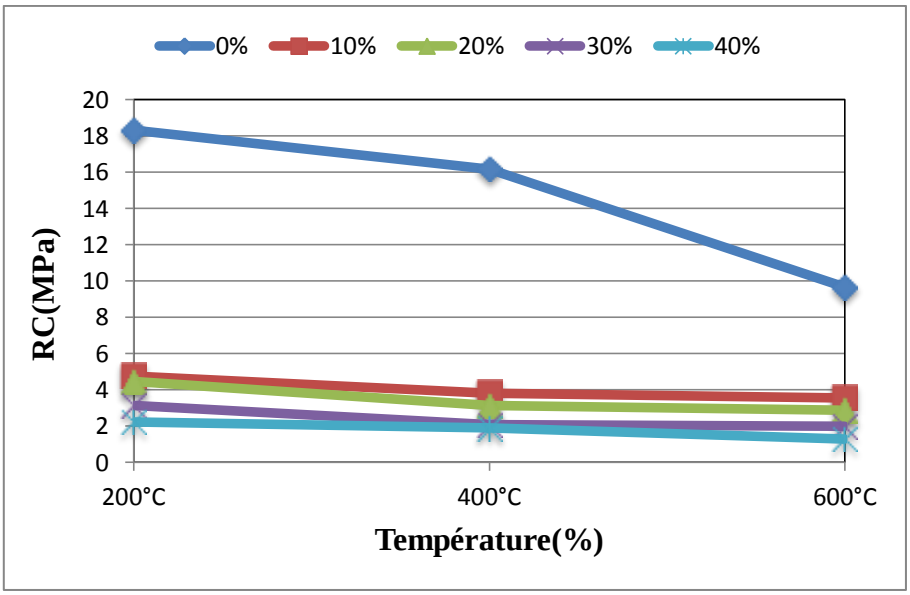


Figure III-26 : Résistance à la compression des BSBS chauffés à T=200 °C et T=400 °C à T= 600 °C.

L'évolution de la résistance à la compression des différents BS chauffé est représentée en **figure III-25 et figure III-26**. Les résultats obtenus montrent qu'il y a toujours un chute de résistance au 200 °C et 400 °C et 600 °C pour tous les types des BS. On enregistre toujours à cette température une augmentation de résistance quelques soit le types de BS. Au-delà du pic de résistance à 200°C, on note toujours une diminution quasi linéairement de la résistance à la compression pour les bétons de sable chauffé à 600 C°.

A. La perte de masse

Les résultats obtenus sur la perte de masse après le chauffage des éprouvettes à 200°C et 400°C et 600°C sont représenté sur les **figures III-27** et **figures III-28** suivantes :

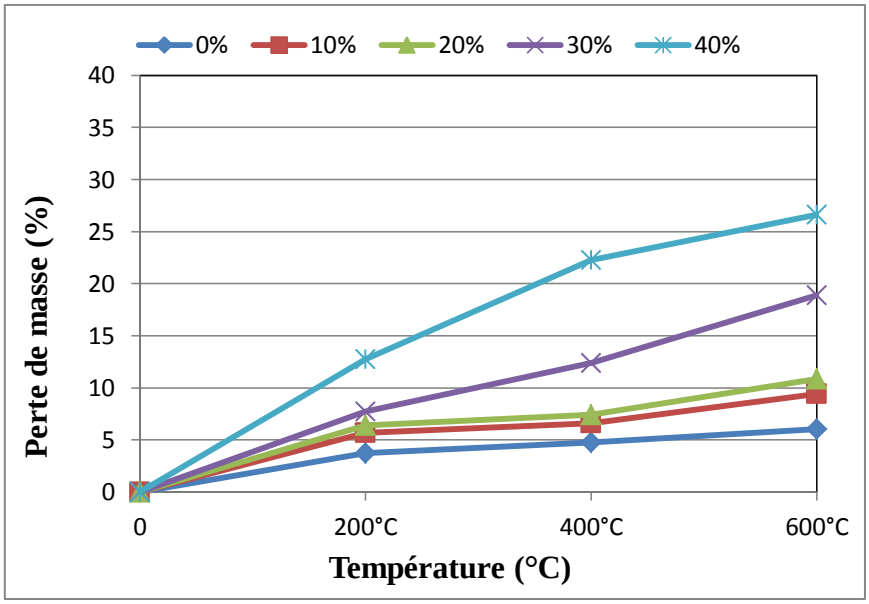


Figure III-27 : Perte de masse des BSBH chauffés à T=200 °C et T=400 °C et à T= 600 °C.

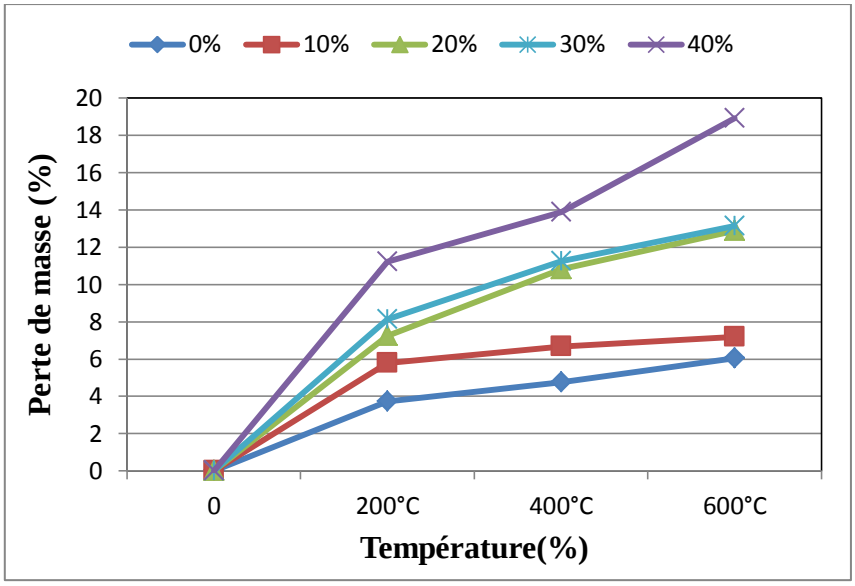


Figure III-28 : Perte de masse des BSBS chauffés à T=200 °C et T=400 °C et à T= 600 °C.

Les figures précédentes représentent l'évolution de la perte de masse des différents BS de bois en fonction de l'élévation de la température. On constate que quel que soit le types de BSBH et BSBS, la perte de masse est toujours permanente durant l'échauffement de tous les types de BS, et que la perte de masse des BSBH et BSBS.

Conclusions Générales

Conclusions générales

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effet du bois sur le comportement du béton de sable avec un nouveau procédé de traitement du bois. À la lumière des résultats obtenus, on peut conclure que :

Le procédé de traitement à l'aide de bois d'argile satisfaction représenté par une diminution de la densité pour les deux séries de béton de sable avec augmentation en pourcentage de bois que celle à l'état durci. Ce qui facilite son utilisation (avec moins de ségrégation possible de 40% de bois) dans le béton de sable.

La maniabilité des différents mélanges de béton de sable étudiés avec la substitution de bois du est située entre 7 est 10 seconde selon la recommandation avec un rapport E/C est un dosage en super plastifiant fixe. Avec un rapport E/C efficace constant dans les deux séries de béton de sable

La densité de tous les types diminue avec L'augmentation du pourcentage du bois traité.

Le pourcentage d'air diminue avec l'augmentation du pourcentage du bois traité.

La résistance à la compression et à la traction du béton de sable diminue avec l'augmentation en pourcentage de bois traité.

Le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage du bois traité.

Le gonflement augmente avec le pourcentage du bois traité.

L'absorption d'eau par capillarité du béton de sable augmente avec l'augmentation en pourcentage du bois traité.

La porosité de tous les types de béton augmente avec l'augmentation du bois traité.

La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du pourcentage de bois traité.

La résistance à la compression de tous les types du béton de sable au feu diminue avec l'augmentation de la température 200°C ,400°C et 600°C.

La masse de tous les types de béton de sable est diminués avec l'augmentation de la Température 200°C ,400°C et 600°C.

Il semble que la deuxième technique du traitement (béton de sable avec bois traité sec) améliore les propriétés du béton de sable (résistance a la compression et à la traction , retrait, gonflement, absorption, porosité, résistance au feu) ,

Sauf la conductivité thermique où la première technique (béton de sable avec bois traité humide) a la bonne valeur.

Références

[1] K GADRI « chapitre 2 béton de sable » thèses université –biskra.dz 2007.

[2] BABA ARBI Ali et MANSOUR Noussaiba « Comportement du béton de sable de dunes renforcé par des fibres métalliques soumis à haute température » Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla (2017).

[3] Thèse .unv-biskra.dz/2429/4/Chapitre%2002.pdf

[4] ELALOUANI, M et HADJ SAID. M, Etude de la propriété rhéologique du béton de sable de dunes, Mémoire de master, Université de Ouargla 2011.

[5] GAGUI Warda, « L'effet d'ajout des fibres palmiers dattiers (Saaf et Lif) sur les propriétés physico-mécanique des bétons de sable » Université Mohamed Khider – Biskra (Juin 2015).

[6] CHABI Makhlouf et LAMALI Bilal « Valorisation de la poudre de verre dans un béton ordinaire destiné Pour la précontrainte » Universite De M'hamed Bougara -Boumerdes

[7] BEN HAOUA Sihem et TAZEGHOUINE el – Mehdi « Comportement du béton de sable auto- plaçant à base de ciment ternaire et quaternaire » Université Dr Yahia Farés De Médéa (Juin 2018)

[8] MEZIDI Omar, « Etude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudrette de caoutchouc », Mémoire De Magister, ENP, 2008.

[9] J.J. Chauvin et G. Grimaldi. « Les bétons de sables » Bulletin liaison laboratoire, Ponts et chaussés N°157, Réf 3336, PP:9-15, (Sept-Oct. 1988).

[10] Neville, A., « Propriétés des bétons » Eyrolles, France, 2000.

[11] Adam M. Neville, propriétés des Bétons, Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris,2000.

[12] ASTM C 618 « Standard Spécification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrète »

[13] OKAMURA.H ,and M .Ouchi,« Self Compacting Concrete : Development,present use and future » In self compacting concrete : proceeding of the first international RILEM symposium, A . Skrendahl, and O . Petersson, Eds . RILEM Publications, Cachan,France,1999.

[14] BOUTIBA ALDJIA, « Accélération du durcissement par énergies renouvelables du béton frais et caractérisation du béton durci » Thèse de magister, Université M'hamed Bougarra.

[15] ABDELAZIZ BOUDCHICHA « Action des additions et super plastifiants sur les mortiers et bétons (Etude des propriétés rhéologiques et mécanique) » Edition Universitaires européennes.

[16] Rebih Zaitri, M. Bederina, F. Dif, Y. Guetaf « Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés » 2015

[17] Bederina .M: « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger (2007).

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

[19] K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan Nambiar, G. Siva Ranjani,

« A classification of studies on properties of foam concrete, Cem. Concr. Compos ». 31 (6) (2009) 388–396.

[20] BEN YAHIA Abdelaziz « Formulation de béton à base d'un sable selon la méthode de DREUX-GORISSE » Université Dr Yahia Farés De Médéa (Juin 2013).

[21] BELFERRAG Allaoua, Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes, Mémoire MAGISTER juin 2006.

[22] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. « Self-compacting concrete». Structural Concrete, 17, March 2000.

[23] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi.«Self-compacting concrete». Structural Concrete, 17, March 2000.

[24] J.J. Chauvin. « le béton de sable en Union Soviétique », Bulletin liaison laboratoire Ponts et Chaussées, N° : 174, Réf 3589, PP : 61-68, (Juil. août 1991)

[25] Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton réalisés par l'association Québec en collaboration avec les manufacturières de fibres métalliques et de fibres synthétiques 2005

[26] K.Ozawa, S.Tagtemsirikul, and K.Maekawa.« Rôle of materials on the filing capacity of fresh concrete », In Proceedings of The Fourth CANMET and ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, American Concrete Institute, May1992, pp212-137.

[27] BOUHNIK Brahim « Contribution à la valorisation du sable de dune dans la formulation du béton destiné aux ouvrages hydrauliques en milieux sahariens » Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister, Université Kasdi -Merbah Ouargla (2007).

[28] SAITI Issam « Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA » Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de magistère, Université kasdi merbah - Ouargla(2014).

[29] GUESMIA Sakina et BENGUERNOUZE Meriem et LABOUKH Asma « Performances d'un béton de sable autoplaçant à base de déchets de carrelage » Projet de Fin d'études Présenté pour l'obtention du diplôme de Master LMD, niversité Dr. Yahia Farés de Médéa

[30] Hongjian DuUse of waste glass as sand in mortar: Part I - Fresh, mechanical and durability properties Cement and Concrete Composites 35(1):109-117. January 2013.

[31] BEDERINA, « caractéristiques mécaniques et micro structure de béton de sable » mémoire de magistère université de Laghwat ,2000.

[32] SABLOCRETE,(1994) « Béton de sable » Presse de l'ecole national des ponts et chaussées, Paris, France.

[33] Thèse de magister « Influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico -Mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment» Zireg 2005

[34] RILEM: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69

[35] American Concrète Institute : Guide pour le béton de structure à base de granulats légers. Traduction du CATED, SDT BTP (1970).

[36] Benabed. B, Azouz. L, Damene. Z « Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base du sable de dune » ,colloque CMEDIMAT(6-7 décembre 2005).

[37] AIFA Salah Eddine et GHELIAOUI Mohamed « Etude du comportement des bétons légers à haute température » Projet de Fin d'études Présenté pour l'obtention du diplôme de Master LMD, Université Dr. Yahia Farés de Médéa (Juin 2018).

[38] M. S. Goual, Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Caractérisation et comportement thermo hydrique, Thèse de doctorat d'état de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 2001.

[39] M. Arnoud, M.Virlogeux, Granulats et Bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.

[40] N.E.Kedjour, propriétés et pathologie du Béton, réimpression1993

[41] K. Alrim, N Al Cheikh-Kassem, M Queneudec, E.A.Decamps, Construire en matériaux locaux : tradition et modernité de l'habitat, approches culturelles, réalités économique, Colloque Francomaghrebin, Marseille Oct 1991.

[42] P. Pimienta, J. Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, H. Nicole, Etude de faisabilité des procèdes de construction à base de Béton de Bois, Cahier du CSTB, Livraison 346, N°2703,1994.

[43] AHMED ZIREGUE, valorisation de coproduits industriels « Influence de différents facteurs d'allégement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment », Université Amar Telidji De Laghouat2005.

[44] A. Ledhem, Contribution à l'étude d'un béton de bois, Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois, Thèse de doctorat de l'INSA de lyon, 1997.

[45] A.Ledhem, R.M.Dheilly, M.L.Benmalek, M.Queneudec, Proprieties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste, Journal of Construction and Building Materials 14(2000) pp.341-350.

[46] M.S.Goual, Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux.Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Caractérisation et comportement thermo hydrique, Thèse de doctorat d'état de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 2001.

[47] A. Ferhat, Caractérisation physicomécanique à court terme d'un béton léger élaboré à partir d'agrégat pouzzolanique, Mémoire de Magister de l'université d'Oran, p174, 2002.

[48] M. Shink, Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des Bétons de granulats légers, Thèse de doctorat de l'université de Laval Avril 2003.

[49] U-WERT-Bechung, Coefficient de transmission thermique, p4.

[50] Document Internet, Matériaux de construction, site http://iusti.univ-mrs.fr, pp1-5.

[51] M.L.Benmalek, H.Houari, A.Bali, M.Queneudec, Comportement d'un composite fine minerale-Ciment-Bois élaboré à l'aide de déchets industriels solides, sciences et technologie N°13 Juin 200 pp 65-72.

[52] J.P Yvrard, Expérimentation et modélisation du comportement Mécanique du polystyrène expansé. Thèse de doctorat de l'université de Lille,1998.

[53] Document Internet, F.A.Q, isolation thermique, p6, site http:// users-skynet.be

[54] M. Arnoud, M.Virlogeux, Granulats et Bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.

[55] R.Cabrillac, W.luhowiak ,R.Duval, Etude expérimentale de mise au point de matériaux porteurs légers à partir de laitier de magnésium, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux public, N°471 Janvier 89 pp19-35.

[56] Articles universitaires correspondant aux termes Argiles, limons et stabilisation des sols.

[57] Document Internet, Lignum, Le bois de A à Z-Ecologie, Site http://www.lignum.ch.

[58] Document Internet French wood, Bois traité sons vide, Site http://www.frenchwood/Bois.

[59] F.X.Mortreuil, C.Lanos, R.Jauberthie, wood shavings light weight concrete: benefit of chimical traitement vietnam international conference on Non- conventional Materials and Technologies mars 2002.pp 371-377.

[60] M.Eustafievici, O.Muntean, M. Muntean, Influence of the wood waste characteristics and its chemical treatement on the composites properties Vietnam intetnatinal conference on Nonconventional Materials and technologies, Hanoi-vietnam, mars2002.pp107-112

[61] G. Sissoko, « Durabilité des bétons légers à base de copeaux de bois Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire, Département de Physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.

[62] 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.

[63] J.J. Chauvin**,** « le béton de sable en Union Soviétique » Bulletin

liaison laboratoire Ponts etChaussées, N° : 174, Ref 3589, PP : 61-68, (Juil - août 1991).

[64] J.J.Chauvin et G.Grimaldi, « Les bétons de sables » Bulletin liaison laboratoire », Ponts et chaussés N°157, Ref 3336, PP:9-15, (Sept-Oct 1988).

[65] Boudaoud Z, « Etude des mortiers, des microbétons et des bétons de sable à base de sable fin deEdBoussaada », Thèse de Magistère, université M Boudiaf.

[66] Norme Francaise, NF P18-452 « Béton - Mesure du temps d'ecoulement des bétons et des morties aux maniabilimètres», Norme enregistrée, Mai 1988.

[67] Norme Francaise, NF P15-437 « Liants hydrauliques – technique des essais - Caratérisation des ciments par mesure de fluidité sous vibration des moriers», Juin 1987.

[68] Norme Algérienne, NA 2607 : « Granulats-Analyse granulométrique par tamisage»,Norme enregistrée, 1990.

[69] Norme Francaise,NF EN 12350 - 6 « Essais pour béton frais- Partie 6 : Masse volimique », avril 2012, (indice de clacement : P18-431- 6) .

[70] NF P 18-353, Norme Française P 18-353 ; Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aide de l'aéromètre à béton.

[71] Norme Francaise, NF EN EN 196-1« Méthodes des essais des ciments - partie 2 : analyse chimique des ciments», avril 2006, (indice de clacement : P15 - 471 - 1) .

[72] CEN EN 196-1 Nome française CENEN 196-1 « Méthode d'essais des ciments, partie I : Détermination des résistances mécanique » AFRON, Paris, Aout 1995.

[73] Norme Francaise, NF P18-412« Béton : Caractéristiques communes des machines hydrauliques pour essais de compression, flexion et traction des matériaux durs», Norme enregistrée, Déc. 1981.

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

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

[76] 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.

[77] ISO 834-1, Essai de résistance au feu - Éléments de construction - Partie 1: Exigences générales. 1999

Annexes

Annexe A : Fiche technique du ciment



Ciment

MATINE

Ciment pour béton exigeant

- Destiné aux bétons de performances avec une résistance caractéristique à la compression Rc 28> 25 MPa
- Compatible avec les différents adjuvants et ajouts cimentaires
- Approprié à la réalisation des bâtiments élancés, tunnels, barrages et ponts

Nous pouvons utiliser les proportions moyennes mentionnées ci-dessous dans le cas de l'absence d'une formulation étudiée.



Remarque : Ces dosages ne sont donnés qu'à titre indicatif, les résultats de ces formulations peuvent varier selon la nature des matériaux utilisés et les conditions de mise en oeuvre.

LAFARGE
لافارج

MATINE

Ciment pour béton exigeant

CEM II/A 42.5 R NA 442

FICHE TECHNIQUE

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

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

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

Domaine d'utilisation :

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

Les principales applications de ce ciment sont :

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

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

Annexe B : Fiche technique du **VISCOCRETE TEMPO12**

Construction

Notice technique
Edition juin 2017
Numéro 1.20
Version n°106. 2017
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

Présentation

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

Caractères généraux

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



Agréments, essais de laboratoire

- PV CNERIB : DTEM : 108/2017.

Caractéristiques

Aspect

Liquide brun clair

Conditionnement

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

Stockage

Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C.
SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.
En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

Conservation

1 an en emballage intact

Données techniques

densité	1,06 ± 0,01
pH	6 ± 1
Teneur en Na_2O Eq.	≤ 1 %
Extrait sec	30,2 ± 1,3 %



Tamiseuse électrique











Essais d'équivalent de sable.



La masse volumique de calcaire.





Essais de consistance et temps de prise.