REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Étude d'un composite a matrice cimentaire avec ajout de polystyrène expansé et copeaux de bois

---

Présenté par

ETTOUHARI Hafsa

KERMEZLI Khadidja

Proposé et Dirigé par

Pr. DEBIEB. F

Co-encadré par **: M^{elle} BENCHOUAF.A**

Promotion Juin 2019

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH

Pour nous avoir guidés vers le bon chemin

De la lumière et du savoir et pour nous avoir

Donné du courage, de la volonté afin de pouvoir

Réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Pr. Debieb Farid

Et M$^{elle.}$ BENCHAOUF Amina Pour l'encadrement

De ce mémoire pour leur aide leur patience

et la confiance qu'ils nous ont accordée

Nous tenons à remercier : le président et les membres de jury

pour avoir accepté de juger 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 ceux qui ont contribué de près ou de loin

à la réalisation de ce mémoire.

Hafsa et Khadidja



Dédicases

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage

Et en gratitu de leurs dévouement, de leurs soutienpermanent

Durant toutes mesannées d'études, leurs sacrifices illimités,

leursréconfort moral, eux qui

ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour

me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être

dit, mesaffections sans limite.

A mon frère : Khaled

A mes sœurs: Sara,selma,assia,moufida

A toute la famille : ETTOUHARI

Je remercie mon amie et binôme Khadidja qui a contribué

à la réalisation de ce modeste travail.

A mes chères amies

A toute la promotion de G.C 2019

Hafsa

Hafsa



Dédicases

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage

et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien

permanentdurant toutes mesannées d'études, leurs sacrifices

illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort

pour mon éducation, mon instruction et pour

me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes

affectiv ons sans limite.

A mes frères : Mohamed, Bachir, Mustapha ,

A mes sœurs: Nabila,Z'hor .

A toute la famille : KERMEZLI

Je remercie mon amie et binôme Hafsa qui a contribué à la réalisation de

ce modeste travail.

A tous mes chères Amies

A toute la promotion de G.C 2019

Khadidja

Khadidja

ملخص

هذا العمل هو جزء من موضوع البحث العام الذي يركز بشكل رئيسي على استعادة واستغلال المخلفات الصناعية في الخرسانة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة أثار البوليستيرين الموسع والمعالج ورقائق الخشب المعالجة على سلوك وديمومة خرسانة الرمل .تستخدم نسب مختلفة لإضافة البوليستيرين (50.40.30.20.10).يظهر التحليل التجريبي أن عملية معالجة نفايات البوليستيرين ورقائق الخشب والنتائج الفيزيو-ميكانيكية وديمومة الخرسانة الجديدة هي نتائج مقبولة وتؤدي الى نصح استعمال هذا النوع من الخرسانة كخرسانة خفيفة الوزن يمكن استعمالها في مجال العزل الحراري .

Résumé

Ce travail fait partie d'une thématique de recherche générale principalement axée sur la valorisation et l'exploitation des déchets industriels dans le béton.

L'objectif principal du présent travail est l'étude des effets du polystyrène expansé traité et coupeaux de bois traité sur le comportement et la durabilité du béton de sable. Différents pourcentages d'ajout en déchets de polystyrènes et coupeaux de bois (DPB) (0,10,20,30,40,50%) sont utilisés. L'analyse expérimentale montre que le procédé de traitement adopté du DPB ainsi que les résultats physico-mécaniques et les approches de durabilité utilisés du nouveau béton demeurent acceptables et conduisent à la recommandation de ce type de béton comme béton léger pouvant être prometteur dans le domaine de l'isolation thermique.

Abstract

This work is part of a general research theme mainly focused on the recovery and exploitation of industrial waste in concrete. The main objective of this work is to study the effects of expanded polystyrene treated wood shaving on the behavior and durability of sand concrete. Different percentages of addition of polystyrene wast and wood shaving (0,10,20,30,40,50%) are used. The experimental analysis shows that the adopted polystyrene and wood shaving waste treatment process as well as the physico-mechanical results and durability approaches used for the new concrete remain acceptable and lead to the recommendation of this type of concrete as a lightweight concrete.wich may be promising in the field of thermal isulatio

Sommaire

Remerciement....2
Dédicases....3
ملخص....5
Résumé....5
Abstract....5
Liste des figures....9
Liste des tableaux....13
Introduction générale....16
CHAPITRE I:....3
Béton léger....3
I.1Introduction....3
I.2 Généralités sur Les bétons légers....3
I.2.1 Définitions et classification....3
I.2.2 Différence entre bétons classiques et bétons légers....5
I.3 Domaine d'utilisation des bétons légers....7
I.4 Avantages et inconvénients des bétons légers....7
I.5.1 Classification des granulats légers....9
I.6 Les bétons de granulats de bois et de polystyrène....11
I.6.1 Les Bétons de granulats de bois....11
1.6.2 Définition des Granulats de Bois....13
I.6.3 Caractéristiques physiques du Bois....15
I.6.4 Différents procédés de traitement des granulats de bois....16
I.7 Influence de bois sur les propriétés physique et mécanique du béton....20
I.7.1Masse volumique....20
I.7.2Résistance à la compression....21
I.7.3 Résistance à la traction....22
I.7.4 Module d'élasticité....23
I.7.5 Isolation thermique....24
I.8 Les bétons de granulats polystyrène....29
I.8.1Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène....30
I.8.2 Définition des granulats de polystyrène....30
I.9 Influence de polystyrène sur les propriétés physico- mécanique dubéton....32
I.9.1 Densité....32

I.9.2 Résistance à la chaleur 32
I.9.3 Absorption 32
I.9.4 Résistance en compression du polystyrène 32
I.9.5 Conductivité thermique 33
I.10 Conclusion 39
CHAPITRE II: 1
II.1Introduction 41
II.2 Généralités sur les bétons de sable 41
II.2.1 Historique des bétons de sable 41
II.2.2 Définition du béton de sable 43
II.3 Constituants du béton de sable 44
II.3.1 Les sables 44
II.3.2 Les ciments 44
II.3.3 L'eau 44
II.3.4 Les fines d'ajouts 44
II.3.5 La fumée de silice(D) 45
II.3.6 Cendres volantes 46
II.3.7 Laitier 47
II.3.8 Schistes calcinés (T) 47
II.3.9 Pouzzolanes naturelles(Z) 47
II.3.10 Les fillers calcaires(L) 48
II.3.11 Les adjuvants 51
II.3.12 Les fibres (renfort de structure) 52
II.3.13 Les gravillons 52
II.4 Durabilité du béton de sable 53
II.5 Comportement mécanique du béton de sable 53
II.6 Variations dimensionnelles du béton de sable 54
I1.6.1 Fluage 54
II.6.2 Retrait 54
II.6.3 Phénomène de ségrégation des constituants 55
II.7Domaines d'emploi des bétons de sable 56
II.7.1 Le béton de sable en bâtiment 56
II.7.2 Le béton de sable dans la préfabrication 57
II.8 Limites des bétons de sable 59
II.9 Méthodes de formulation des bétons de sable 60
II.9.1 Approche théorique de la formulation des bétons de sable 60

A- Dosage en fines d'un béton de sable 61
B- Dosage en eau d'un béton de sable..... 62
C- Dosage en sable 64
II.10 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable 65
II.11 Les différentes étapes de la formulation 65
II.11.1Détermination d'une formule de base sans fines d'addition..... 65
II.11.2 Détermination du dosage en fines d'addition 67
II.12 Conclusion 69
Chapitre III 41
Matériaux et essais 41
III.1 INTRODUCTION.....71
III.2 Les matériaux utilisés 71
III.2.1 Sable 71
III.2.2 Ciment 72
III.2.3 Eau de gâchage 75
III.2.4 Super plastifiant..... 75
III.2.5 Ajouts (fillers)..... 75
III.2.6Granulats des billes de polystyrène 76
III.2.7Traitement des billes de polystyrène 77
III.2.8 Granulats de copeaux de bois 77
III.3 Formulation du béton de sable Léger 79
III.3.1Mode de malaxage : 79
III.3.2 Confection et conditionnement des éprouvettes :..... 80
III.4 Les Essais réalisés sur béton de sable.....81
III.4.1Essai à l'état frais :..... 81
III.4.2 Essai à l'état durcis 84
III.5 CONCLUSION : 93
CHAPITRE IV 94
IV.1 INTRODUCTION..... 94
IV.2 Béton frais 94
IV.2. 1. Temps d'écoulement 94
IV.1.2 Densité..... 94
IV.2.3 Air occlus 95
IV.3 Etat durcis..... 96
IV.3.1 Porosité..... 96
IV.3.2 Résistance mécaniques 97

IV.3.3Absorption d'eau par capillarité 98
IV.3.4 Variations de longueur 99
IV3.4.1 Retrait 99
IV.3.4.2Gonflement 101
IV.3.5 .1 Perte de masse 101
IV.3.5 .2 Gain de masse 102
IV.3.6 Corrélation entre différents propriétés du BS 103
IV.3.7 Effet Conductivité thermique 104
IV.3.8 Résistance au feu 104
IV.4 Conclusion 107
RECOMMANDATION 110
REFERENCE 110
BIBLIOGRAPHIQUE 110
ANNEXES 110

Liste des figures

Figure I.1:Représentation schématique des différents types de béton légers

Figure I.2 présente une classification proposée par Lafarge Béton Granulats

Figure I.3Plancher ou dalle en béton de bois

Figure I.4 : Observations au MEB des copeaux de bois

Figure I.5 Evolution de la densité sèche en fonction de la teneur massique en bois

Figure I.6 Variation de la résistance à la compression du béton de bois en fonction de la densité

Figure I.7 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité

Figure I.8 Résistance à la traction en fonction de la densité

Figure I.9 influence du pourcentage massique de copeaux de bois sur la résistance à la flexion

Figure I.10Variation du module d'élasticité du béton de bois en fonction de la densité

Figure I.11 Variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité

Figure I.12Evolution des variations dimensionnelles dans différentes ambiances en fonction de l'âge

Figure I.13 Variation du retrait du béton de bois en fonction du dosage en ciment

Figure I.14 Effet de la fumée de silice sur le gonflement

Figure I.15 Phase d'expansion et de moulage du polystyrène

Figure I.16 Effet de la fumé de silice sur la résistance à la compression

Figure I.17 Variation de la résistance à la flexion en fonction de la proportion volumique en EPS

Figure I.18 Variation du retrait du béton de polystyrène en fonction du dosage en polystyrène

Figure II.1**.** Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte)

Figure II.2Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel

Figure II.3 :Fines sphériques

Figure II.4 :Microstructure du fumé de silice (forme sphérique)

Figure II.5 **:** perméabilité aux ions chlores des bétons à 28

Figure II.6 **:** Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS

Figure II.7 :Variation de la résistance à la compression des mélanges étudiés

Figure II.8:Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux de calcaire

Figure II.9 Différence entre béton de sable et béton ordinaire

Figure II.10**:**Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores

Figure II.11 fluage d'auto-dessiccation

Figure II.12 fluage total

Figure II.13 Retrait total

Figure II.14 Retrait d'auto dessiccation

Figure II.15Eprouvettes non vibrées non piquées

Figure II.16Pièces présentant un bel aspect de surface, qualité de peau satiné et uniforme Figure II.17Ombrelles d'étanchéité en place

Figure II.18 Tunnel du métro de Leningrad

Figure II.19Bâtiment à Toitures à plis

Figure II.20 Moulage d'un élément

Figure II.21**:** Projection sur surface avec nouveau ferraillage

Figure II.22:Renforcement d'un égout

Figure II.23 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines

Figure II.24Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton Pour deux tailles du sable

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

Figure II.26Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle)

Figure II.27Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition

FigureIII.1Courbes granulométriques de sable et de déchets utilisées

Figure III.2Type de ciment utilisé

Figure III.3Pérméabilimètre de Blaine

Figure III.4L'appareil de Vicat

Figure III.5Super plastifiant VISCOCRETE TEMPO 12

Figure III.6La procédure de concassage de fillers calcaire

Figure 0.7: Le malaxage du béton sable

Figure III.8**:** Maniabilimètre à béton de sable

Figure III.9: Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à béton de sable

Figure III.10**:** Mesure de la densité du Béton de sable

Figure. III.11L'aéromètre à mortier.

Figure0.12: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

Figure III.13**:** Dispositif de rupture à la compression

Figure III.14Dispositif mesure du retrait et gonflement

Figure III.15Absorption d'eau par succion capillaire

Figure.III.16 Mesure de la porosité accessible à l'eau

FigureIII-17**.**Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique

Figure III.18 Variables étudiées

Figure IV.1**:** Variation du temps d'écoulement du BS

Figure IV-2:Densité des différents BS

Fig. IV.3L'air occlus des BS à base de (DPB)%

Figure IV.4 La porosité en fonction de % (DPB)

Figure IV.5:Résistance à la traction en fonction de % (DPB)

Figure IV-6:Résistance à la compression en fonction de % DPB

Figure IV.7 : Absorption d'eau des BST à base de DPB

Figure IV.8: Le retrait des BST à base de DPB

Figure IV.9 Gonflement des BST à base de DPB

Figure IV.10. Perte de masse des BS à base DPB

Figure IV.11 Gain de masse des BST à base de DPB

Figure IV.12:Relation entre la porosité et l'absorption d'eau par capillarité des BSDPB

Figure IV.13:Relation entre la porosité et la résistance à la compression des BSDPB
Figure IV.14:conductivité thermique en fonction de DPB(%)
Figure IV.15: la résistance au feu en fonction de % (DPB)
Figure IV.16: la résistance au feu en fonction de température
Figure IV.17:Perte de résistance en fonction de % (DPB)

Liste des tableaux

Tableau I-1: Classification fonctionnelle des bétons légers.
Tableau I-2 : Classification des bétons légers selon la norme ACI 21 213R-87
Tableau I-3 : Quantités de déchets industriels produits : évolution 2008

Tableau I-4: Exemples de conductivité thermique et de masse volumique de quelques essences

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

Tableau I-6Conductivités thermiques des différents types de béton légers

Tableau I-7 Caractéristiques physicomécaniques des bétons de bois

Tableau I-8 Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité

Tableau I-9 Conductivité thermique des bétons de polystyrène

Tableau I-10Valeurs des conductivités du BLIT en fonction du dosage en Polystyrène

Tableau I-11 Valeurs des modules d'Young du BLIT en fonction du dosage en Polystyrène

Tableau I-12 Détail de la composition du béton de polystyrène contenant des fibres d'acier

Tableau III-1 **:** Propriétés physiques d'identification de sables utilisé

Tableau 0-2:L'analyse chimique du ciment et composition du clinker

Tableau 0-3**:** Caractéristiques physiques de calcaire

Tableau III-4: Caractéristiques physiques du des granulats polystyrène traité et non expansé

Tableau III-5:Composition des différentes BSESP étudié dans un 1 m^3

Tableau III-6:Composition des différentes BSESP étudié dans un 1 m^3

Tableau 0-7:Composition des différentes BSESPB étudié dans un 1 m^3

Tableau III-8Essais sur bétons de sable durcis

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'industrie de la construction est accusée d'avoir généré d'énormes quantités de déchets de construction et de démolition. Des millions de tonnes de déchets de construction sont générés chaque année. Parmi les déchets de construction, les déchets inertes (sol, roches et débris de béton, par exemple) sont déposés dans les aires de remplissage publiques. Le reste des déchets non inertes, bois, bambou, plastiques, papier et matériaux d'emballage, doivent être éliminés dans des décharges municipales de déchets solides ils sont souvent mélangés et contaminés. En raison de la pénurie d'espace pour la mise en décharge, il est nécessaire de développer de nouvelles méthodes de recyclage des déchets non inertes.

Actuellement les travaux de recherche de nouveaux matériaux de construction se sont orientés vers la valorisation des matériaux locaux pour la confection des bétons performants au moindre coût. Parmi ces matériaux, l'Algérie possède un gisement très important de sable de dune qui couvre plus de 60% de la surface du pays, l'idée de promouvoir et d'introduire ce sable dans la confection des bétons et mortiers s'avère très intéressante, non seulement d'un point de vue économique, mais également environnemental.

Pour son importance dans la composition des bétons et mortiers, le sable naturel, notamment le sable alluvionnaire a subit une surexploitation irrationnelle. Le gouvernement Algérien a préconisé et établi une loi qui restreint l'utilisation des sables des oueds et le sable de mer (article 14 de la loi d'aout 2005).

L'objectif de la présente étude est l'étude d'un procédé d'allégement du béton de sable à composition optimale par incorporation de granulats de billes de polystyrène expansé et des coupeaux de bois dans la matrice.

L'étude expérimentale est consacrée à la caractérisation physicomécanique et thermique du béton frais et durci.

Afin d'atteindre les objectifs tracés, on a subdivisé ce mémoire en quatre grands chapitres étroitement liés :

- Le premier est consacré à une revue sur la documentation accentuée sur les bétons

légers en général et notamment sur les bétons de bois et les bétons de polystyrène.

- Le deuxième chapitre est consacré à une description des méthodes de formulation utilisées ainsi d'une revue sur la documentation sur les bétons de sable.
- La caractérisation des matières premières, la formulation des différentes compositions

Des bétons élaborés font l'objet du troisième chapitre intitulé matériaux et résultats expérimentaux.

- Le quatrième chapitre sera consacré à la caractérisation physicomécanique et thermique des bétons étudiés.

• Enfin, sur la base des résultats obtenus, on termine notre mémoire par une conclusion générale et perspective.

CHAPITRE I:

Béton léger

I.1Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus largement utilisé. Le béton de poids normal (NWC) est généralement utilisé pour la construction la construction malgré son poids relativement élevé et limitée performance thermique avec une conductivité thermique comprise entre 1,4 et 3,6 W / m.K**[1]** .Une réduction du poids unitaire du béton et pourtant, fournir une force suffisante va créer un important économique impact positif sur l'industrie de la construction. Le béton léger (LWC) offre un avantage considérable en termes de son poids unitaire **[2].**

I.2 Généralités sur Les bétons légers

Les bétons légers ont été relativement peu employés. Toutefois, la crise du logement liée au manque considérable en matériaux de construction ainsi que la consommation d'énergie de chauffage et de rafraîchissement des locaux qui ne cesse d'augmenter, ont provoqué un regain d'intérêt pour l'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels. Leur transformation en bétons légers demeure l'une des solutions les plus économiques afin d'y pallier à ces problèmes **[1]**.

I.2.1 Définitions et classification

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 sont utilisés dans la rénovation sur plancher bois, pour les travaux de remise à niveau, de ravoirage de sols, et dans l'allègement des structures. L'utilisation des bétons légers en construction signifie par delà une amélioration des performances thermiques, une manutention plus aisée, un gain de temps et de matériel et donc un positionnement plus intéressant par rapport à la compétitivité économique **[2].**

La commission **RILEM, 1970[3]** des bétons légers 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 institutions adoptent des définitions un peu différentes, d'après **[4]**, la commission **l'American Concrete Institute, 1970** limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours. En Allemagne, la norme DIN 1042, 1972

limites la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 kg/m^3. Par ailleurs, et dans l'objectif d'aider à déterminer la nature des essais à effectuer ainsi qu'à évaluer et interpréter les résultats et programmer la recherche. **J.L Kass et D Compbell, 1972 [5]** de l'institut de génie civil de l'université de Sydney en Australie ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leurs utilisations dans la construction (**Tableau. I.1**). Cette classification a été recommandée par la suite par la commission **RILEM [3]**

Tableau I-1: Classification fonctionnelle des bétons légers **[6]**.

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 [7]**. Celle-ci classifie les bétons légers en fonction de la masse volumique en trois catégories **[6]**. **(Tableau I.2):**

Tableau I.2. Classification des bétons légers selon la norme **ACI 21 213R-87[5]**

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.2.2 Différence entre bétons classiques et bétons légers

Malgré leurs bonnes qualités, les bétons classiques ont toujours présenté des inconvénients à savoir **[8] :**

• Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenté 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**.**

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.

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.

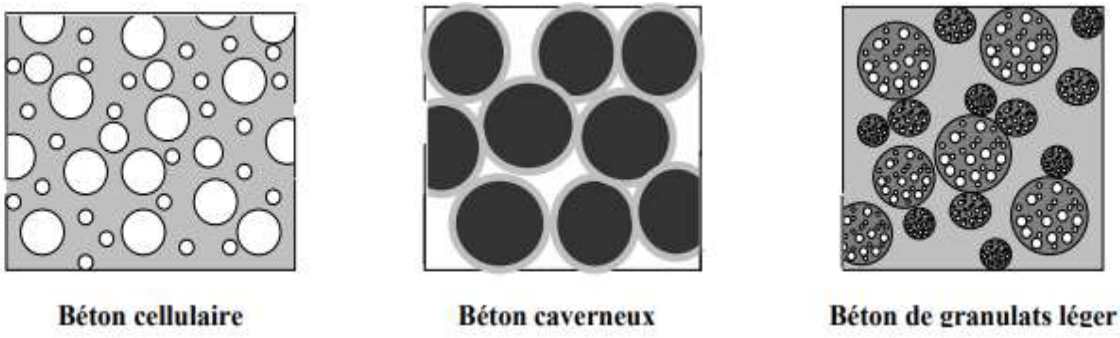
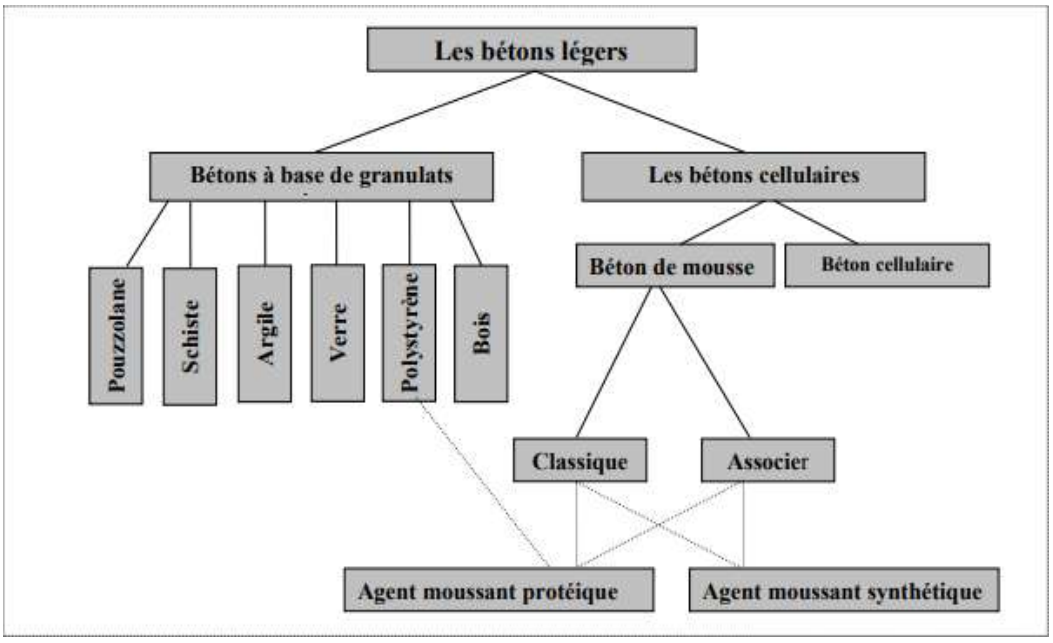


Figure I.1 Représentation schématique des différents types de béton légers **[1]**.

La figure I.2présente une classification proposée par Lafarge Béton Granulats



FigureI.2 Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats d'après **[9].**

Il existe trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton **[10]**

1. la matrice : le béton, dans ce cas, est appelé **« béton cellulaire ».** Les bulles d'air sont créées, lors du malaxage, soit par réaction chimique, soit par action physique.

2. entre les gros granulats : le béton, dans ce cas, est appelé **« béton caverneux »** (ou sans fines, c.-à-d. sans sable).

3. dans les granulats : le béton, dans ce cas, est appelé **«béton de granulats légers».**

I.3 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 [2].
- **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.
  - ✓ Entrevous et hourdis.
  - ✓ Les pavés.

I.4 Avantages et inconvénients des bétons légers

• Avantages :

- ✓ Un matériau plus légers :ces bétons permettent ainsi une plus grande souplesse quant à la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies. En effet, la réduction de la charge morte sur les structures permet entre autres d'utiliser des portées plus longues

ou de diminuer les sections des éléments porteurs, de réduire la quantité d'acier d'armature et même les dimensions des fondations.

- ✓ Meilleure isolation thermique, qualité appréciable du point de vue de la consommation d'énergie dans le bâtiment,
- ✓ Meilleure tenue aux conditions extrêmes de température : gel et feu,
- ✓ large choix de masses volumiques,
- ✓ Mise en œuvre simple et traditionnelle, sans vibration,
- ✓ Amélioration des conditions de manutentions dans le cas de la préfabrication,
- ✓ Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les coûts de transport et d'installation,
- ✓ Capables de jouer un rôle en tant qu'isolant thermiques et acoustiques compte tenu du volume d'air qu'ils contiennent, tout en conservant des niveaux de performances suffisants,
- ✓ Le choix des performances selon l'utilisation dans la construction simultanément sur deux aspects: mécanique/thermique, mécanique acoustique ou à la fois les aspects mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau de construction (matériau multi-usage),
- ✓ Prise de conscience environnementale permettant de réaliser des économies d'énergie substantielle,
- ✓ Possibilité d'utilisation dans les zones séismiques à cause du gain de poids **[11].**

- **Inconvénients :**

- ✓ Le faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations différées. (Déformabilités instantanée et différée plus grandes),
- ✓ Les bétons légers sont néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction. L'utilisation de fibres métalliques demeure une solution efficace pour en augmenter la résistance à la fissuration,
- ✓ Résistance mécanique plus faible en général, dans le domaine des valeurs élevées, Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes, *Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût. Bien que dans certains cas les bétons légers puissent revenir plus cher par mètre cube qu'un béton ordinaire, la construction peut être moins onéreuse vu la réduction du poids mort. Une juste comparaison ne doit pas se limiter

uniquement au prix. L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton, sa densité et ses qualités mécaniques.

I.5 Les bétons de granulats légers

Ce sont des bétons dans lesquels des granulas normaux ont été remplacés par des granulas 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 **[2].**

I.5.1 Classification des granulats légers

Les granulats légers peuvent être classés selon leur nature comme suit **[2] :**

• **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 **[11,12]**

•**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 **[13].**

• **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

• **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).

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.

En effet plusieurs travaux ont été réalisés où la matrice est composée essentiellement de déchets industriels ou de matières locales **[6]**

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 **[10]** 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.**[12,13]**

Tableau. 1.3. Quantités de déchets industriels produits : évolution 2008**[14]**

Catégorie de déchets	Production de déchets en tonnes
Bois	5 529 740
Métaux	3 960 337
déchets en mélange	2 160 388
papiers cartons	1 997 818
Plastiques	467 333
Verre	305 495
Caoutchouc	81 220
Textile	22 877
Total déchets banals	14 525 208

I.6 Les bétons de granulats de bois et de polystyrène

Les bétons de granulats de bois et de polystyrène appartiennent à la classe des bétons de granulats légers. Le manque ou la rareté de la littérature qui traite ces deux catégories de bétons est un témoignage que les granulats de bois et de polystyrène n'ont attiré que récemment l'attention des chercheurs travaillant dans le développement des matériaux légers. Cette partie s'intéresse à une revue générale sur les caractéristiques, la formulation et l'utilisation des bétons de granulats de bois et de granulats de polystyrène **[2]**

I.6.1 Les Bétons de granulats de bois

Le béton de bois est un matériau composite à matrice cimentaire, éventuellement adjuvante et chargé de végétales **[9,15]**, sa première apparition date de la fin des années soixante. Le béton de bois répond aux soucis de plus en plus importants des pays développés pour la préservation de la nature. En effet, le bois est une matière première renouvelable. Il permet en outre la valorisation des déchets de l'industrie de bois en particuliers celle de la fabrication du papier et de la menuiserie **[12].**

Les techniques de construction à base de produits en béton de bois sont relativement anciennes. Les premières codifications techniques de cette filière remontent en effet à la fin des années cinquante.

Les années soixante ont vu se réaliser un grand nombre d'ouvrages en béton de bois, principalement des murs extérieurs en petits éléments de maçonnerie. A l'heure actuel, l'Autriche et le Canada font respectivement partie des pays pour lesquels le marché des éléments de maçonnerie et des écrans antibruit en béton de bois sont les plus importants **[9].**

En France de nombreuses raisons et en particulier la croissance des exigences techniques, l'apparition de nouveaux bétons légers, l'évolution des enduits et des techniques d'isolation ont limité l'expansion des bétons de bois malgré des tentatives successives de promotion de la filière **[12].**

Un certain nombre de caractéristiques intéressantes ont été mise en avant par les personnes chargées de la commercialisation des produits en béton de bois, elles découlaient toutes de la légèreté du produit, de son isolation thermique, de son inertie thermique, en plus de l'augmentation de la productivité sur chantier, et le plus important est que le béton de bois permet de valoriser les déchets de bois **[9,12]**

C'est pour cela que le béton de bois est utilisé largement dans les domaines de construction, il est utilisé dans :

- **Les ouvrages extérieurs :**

• Murs en maçonnerie, en bloc creux.

• Murs en panneaux.

• Murs antibruit.

• Bardage de 50cm de large, 2 à 4m de longueur, 10 à 15cm d'épaisseur

• Panneaux de toiture : Constitué d'une âme en béton de bois sur laquelle est appliquée une couche de béton ou mortier de 10 à 20cm pour revêtement ultérieur **[16].**

- **Les ouvrages intérieurs :**

• Chappe pour réhabilitation.

• Dalle de plancher : Constituée d'une âme de béton de bois sur laquelle est appliquée une couche de mortier traditionnel 2.5cm x 6cm, d'une épaisseur de 5 à 25cm.

• Entrevous et hourdis 50cm x 1m pour une hauteur de 20 à 60cm.

• Eléments de cave empilables.

- **Ouvrages divers :**

• Plats à palette et scellements de blocage

• Les pavés

• Sols sportifs **[17].**



Figure I.3 Plancher ou dalle en béton de bois **[18]**

1.6.2 Définition des 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 **[9,11**].

*Les résineux : environ 400 espèces sont souvent des arbres de grande taille 40 à 50m de hauteur ils 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 **[19].**

- **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 **[20].**

- **Composition chimique du bois :**

Le bois est essentiellement constitué de cellulose et de lignine **[9,11]**

• 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 la quelle 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.

• 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 . 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 **[21],** 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 **[9,11].** La quantité d'eau (eau d'imprégnation et eau libre contenue dans le bois est caractérisée par un paramètre appelé humidité qui caractérise la teneur en eau du bois, elle définit par :

$$\omega\ (\%) = \frac{Mh-Ms}{Ms} \times 100 \quad \text{.....(equation I.1)}$$

- M_h masse de l'échantillon humide, Ms masse de l'échantillon anydre. Au cours du séchage c'est d'abord l'eau libre qui s'évapore , le point de saturation de la fibre est atteint lorsqu'elle sera complètement disparue (il se fixe à HR=30%), le séchage continue, c'est l'eau d'imprégnation qui commence à s'évaporer. Le bois "sec à l'air" a une humidité de 13 à 17% **[22].**

En particulier on atteint l'état anhydre à une température de 100 à 105°C.

La composition du bois (% pondéral) est d'après **[23,24]:**

- Carbone 50%
- Hydrogène 6%
- Oxygène 44%
- Azote 0.05% à 0.005%.

I.6.3 Caractéristiques physiques du Bois

Le bois est caractérisé par un certain nombre de propriétés qui influent évidement sur les caractéristiques physico mécaniques du béton de bois.

- **Masse volumique :** Tous les bois n'ont pas la même masse volumique; certains sont légers (peuplier, épices), d'autres sont lourds (chêne, ébène). La résistance augmente en générale avec la masse volumique.
- **Dureté:** La dureté caractérise la résistance opposée par le bois à la pénétration d'une pointe métallique, elle varié selon les essences, mais on considère en générale que plus les couches annuelles de croissance de l'arbre (cernes) sont étroites, plus le bois est dur **[25]**

- **Dilatation thermique:** Les variations thermiques du bois sous l'effet de la température sont environ trois fois plus faibles que celles du béton ou de l'acier **[9, 24,25].**
- **Conductivité thermique:** La conductivité thermique est environ 10 fois plus faible que celle de l'acier, elle varie selon les essences, en fonction de leur masse volumique et de leur taux d'humidité. Le tableau I.10 donne les valeurs moyennes de la conductivité thermique des résineux et des feuillus les plus utilisés

Tableau I-4 Exemples de conductivité thermique et de masse volumique de quelques essences **[24]**

Désignation	Conductivité thermique ($w.m^{-1}K^{-1}$)	Masse volumique à 15% d'humidité (kg/m^3)
Résineux	0.12	400 à 500
sapin, épices, pin sylvestre pin maritime	0.15	400 à 600
Feuillus chêne, hêtre, frêne	0.23	600 à 700

- **Comportement à l'humidité:** Le bois "travaille " c'est à dire se rétracte en séchant et gonfle en absorbant de l'humidité, mais les variations dimensionnelles ne sont pas égales dans touts les directions. Les variations dimensionnelles sont négligeables dans le sens axial relativement aux deux autres directions (tangentielle et radiale) **[23, 24,26]** Ces variations dimensionnelles ont fait l'objet de beaucoup de recherches afin de les limiter au sein des bétons à base de bois **[9,12 ,26].**

On voit donc que le bois est un matériau complexe aussi bien par sa composition que par sa morphologie. Son introduction comme granulats légers dans les bétons nécessite donc des précautions d'emploi et par suite des traitements divers.

I.6.4 Différents procédés de traitement des granulats de bois

Le but du traitement des granulats de bois est de les rendre inertes et stables afin d'éviter ces effets néfastes sur le béton de bois qui sont en générale l'effet de retardateur de prise et les instabilités dimensionnelles.

Les copeaux ont un aspect fibreux (**Fig. I.4**) très marqué.

Les canaux qui conduisent la sève confèrent à ce matériau une grande porosité communicant parl'intermédiaire d'orifices. Ceci conduit à un caractère fortement hygroscopique. De ce fait, lorsqu'ils sontintroduit en substitution des granulats dans la pâte de ciment, ils absorbent une grande partie de l'eau ce quicontrecarre la prise. Un traitement préalable de saturation en eau

des copeaux permet de pallier à ceproblème. Ils sont donc immergés pendant 24 heures, puis ressuyés sur un tamis avant d'être malaxés **[10].**

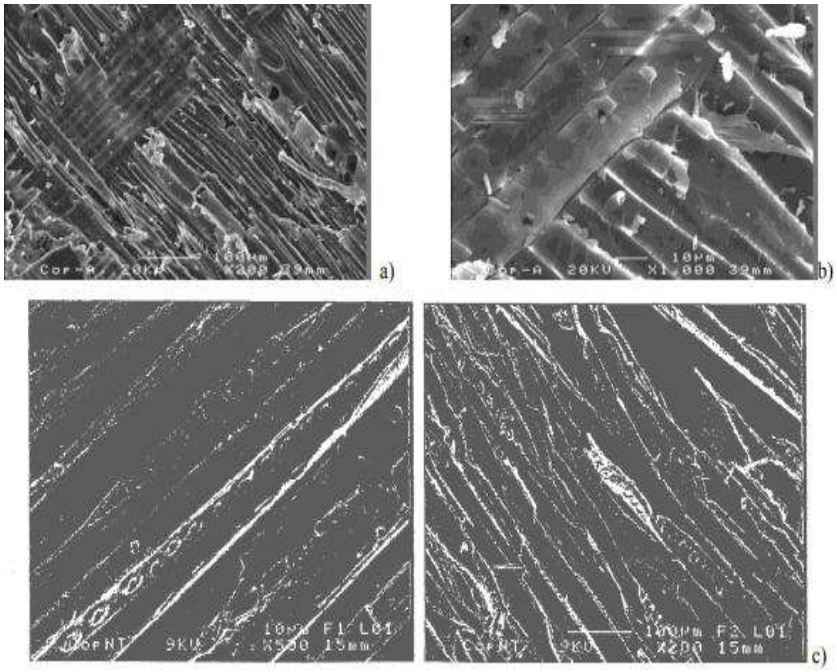


Figure I.4:Observations au MEB des copeaux de bois **[10]**

Il existe plusieurs types de traitements :

- **Traitement physique :**Ces traitements ont pour but de limiter les transferts d'eau avec le milieu extérieur et d'éviter la libération de sucres très néfastes à la prise ces traitements peuvent être réalisés par :
  - ✓ Imprégnation : il s'agit de remplir les vides cellulaires du bois au moyen de techniques d'imprégnation vide-pression. Des études réalisées ont montré que l'imprégnation à l'huile a permis de mettre en évidence le blocage de la libération des sucres néfaste à la prise du ciment **[9,12].**
  - ✓ L'enrobage superficiel : Il a pour but d'isoler le bois en le rendant inerte vis-à-vis aux agents extérieurs, on utilise dans ce procédé de la résine ou du chlorure de calcium qui s'avère le plus efficace ou d'une solution de soude **[9,19].**

Les traitements thermiques (par torréfaction) :

Il consiste à chauffer le bois par un gaz inerte jusqu'à une température de 280°C, ce qui provoque une dégradation des hémicelluloses **[23,24].**

• **L'auto hydrolyse:**L'auto hydrolyse du bois permet de solubiliser une grande partie des hémicelluloses responsables du gonflement. Le traitement à la chaux à 160°C sous pression pendant 15 heures conduit à une amélioration de la stabilité dimensionnelle de 40 à 60% **[9,11].**

- **Traitement chimique :**

Il s'agit de modifier la structure chimique du bois en remplaçant les groupements OH responsables de l'hygroscopicité par d'autres groupements plus hydrophobes, on utilise pour cela l'oxyde butylène qui diminue le gonflement de 50% et l'absorption d'eau de 25% **[9].**

Toutefois, même si les traitements sont plus ou moins efficaces, il faut toujours tenir compte des interfaces avec la matrice dans laquelle les granulats sont introduits **[22].**

Plusieurs procédés de traitement ont été employés afin d'améliorer les propriétés physicomécaniques des bétons de bois. **Le tableau I.5**récapitule les différents résultats escomptés **[27]**

Tableau I.5 Influence du type de traitement des granulats de bois sur les propriétés physico mécaniques du béton de bois **[27].**

Traitement	Absorption des granulats (%)	Absorption du composite (%)	Densité sèche (kg/m^3)	Rc (MPa)	Rf (MPa)	ΔL/L (mm/m)	λ ($w.m^{-1}.K^{-1}$)
Sans traitement	240	49	0.85	8.9	3.8	3.5	0.22
Bouillonner dans	112	34	0.85	9.7	4	2.00	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	79	20	1.20	12.6	4.8	1	0.28
Traitement à l'huile de lin	42	22	1.00	8.5	2.9	2.20	0.25

Valeur médiocre

Valeur optimale

- **Les composites de bois**

Les matrices utilisées dans les compositions des bétons de bois peuvent être à base:

- ✓ de ciment.
- ✓ de plâtre
- ✓ de chaux.
- ✓ dans des études récentes, certains auteurs utilisent des matrices argileuses stabilisées au ciment, les déchets argileux sont introduits dans les bétons à la place du sable siliceux. Ils montrent qu'avec une quantité faible de ciment on atteint des résistances mécaniques suffisantes et des performances thermiques excellentes sans quelles soient pas altérées par le caractère hygroscopique de l'argile **[27,28]**

Liaison matrice – granulats de bois :

L'action liante du ciment est influencée par la nature du granulat. On suppose en générale que cette liaison est régie à la fois par les paramètres physiques et chimiques, en effet, elle dépend de la pénétration du mélange matriciel dans les pores du bois

En fin, en milieu aqueux des mécanismes de migration peuvent s'installer entre le granulat de bois et le milieu matriciel, tant que celui-ci n'a pas fait sa prise. La cellulose qui est insoluble et en raison de son caractère cristallin ne réagit pas avec le ciment, au contraire les hémicelluloses non cristallines passent facilement en solution, elles réagissent par des réactions complexes avec les ions métalliques et donnent des acides sacchariques et des gluconates de calcium **[9, 12,27].**

I.7 Influence de bois sur les propriétés physique et mécanique du béton

Quelques propriétés physiques et mécaniques ont été établies à travers plusieurs études menées dans le cadre de travaux de recherche ou au niveau de laboratoires spécialisés. Nous allons établir dans ce qui suit quelques propriétés du béton de bois.

I.7.1Masse volumique

Si les bétons légers ont une masse volumique inférieur à 1800 kg/m^3 , celle des bétons de bois oscille entre 450 et 1200 kg/m3 **[9,12,29].**

Les valeurs comprises entre 600 à 900 kg/m3 correspondent d'après **[23]** à la fourchette raisonnable. Sachant qu'au delà de 900kg/m3 les performances thermiques diminuent considérablement et qu'en dessous de 600 kg/m3 , la résistance mécanique se trouve nettement diminuée**[30].**

A.Bouguerra et al [28] ont élaboré un béton de bois à matrice argileuse, l'étude de la variation de la densité sèche en fonction de la teneur massique en bois comme le montre **la figure I.5** indique une diminution de la masse volumique lorsque le dosage massique en bois augmente.

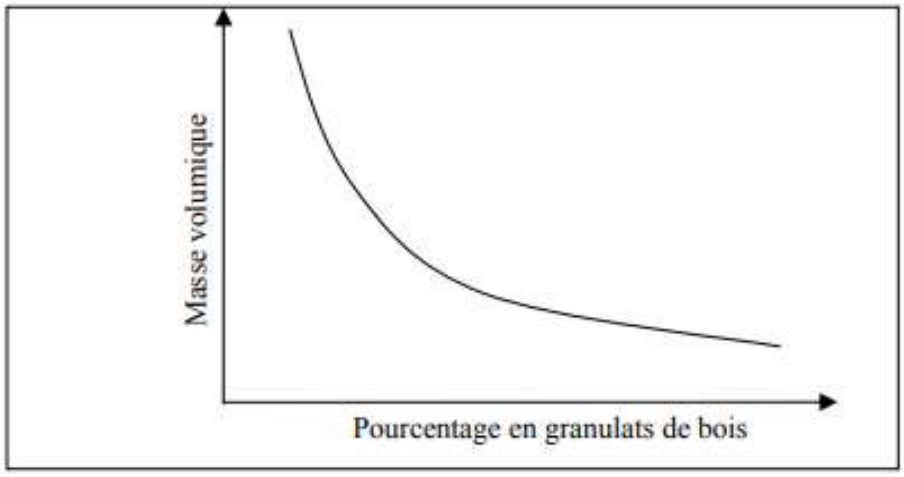


Figure I.5 Evolution de la densité sèche en fonction de la teneur massique en bois **[28].**

I.7.2Résistance à la compression

La résistance mécanique des bétons de bois peut être apprécier en se référant à la Norme **NFP 14-304 [31].**

La résistance mécanique en compression des bétons de bois est comprise entre 0.5 et 7MPa **[1, 9,12]**, bien entendu cette résistance peut être améliorer par des ajouts tels que la fumée de silice, ou par traitement des granulats de bois. Toutes les études réalisées sur les bétons de bois ont montré que la résistance à la compression diminue en fonction du dosage en granulats de bois. La résistance à la compression est liée à la densité du matériau puisque celle-ci est en relation avec le dosage en granulats. En effet, d'après **A.Sarja [32]** et comme le montre **la figure I.8**, la résistance évolue en fonction de la densité. Plus le matériau est dense, plus il est résistant.

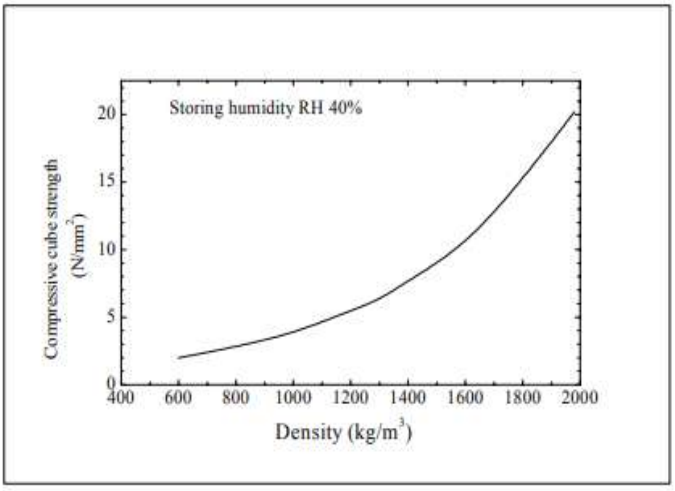
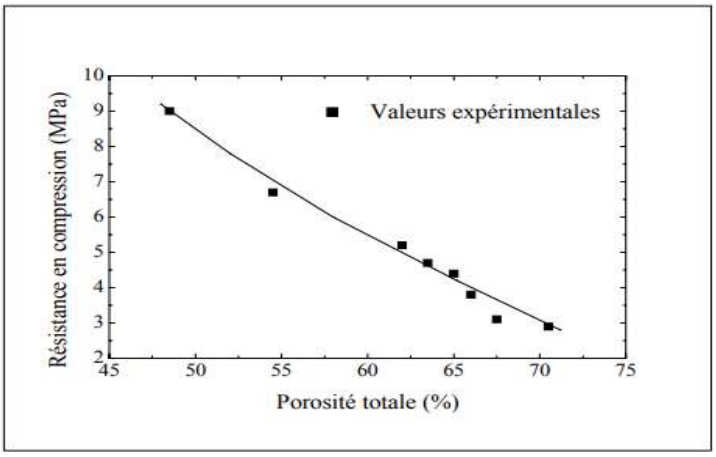


Figure I.6 Variation de la résistance à la compression du béton de bois en fonction de la densité **[32].**

La résistance à la compression est aussi liée à la porosité du béton, plus la porosité augmente, plus la résistance diminue. A titre bibliographique les résultats de **Bouguerra et al[28]** représenté en **figure I.7** confirment cet aspect.



FigureI.7 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité **[24]**

I.7.3 Résistance à la traction

Identiquement à la résistance à la compression, la résistance à la traction dépend de plusieurs facteurs, selon le type de granulats de bois utilisés et leur dosage, selon que ces granulats soient traités ou non, selon le dosage en ciment, elle peut atteindre une valeur 5.5 MPa en utilisant des granulats traités ou en introduisant des ajouts comme la fumée de silice ou par incorporation des fines .

Pour des bétons de bois ordinaires elle atteint des valeurs de 2.6 MPa**[28, 29,32].**

La résistance à la flexion diminue lorsque la densité diminue, c'est ce que confirme **A.Sarja [32]**, comme le montre la **figure I.10**. C'est en générale le cas des bétons de

bois à matrice cimentaire. Cela n'est pas le cas des matrices à base d'argile. En effet, **A.Ledhem [27]** en étudiant un composite argile-ciment-bois a montré l'existence d'un optimum, c'est à dire que pour des dosages faibles en granulats, la résistance à la flexion augmente jusqu'à atteindre un maximum puis diminue pour des dosages élevés en granulats, comme le montre **la figure I.11**

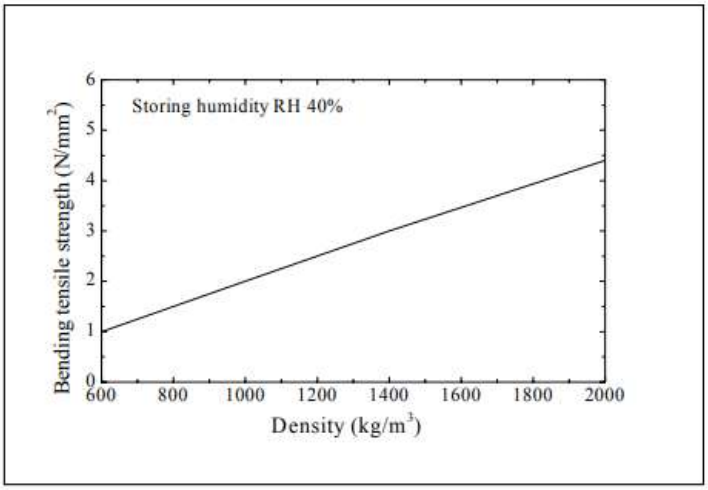


Figure I.8 Résistance à la traction en fonction de la densité **[32]**

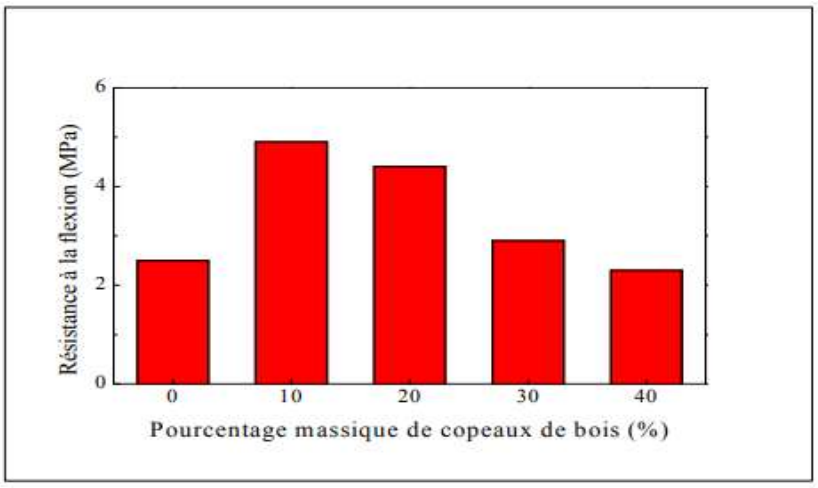


Figure I.9influence du pourcentage massique de copeaux de bois sur la résistance à la flexion **[12].**

I.7.4 Module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons de bois est lié à celui du granulat, pour un type de granulat donné, il est fonction de la densité (ρ_b) de bois **A.Sarja [32]** propose une relation de la forme :

$E_c=1500\ (\frac{\rho b}{1000})4$..... **(I.2)**

La figure I.10 montre les variations du module d'élasticité du béton de bois en fonction de la masse volumique, on voit que ce paramètre varie entre 400 et 20000 N/m^2

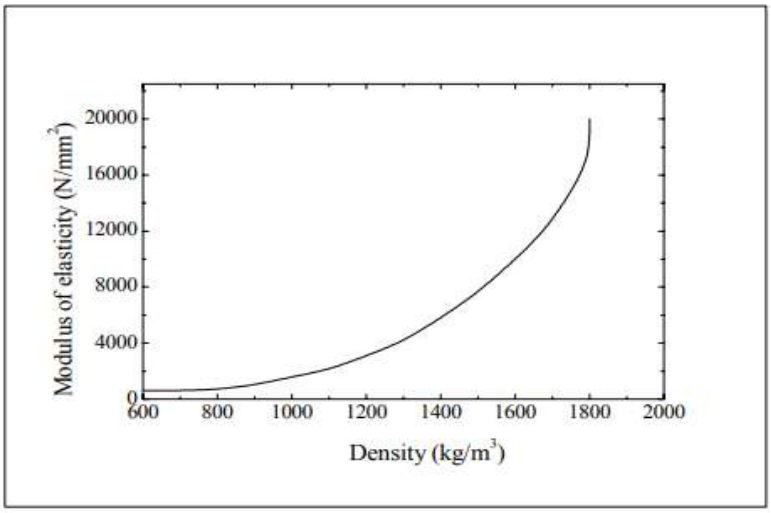


Figure I.10 Variation du module d'élasticité du béton de bois en fonction de la densité **[32].**

I.7.5 Isolation thermique

La conductivité thermique des bétons de bois varie entre 0.10 à 0.30 $W.m^{-1}.K^{-1}$**[9,26],** elle est de ce fait comparable à celle des bétons caverneux ou semi caverneux. Il est à noter que cette conductivité varie selon le taux d'humidité du matériau, elle peut être estimé par la formule empirique:

$\lambda_{humide}= \lambda_{sec}\ (1+0.025\ \omega\ m)$……..(I.3)

Où ωm est le taux d'humidité exprimé en masse pour les bétons de bois **[9]**

La figure I.11 montre un exemple de la variation de la conductivité thermique en fonction de la proportion massique des granulats de bois pour un béton de bois à matrice argileuse. On voit bien que celle ci diminue lorsque la proportion massique en bois augmente.

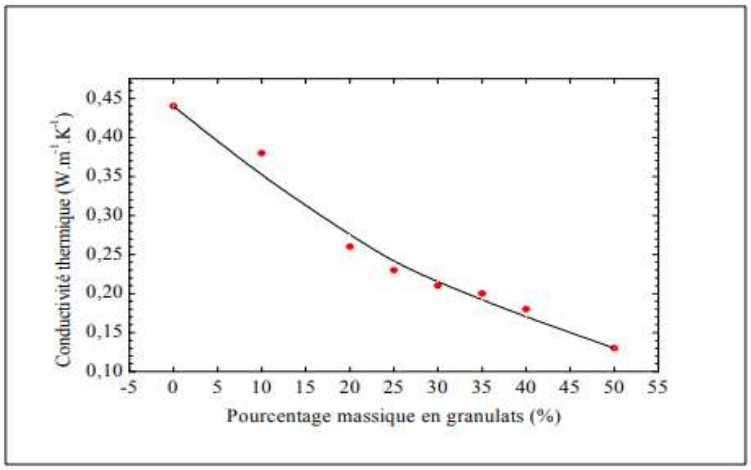


Figure I.11 Variation de la conductivité thermique en fonction de la porosité **[33].**

Les bétons de bois sont parmi les matériaux reconnus par leurs performances thermiques liées à une conductivité thermique faible. **Le tableau I-6** donne à titre indicatif les valeurs des conductivités thermiques et les masses volumiques de quelques matériaux.

Tableau I-6 conductivités thermiques des différents types de béton légers **[16, 28,34]**

Matériaux	Masse volumique (kg/m^3)	Conductivité thermique ($w.m^{-1}.K^{-1}$)
Béton de bois	700	0.15
Plâtre	1060	0.36
Béton cellulaire autoclave	500	0.18
Béton de perlite	600 à 650	0.24 à 0.29
Béton polystyrène	400 à 1000	0.15 à 0.45
Béton de Mouse	400 à 1000	0.15 à 0.30
Béton de vermiculite	400 à 450	0.21 à 0.24

• Variations dimensionnelles:

C'est un paramètre important qui peut affecter la durabilité des matériaux de construction, en générale le retrait et le gonflement sont des phénomènes susceptibles

d'entraîner des dégradations. Malheureusement le béton de bois est très reconnue par ces variations dimensionnelles qui peuvent atteindre les 10mm/m **[9].**

- **Influence des conditions climatiques sur les variations dimensionnelles:**

D'après les travaux de **A. Ledhem [27]** sur les variations dimensionnelles des bétons de bois à matrice argileuse en simulant différentes situations climatiques, il a mis en évidence le caractère représentatif des variations dimensionnelles extrêmes (différence entre les dimensions à l'état sec, et à l'état saturé) par rapport aux différents retrait et gonflement .Dans **la figure I.12** on peut voir l'évolution du retrait et du gonflement dans différentes ambiances, en fonction de l'age.

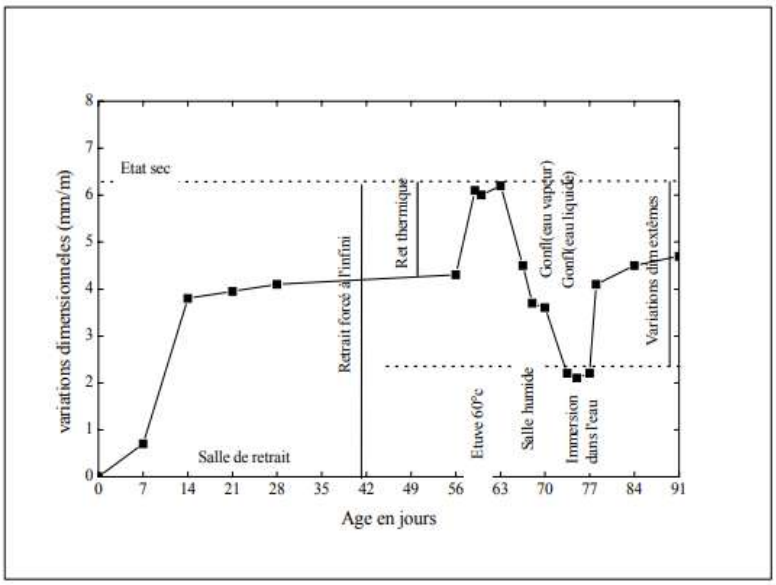
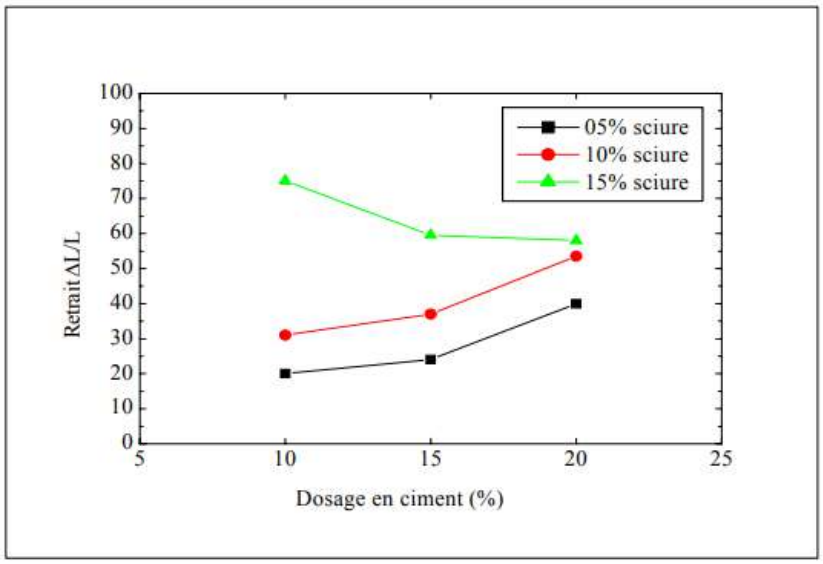


Figure I.12 Evolution des variations dimensionnelles dans différentes ambiances en fonction de l'age**[16].**

- **Influence des dosages en granulats et du ciment sur les variations dimensionnelles :**

Il est important de voir l'effet du pourcentage en granulats et du dosage en ciment sur l'évolution du retrait et du gonflement. D'après **F.Z.Aouadja et al [35],** qui ont étudié les variations du retrait dans un béton de bois. En se référant à leurs résultats représentés dans **les figures I.13**, on constate que le retrait augmente en fonction du dosage en ciment ce qui est le même cas qu'avec les bétons traditionnels et il augmente en fonction du dosage en granulats et c'est l'inverse du retrait des bétons traditionnels puisque le retrait du bois est en grande partie causé par celui des granulats.



FigureI.13 Variation du retrait du béton de bois en fonction du dosage en ciment **[35].**

Le tableau I.7 résume certaines caractéristiques des bétons de bois ainsi que les valeurs ciblées par la recherche.

Tableau I-7 Caractéristiques physicomécaniques des bétons de bois **[9]**

	Rc (MPa)	MVA (kg/m^3)	ΔL/L (%)	Réaction au feu	λ ($w.m^1.K^{-1}$)	Rt (MPa)	E (MPa)
Valeur cible aliment 2002	3.5-4	600-900	<1	/	/	/	/
NF P 14-304	2.5-7	<1700	<0.45	/	>0.16	0.5-1.16	/
NF P 14-306	3-7	400-800	<0.45	/	/	/	/
Règle d'agrément (1958)	>0.65	>450	L<12	/ /	/	/	/
Agresta	2.5-4 2.5-4	500-700 600-800 1250	4.5 1.37	M1	0.11-0.16	1.2-1.9	/
Mortier	2.2 7.8	730 1400	5.8 1	/	/	/	6500
Granuland mortier	3.3	800 700	4.9	/	0.22 0.15	/	1500
Fixolite	/	480	7	/	0.11-0.14	/	1500
Lithophore	>1.3	950	<0.9	/	0.27	/	/

- **Procédés utilisés pour améliorer les performances physiques et mécaniques des bétons de bois:**

  Beaucoup d'auteurs se sont lancés à la recherche de moyens dans le but d'améliorer les performances physiques et mécaniques des bétons de bois. Certains se sont intéressés à diminuer la porosité en utilisant des ajouts de fines (comme l'argile). D'autres ont cherché à améliorer les résistances mécaniques en utilisant des adjuvants comme la fumée de silice, ou en procédant au traitement des granulats. D'autres ont visé à limiter les variations dimensionnelles. Nous nous limiterons dans ce qui suit à l'influence des différents procédés de traitement des granulats de bois et l'effet de la fumée de silice sur les caractéristiques physico mécaniques.

• Influence de l'ajout de la fumée de silice sur les caractéristiques physico mécaniques des bétons de bois :

On peut penser que l'addition de certains produits apporte un certain nombre d'avantages : augmenter les propriétés mécaniques, produire un liant moins sensible à l'empoisonnement par le bois, diminuer l'alcalinité du milieux, réduire ainsi l'extraction des substances inhibitrices, modifier la structure du liant pour agir sur le retrait et le gonflement.

Des essais dans ce sens là ont été effectués sur différents produits d'addition (cendres volantes ; fumée de cilice et laitière de haut fourneau) **[9].** Si le laitier s'est montré sans effet, la fumée de silice par contre, permet des améliorations notables avec des bois jugés peu compatibles, la résistance à la compression peut ainsi passer de 8MPa à 15,5MPa. Les fumées de silices permettent également de limiter les variations dimensionnelles comme le montre **la figure I.14**où un minimum des variation dimensionnelles est obtenu pour un dosage en fumé de silice d'environ 30%.

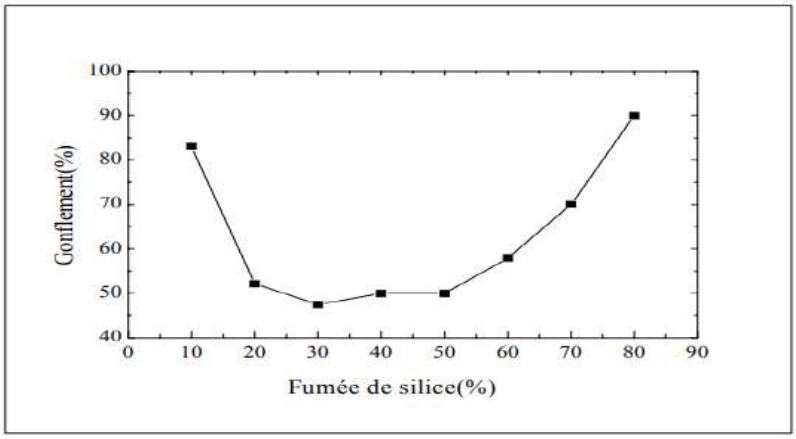


Figure I.14 Effet de la fumée de silice sur le gonflement **[9]**

I.8 Les bétons de granulats polystyrène

Le béton de polystyrène est un béton qui appartient à la classe des bétons de granulats légers. Il est généralement constitué de billes de polystyrène mélangées à une matrice à base de pâte de ciment, ou à base de mortier. Parfois pour un critère d'allégement le polystyrène est utilisé dans les bétons traditionnels en remplaçant une partie des granulats ordinaires par des billes de polystyrène **[2].**

I.8.1Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène

Le béton de polystyrène est un matériau utilisé très récemment, il présente beaucoup d'avantages sur le plan technique et économique:

• Il est ultra léger, sans doute parmi les bétons les plus légers.

• Il est reconnu par sa faible absorption d'eau.

• Il est durable.

• Il résiste aux agents agressifs.

• Il est très économique.

• Il est considéré parmi les matériaux qui possèdent les meilleures performances thermiques et phoniques.

En raison de ces performances physiques, le béton de polystyrène est largement utilisé dans le domaine de construction, on le retrouve dans les panneaux de revêtement, dans l'isolation des planchers et des blocs de béton porteurs ainsi que dans d'autres applications spécialisées comme les pavés et les constructions marines flottantes et dans la protection de structures militaires enterrées **[36]**

I.8.2 Définition des granulats de polystyrène

- **Origine et composition chimique :** Le polystyrène est un thermoplastique dur, c'est un polymère vinylique. Structurellement c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone, le polystyrène est fabriqué par polymérisation radicalaire à partir d'un manomètre styrène.
- **Fabrication du polystyrène expansé :** Le polystyrène brute est un matériaux plus on moins lourds il se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée en trois phases

1) La polymérisation du styrène additionnée d'agent porogène : le produit obtenu se présente sous forme de perles de polystyrène cristal contenant un porogène (pentane)

2) Le pré expansion des perles à l'aide de la vapeur (figure I.15a) : La température de la vapeur est supérieure à la température d'ébullition du pentane ce qui entraîne la formation de cellules dans les perles de polystyrène. Les billes obtenues sont constamment agitées afin d'éviter leur agglomération. Le produit final se présente sous forme de billes de polystyrène

contenant des cellules. Ces billes sont ensuite stockées dans des silos pour permettre l'évacuation de l'eau et l'équilibrage des pressions internes / externes.

3) Le moulage (**Fig I.15b) :** Les billes sont introduites dans un moule dans lequel est injectée de la vapeur d'eau sous pression. Les billes continuent alors leur expansion et se soudent entre elles. La quantité de billes introduites dans le moules détermine la densité finale du produit.

Le polystyrène comporte trois niveaux de structure

• Un agglomérat de billes soudées entre elles,

• Des billes composées de cellules

• Des cellules contenant un gaz (air et résidus de porogène).

Au vue des différents modes de fabrication, nous pouvons donc distinguer deux types de mousses : les mousses simples, formées uniquement de cellules et les mousses complexes, constituées de grains soudés entre eux **[37].**

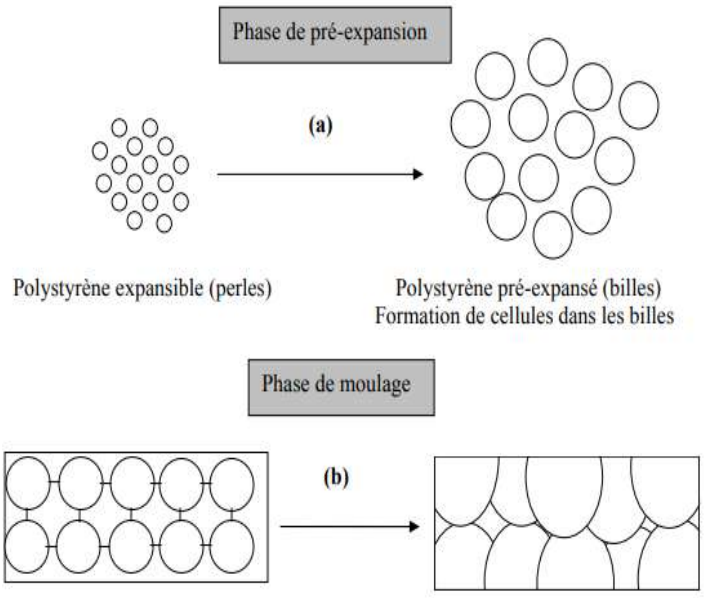


Figure I.15 Phase d'expansion et de moulage du polystyrène **[37].**

Selon le degré d'expansion les billes de polystyrène peuvent avoir différents diamètres, Ces diamètres peuvent varier de 0.4mm à 5mm **[38].**

I.9 Influence de polystyrène sur les propriétés physico- mécanique dubéton

I.9.1 Densité

La densité du polystyrène à l'état brut voisine les 1000 kg/m3 **[38].** Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m3 **[37].** Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé. Le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air. Par exemple pour une densité de 32 kg/m^3**[37],** le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé **[37].**

I.9.2 Résistance à la chaleur

Le polystyrène expansé se ramollit à une température de 90°c.

I.9.3 Absorption

Le polystyrène est un matériau de faible absorption, elle est de 0.2 à 1.g par100.cm^3 **[38].**

I.9.4 Résistance en compression du polystyrène

La résistance à la compression du polystyrène dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense plus sa résistance est grande, mais à cause de sa flexibilité le polystyrène se comporte d'une manière assez complexe, en effet plusieurs travaux issus de la littérature, montrent que selon la nature du polymère constituant la mousse, le comportement de celle-ci ainsi que la nature des trois phases peuvent varier notablement. Les auteurs distinguent trois mousses : élastoplastique, élastomère et fragile **[37].**

- ✓ La phase élastique linéaire ou non, correspond à la compression de la phase gazeuse.
- ✓ La phase plastique, constituée d'un plateau de contrainte, correspondant à l'endommagement de la mousse. Cette phase est caractérisée par une contrainte seuil σ el à partir de laquelle les déformations sont considérées irréversibles. La figure I.45 illustre le comportement d'une mousse élastomère.
- ✓ La phase de densification du matériau correspond à la compression de la matrice de polymère et donc à l'entassement des cellules par expulsion totale de l'air qu'elles contiennent **[37].**

Dans **Le tableau I.8** quelques valeurs de la résistance en compression du polystyrène expansé selon sa densité et pour une déformation de 10% selon la norme NF-T56-201 **[37].**

Tableau I-8 Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité **[37].**

Référence	ClasseQ1	ClasseQ2	ClasseQ3	ClasseQ4	ClasseQ5
Masse volumique (kg/m^3)	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

I.9.5 Conductivité thermique

Le polystyrène est un matériau très réputé par ces performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5cm entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0.027 à 0.037 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux **[2].**

- **Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène**

  - ✓ **Densité :** la densité des bétons de polystyrène varie selon le dosage en polystyrène, elle varie dans la gamme 300-2000 kg/m3 **[39].**
  - ✓ **Résistance à la compression :** La résistance à la compression des bétons de polystyrène est fonction du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 0.2 et 23 MPa**[39,40].**
  - ✓ **Résistance à la traction :** elle varie entre 0.1 et 2.4MPa. Elle peut être améliorée par incorporation de fibres tels que les fibres en acier **[39,40].**
  - ✓ **Retrait :** Variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1.2mm/m **[41].**
  - ✓ **Conductivité thermique :** Les bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant, leur faible conductivité thermique comprise entre 0.05 à 0.12 $W.m^{-}$

$^{1}.K^{-1}$ pour les bétons de construction en témoignent cette propriété. Elle varie en fonction de la densité du béton.

Dans **Le tableau I.9** quelques valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche.

Tableau I-9 Conductivité thermique des bétons de polystyrène **[40].**

Masse volumique sèche ρa (kg/m^3)	300	500	700	900	1200	1500
Conductivité thermique λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0.065	0.14	0.15	0.33	0.39	0.7

- ✓ **Résistance au feu:**Vue que le polystyrène fusionnent à des températures assez basses, l'exposition du béton de polystyrène à des températures supérieures à 90°C engendre la fusion des granulats de polystyrène et par conséquent l'obtention d'un béton caverneux **[2].**

A cause du manque considérable de la littérature sur les bétons de polystyrène nous nous contentons d'exposer dans ce qui suit un certain nombre de travaux réalisés dans ce domaine :

• **J.M.Chaix et al [40],** Ont élaboré un Béton Léger Isolant Thermique (B.L.I.T) constitué de billes de polystyrène expansé dispersées dans une matrice de ciment. Leur étude a porté sur l'effet du dosage en ciment (du type HP 45) et de la dimension des billes sur les caractéristiques physiques et thermiques du BLIT. Pour cela des séries d'échantillons ont été réalisés en utilisant un rapport E/C égale à 0.42. Un échantillon correspondant à un dosage en polystyrène nul est pris comme référence.

Trois séries d'échantillons sont réalisées, une première série réalisée avec des petites billes de diamètre 2mm ; une deuxième série est réalisée avec des grosses billes de 5mm de diamètre ; une troisième série est réalisée avec un mélange des deux diamètres.

- ➢ **Effet du dosage en billes de polystyrène**

L'effet du dosage en polystyrène est remarquable sur les caractéristiques physicomécaniques et thermiques, et pour les trois séries d'échantillons. En effet en se référant au **Tableau I.10** on voit que la densité du BLIT décroît en fonction du dosage de polystyrène (rapport de volume du polystyrène au volume du ciment).

Tableau I-10 Valeurs des conductivités du BLIT en fonction du dosage en Polystyrène **[40]**

Composition		1	2	3	4	5	6	7
Dosage Vp/Vc		0.7	1.12	1.46	1.7	1.9	4	5.12
Densité (kg/m^3)	Série 1	1	0.82	0.68	0.56	0.35	-	0.2
	Série 2	1	0.85	0.77	0.56	0.34	-	0.19
	Série 3	0.94	0.87	0.68	0.55	0.35	-	0.19

D'autre part la granulométrie du polystyrène n'a pratiquement pas d'effet sur la densité apparente.

Pour les caractéristiques mécaniques (résistance à la compression et module d' Young), la granulométrie à un effet légèrement significatif, cette fois ci remarquable.

Tableau I-11 Valeurs des modules d'Young du BLIT en fonction du dosage en Polystyrène

Composition		1	2	3	4	5	6	7
Dosage Vp/Vc		0.7	1.12	1.46	1.7	1.9	4	5.12
Module d'Young (MPa)	Série 1	341	242	206	139	52	31	26
	Série 2	326	243	206	144	50	38	38
	Série 3	340	245	207	173	70	33	18

B.Chen et J.Liu**[39]** ont étudié les propriétés d'un béton léger à base de billes de polystyrène renforcé de fibre d'acier. Le béton étant un béton de granulats léger de granite où une partie de ces granulats a été remplacée par un volume de billes de polystyrène. De la fumée de silice

a été utilisée afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques. En fin un super plastifiant est utilisé pour améliorer la maniabilité du béton. La matrice est composée de ciment et de sable de module de finesse égal à 2.85. Deux types de billes de polystyrène sont utilisés : type A des billes de diamètre 3mm et de densité 20kg/m3 , type B des billes de diamètre 8mm. Deux séries d'échantillons ont été réalisées selon les proportions représentées dans **le tableau I.12**

Tableau I-12 Détail de la composition du béton de polystyrène contenant des fibres d'acier **[39].**

Série	N=°de gâché	Ciment ($kg/m^{3)}$	Fumé de silice	Eau (kg/m^3)	Gravier (Kg/m^3)	Sable (Kg/m^3)	EPS (Kg/m^3)		%Volume En EPS	Fibre d'acier	S-Plast
							Type A	Type B			
Série1	1	472	-	175	1133	620	-	-	-	-	4.0
	2	472	-	175	710	392	1.75	0.74	25	-	4.2
	3	472	-	175	710	392	1.75	0.74	25	70	4.2
	4	472	-	175	455	255	2.80	2.21	40	-	4.5
	5	472	-	175	455	255	2.80	2.21	40	70	4.5
	6	472	-	175	201	118	3.85	3.03	55	-	5.1
	7	472	-	175	201	118	3.85	3.03	55	0	5.1
Série2	8	472	10	175	1133	620	-	-	-	70	4.0
	9	472	10	175	710	292	1.75	0.74	25	0	4.2
	10	472	10	175	710	292	1.75	0.74	25	70	4.2
	11	472	10	175	455	255	2.80	2.21	40	0	4.5
	12	472	10	175	455	255	2.80	2.21	40	70	4.5
	13	472	10	175	201	118	3.85	3.03	55	0	5.1
	14	472	10	175	201	118	3.85	3.03	55	70	5.

Les résultats obtenus dans cette étude correspondants aux caractéristiques physicomécaniques des bétons élaborés sont représentés sur **les figures I.19, et I.20** relatives à :

• L'effet de l'ajout du fumé de silice sur la résistance à la compression.

• L'effet de l'ajout du fumé de silice sur la résistance à la flexion.

• Evolution du retrait en fonction de l'age selon les proportions volumiques en polystyrène.

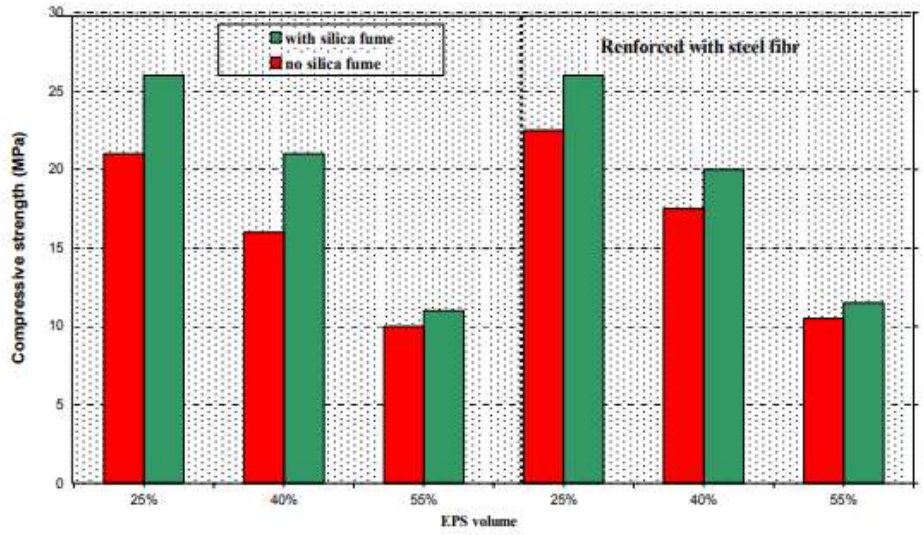


Figure I.16 Effet de la fumé de silice sur la résistance à la compression **[39].**

La figure I.16 montre d'une part : l'évolution de la résistance des bétons de polystyrène élaborés (avec fibres d'acier et sans fibres d'acier) en fonction de la proportion volumique en polystyrène. Et d'autre part l'effet de l'ajout de la fumée de silice sur la résistance à la compression et à partir de cette figure les interprétations suivantes ont été postulées :

- ✓ La résistance diminue en fonction de la proportion volumique en polystyrène.
- ✓ L'ajout de fumé de silice améliore la résistance à la compression, cette amélioration atteint un taux de 15% pour une proportion en volume de 25% en polystyrène. Lorsque cette proportion atteint les 55% ; cette amélioration n'est que de 8%.
- ✓ Le renforcement du béton de polystyrène avec des fibres d'acier améliore légèrement la résistance à la compression.

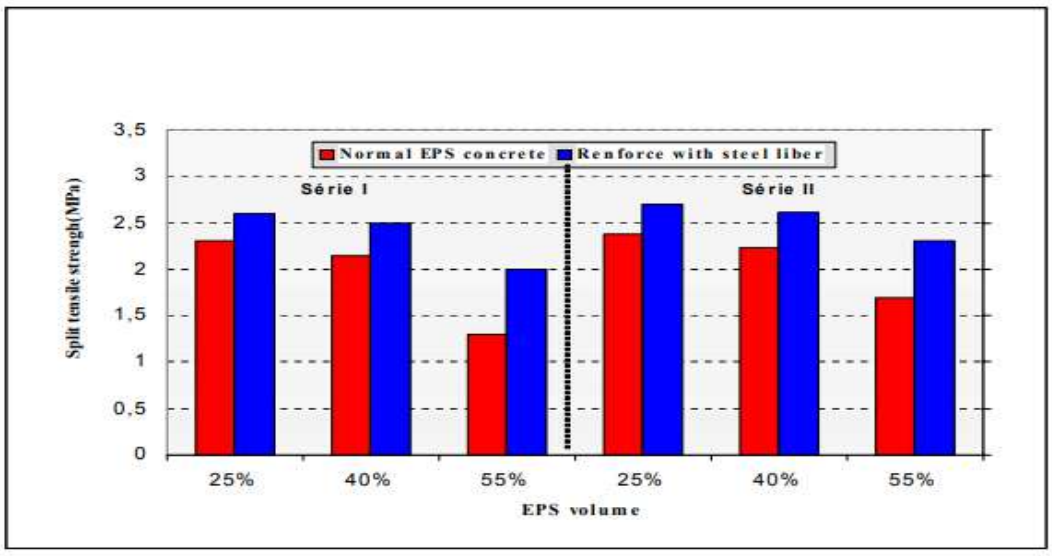


Figure I.20 Variation de la résistance à la flexion en fonction de la proportion volumique en EPS **[39].**

La figure I.20 montre les variations de la résistance à la flexion en fonction de la proportion en volume du polystyrène ainsi que l'effet de l'incorporation des fibres d'acier dans le béton de polystyrène. On peut constater la même chose que pour la résistance à la compression, la résistance à la flexion diminue en fonction de la proportion volumique. D'autre part l'incorporation de fibres d'acier améliore la résistance à la flexion avec un taux de 25%. L'effet de la fumé de silice sur la résistance à la flexion et le même que pour la résistance à la compression mais avec un taux d'amélioration plus faible **[39].**

La figure I.21 représente l'évolution du retrait du béton élaboré en fonction de l'age. Deux facteurs affectent le retrait, le premier est la résistance des granulats ou encore leur propriété élastique. Le deuxième est la proportion volumique de ces granulats dans le béton. En effet l'élasticité des granulats favorise le retrait, puisque les zones occupées par les granulats représentent des zones de faible résistance et par conséquent la contraction de la matrice tout autour est libre. D'autre part plus la proportion volumique de ces granulats est grande, plus ces zones sont nombreuses et plus le retrait est plus facile et par conséquent plus grand, ce qui très lisible sur **la figure I.21.**

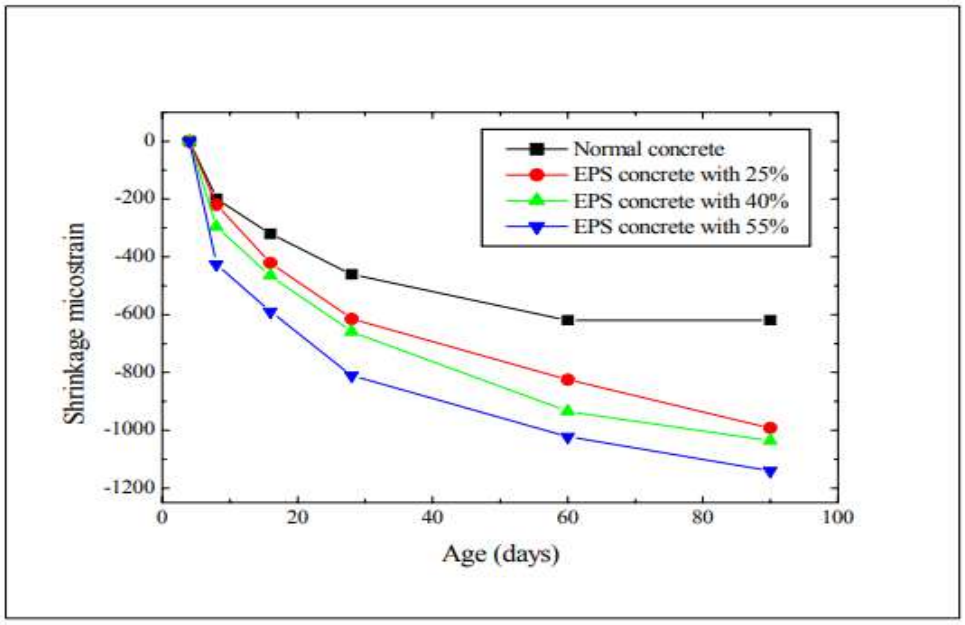


Figure I.21 Variation du retrait du béton de polystyrène en fonction du dosage en polystyrène **[39].**

I.10 Conclusion

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'influence notable du granulat léger en général et en particulier le polystyrène et le bois, objet de cette étude, sur les performances physico-mécaniques du béton léger et son utilité dans la construction. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module d"élasticité et la résistance du béton. La masse volumique du béton peut varier d"un peu plus de 300 à environ 1800 kg/m^3 et la résistance correspondante de 0,3 à 70 MPa**[4]** De plus, les bétons de polystyrène et le bois sont caractérisés par leur pouvoir isolant avec leur faible conductivité thermique et pouvant descendre jusqu"à 0.02 W.m-^{1}K^{-1}**[4]**

CHAPITRE II:

Béton de sable

II.1Introduction

L'Algérie a connu une évolution considérable dans le domaine de la construction du bâtiment et de travaux publics durant la dernière décennie.De ce fait, il y a un développement colossal concernant la demande et la consommation des granulats **[42].**

Les gros granulats sont abondants, peu disponibles et coûteux en raison de leur transportation d'autres régions surtout dans le sud de notre pays. Une exploitation rationnelle des agrégats dont disposent le pays et une valorisation des ressources existantes s'imposent : sable de dunes et sable alluvionnaire **[43].**

Dans ce chapitre nous présenterons un aperçu général sur les bétons de sable, oùnous allons exposer d'abordl'historique ainsi que leur définition et la différence entre les BS et les mortiers. Ensuite, nousaborderons une description des constituants entrant dans la fabrication. Finalement, nous évoquerons les différentes méthodes de formulation utilisées.

II.2 Généralités sur les bétons de sable

II.2.1 Historique des bétons de sable

Le béton de sable est un matériau très ancien, utilisé bien antérieurement au béton traditionnel d'aujourd'hui. Il trouve ses origines dans l'antiquité ; car il y a plus de deux mille ans, les romains constataient que s'ils mélangeaient du sable d'origine volcanique à la chaux vive ils obtenaient des matériaux très résistants. Ils l'utilisèrent pour la construction de grands monuments qui sont témoins de la résistance et la durabilité des matériaux composites de l'histoire des techniques industrielles.

En Union Soviétique, le béton de sable estune méthode connue depuis très longtemps. A l'origine, son amplification tenait à l'absence de granulats dans de nombreuses régions de ce pays, il était même préféré au béton traditionnel dans certains emplois; en particulier, les travaux de réhabilitation par projection tels les ponts, les bâtiments, les silos, les égouts, etc.

Mais, l'utilisation du béton de sable proprement dit, et à grande échelle, a commencé en France à la deuxième moitié duXIX^{ème} siècle, c'est à dire au début du développement du ciment armé**[36].**

En 1853, l'ingénieur François COIGNET a conçu ce qu'il appelait le béton aggloméré.Il s'agissait notamment d'un mélange sans caillou, de cendres de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible

quantité;afin de réaliser plusieurs ouvrages. Ceux-ci constituent les premières applications de cette technique dont certains sont encore en service**.**

En 1869, le phare de Port-Saïd en Égypte de 52 mètres de hauteur fut construit en béton de sable de plage avoisinante et chaux importée de France (**voire FigureII.1**).Cette fois le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontainebleu et une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciment) et de 0,5 part d'eau ; ce qui convient à un dosage en liant de 400 kg/m3; très proche du dosage du béton de sable que de celui des mortiers **[44].**



Figure II.1. Phare de port Saïd réalisé en béton aggloméré Coignet (Egypte) **[44]**

François COIGNET exporta sa technique jusqu'aux USA et c'est à New York que sonentreprise (New York and long Island Coignet stone compagny) construit vers les années 1871 et 1872 le pont de Brooklyn en blocs de béton aggloméré.

Les possibilités qu'offrait ces matériaux et vu la rareté des agrégats en URSS; cette technique a été utilisée à grande échelle et ceci suite aux travaux effectués par le comte Nicolas de Rochefort en 1918. Par ailleurs, son utilisation était stagnée durant les années vingt du XX^{ème} siècle jusqu'à la deuxième guerre mondiale où elle est devenue, à cette époque, d'actualité **[36].**

En effet, les Russes fondent des pistes aéronautiques et composantes du génie civil en béton de sable où ils ont étendu une démarche de formulation et de mise en œuvre dans la préfabrication et projection **[36].**

Dans les années soixante dix, notamment en France, un réel regain d'intérêt s'est manifesté en faveur du béton de sable.Ensuite, à partir des années quatre vingt, suite aux succès des premières applications de ce béton à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux, ils ont remarqué une répercussion auprès des autres organismes, que le béton de sable retrouve son grand intérêt au stade où on a assisté à la naissance d'un projet national appelé SABLOCRETE en 1988 **[42].**

En Algérie, malgré l'abondance de sable de dunes dans le sud du pays, ce matériau reste inconnu. Une tentative du CNERIB en 1988 a été vite abandonnée, et elle reste sans suite.Le même type de sable a été utilisé au Golf d'Arabie pour la construction de murs de soutènement et pour la préfabrication des dalles et plancher **[36].**

II.2.2 Définition du béton de sable

Selon la norme Française **A.F.N.O.R.NF P18 500** (juin 1995) **[45]**le béton de sable se définit ainsi :

Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau ; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s) et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons. Les ajouts (fibres, colorants,….) utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange. L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation « béton de sable » tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0,7 (G= gravillon ; S= sable) : « on parle alors de béton de sable chargé.

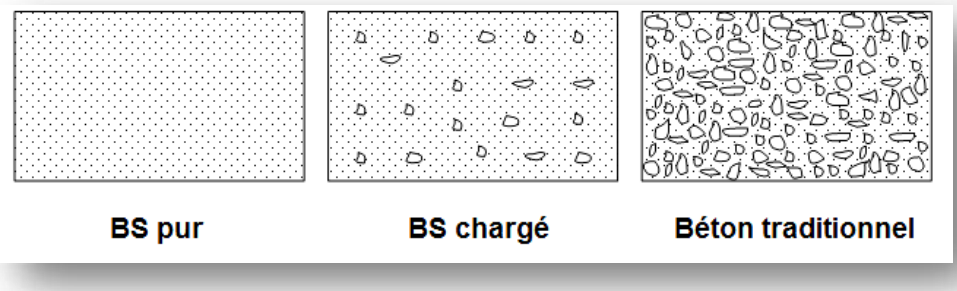


Figure II.2 Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel **[44]**

II.3 Constituants du béton de sable

II.3.1 Les sables

Les sables utilisables sont ceux identiques aux définitions des normes **NFP18-541[46]** (ES≥ 75 si le sable est roulé et ES≥ 65 s'il est broyé). Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/D. Aucun critère granulométrique n'est exigible à priori, la seule restriction d'emploi réside dans la propreté. Les sables de plage ou des dunes pourraient donc être utilisés**[47].**

II.3.2 Les ciments

Les ciments utilisés sont conformes à la norme **NFP15-301[48]**, ils sont utilisés comme liants hydrauliques, servent à combler les vides entre les grains de sable et jouent le rôle de fillers. Les dosages en ciments sont du même ordre d'ampleur que ceux des bétons classiques (entre 200 et 400 Kg/m3).Dans cette fourchette et pour un même usage que des bétons classiques, le dosage retenu pour le béton de sable est souvent plus haut ; dans la majorité des cas.

II.3.3 L'eau

L'eau est conforme à la norme **NFP18-303[49],** la proportion élevée d'éléments fins exige un volume de mouillage plus important, élevant le rapport E/C au-dessus de celui des bétons ordinaires.On utilise la valeur E/C la plus faible possible en augmentant la compacité et en utilisant des plastifiants tels les adjuvants réducteurs d'eau ; l'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers appropriés peuvent diminuer la quantité d'eau dans des proportions non négligeables.

II.3.4 Les fines d'ajouts

Les fines d'ajout notamment les fillers sont des matières minérales, naturelles ou artificielles, qui agissent par leur granulométrie (D<0.08 mm) sur la compacité du béton de sable. Ils sont employés pour combler les vides et élever la compacité du béton **[43].**

Les principaux paramètres qui jouent sur la compacité sont :

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau,
- L'énergie de mise en place**[44].**

Des fillers de dimensions majoritairement inférieures à 80 µm sont utilisés pour remplir les vides entre les grains de sable pourdiminuer la quantité de ciment. Leur rôle assure deux fonctions essentielles : l'une grossière de remplissage, l'autre d'ordre physico-chimique devant progresser l'enchevêtrement cristallin et la cohésion du mélange **[36].**

La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable.

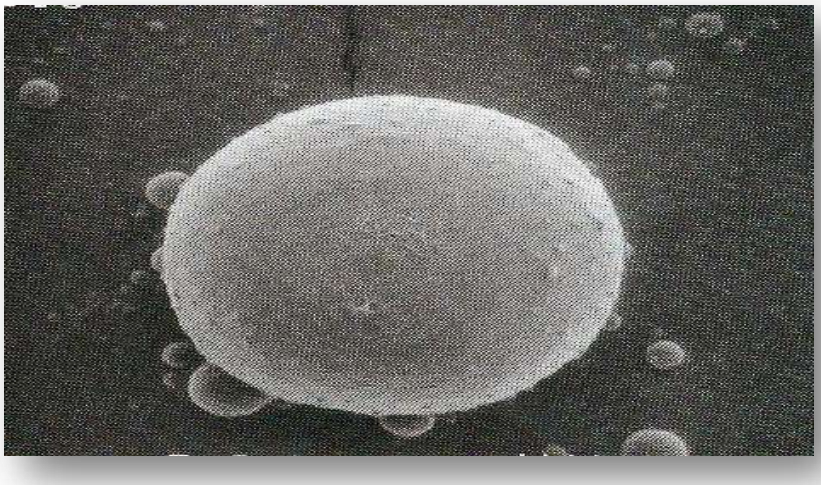


Figure II.3 Fines sphériques **[44]**

II.3.5 La fumée de silice(D)

La fumée de silice est un sous-produit des usines de fabrication d'alliage de silicium et de ferro-silicium obtenu dans un four à arc électrique à partir de quartz de grande pureté et de charbon .elle est constituée de particules très fines, environ 100 fois plus petite que les grains de ciment (SSB=2000 m^2 /kg) **[42].**

Cette jonction est une matière ultra fine (surface spécifique de l'ordre de 20 à 25 m^2/g), composée de particules sphériques de dioxyde de silicium amorphe, de diamètre moyen habituel de l'ordre de 0,1µm (**Figure II.4**). Il s'agit d'un coproduit, recueilli sur des filtres, du processus de fusion permettant de produire du silicium métal et des alliages de ferro-silicium.

La fumée de silice est un produit très réactif à cause de sa grande finesse et sa structure vitreuse **[43].**



Fig.II.4 Microstructure du fumé de silice (forme sphérique) **[43].**

L'utilisation de fumées de silice : à des dosages de 7 à 15% par rapport à la masse de ciment, permet au béton d'atteindre des résistances mécaniques élevées, et permet aussi d'avoir des bétons plus denses et plus imperméables, donc plus durable. Cependant, étant donné que le risque de retrait plastique est très élevé pour ce type de béton, la cure du béton doit être bien effectuée.

Par son effet filler et par la formation d'une phase liante, la fumée de silice participe donc à la consolidation des caractéristiques mécaniques du matériau durci. Les propriétés des interfaces pâte- granulat (zone de transition poreuse) en sont grandement améliorées : absence de cristaux de grandes dimensions et orientés, absence de concentration de fissures, meilleure cohésion et meilleure adhérence pâte-granulat. L'accroissement de la qualité des interfaces a un impact direct sur la microfissuration initiale et le processus de fissuration **[43].**

II.3.6 Cendres volantes

Ce sont des produits pulvérulents provenant du dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz brûlés des chaudières industrielles alimentées en charbon pulvérisé.

Totalement siliceuses, parfois calciques, elles ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques.

II.3.7 Laitier

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

Il existe deux types de laitiers :

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

II.3.8 Schistes calcinés (T)

Les schistes calcinés sont issue de roches sédimentaires ou métamorphiques obtenus à des températures de l'ordre de800° C .de plus, leurs propriétés pouzzolaniques exposent des caractéristiques hydrauliques lorsqu'ils sont finement broyés.

II.3.9 Pouzzolanes naturelles(Z)

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 [50] ,** la totalité des trois oxydes (SiO2+ Al_2O_3 +FeO_3) doit être supérieure à 70%. Grâce à leurs propriétés pouzzolaniques, elles ont la capacité de fixer la chaux à la température ambiante et à former des composés au caractère hydraulique pouvant faire prise et durci par hydratation.

Elle permet de progresser, la perméabilité des bétons aux ions chlores **(figureII.5)** et la résistance aux acides aux sulfates **[47].**

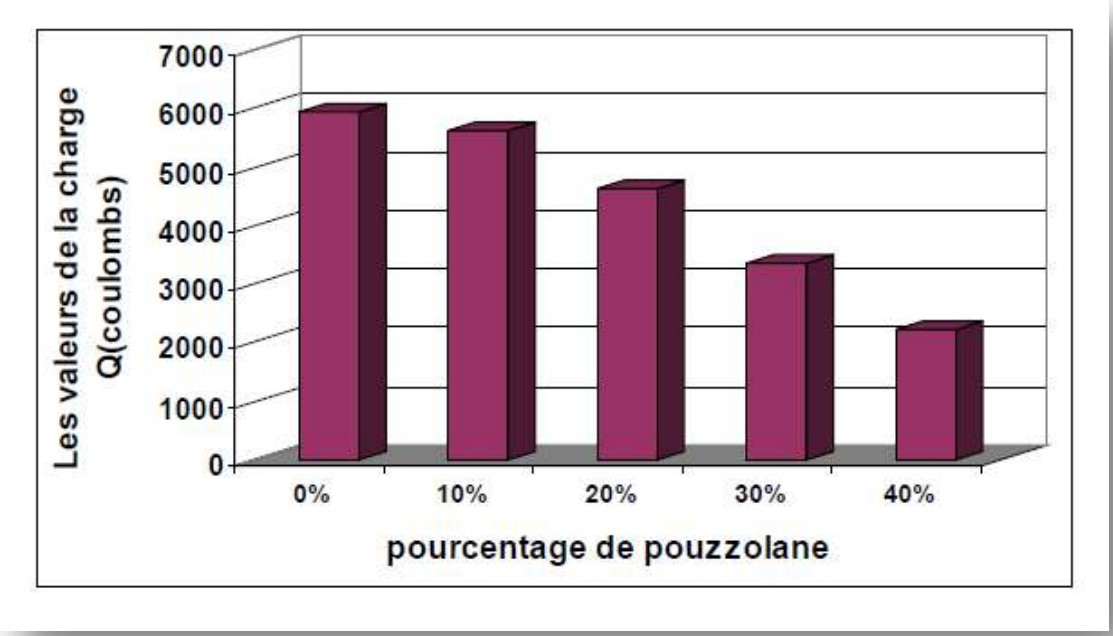


Figure II.5 perméabilité aux ions chlores des bétons à 28**[47].**

II.3.10 Les fillers calcaires(L)

Le fillers calcaire est un matériau à finesse presque identique du ciment dont le plus gros grain ne dépassant pas les 80 μm. Le fillers calcaire est considéré comme une pouzzolane puisqu'il n'est pas réactif et comme avantage, sa finesse peut être utilisée pour optimiser la granulométrie du béton. Les fillers ont d'excellentes affinités avec le ciment lui même de nature calcaire **[43].**

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

a. Ouvrabilité :

L'ouvrabilité est une qualité indispensable du béton, elle peut être définie comme la facilité proposée à sa mise en œuvre dans les ouvrages. Plusieurs appareils peuvent être utilisés pour mesurer l'ouvrabilité telle que le cône d'Abrams, l'essai d'étalement et le maniabilimétre LCPC **[42].**

Plusieursrecherches ont montré que l'incorporation des fillers calcaires ont un impact sur la maniabilité. Selon l'étude réalisée par Rabih Zaitri et al **[47],** en variant les pourcentage des filler dans le sable de concassage de 0, 5 , 10 , 15 , 20 et 25%. Ils ont remarqué que l'eau de gâchage est proportionnelle à l'élévation du pourcentage des fines calcaires , donc les

compositions BO5% et BO10% ,à l'exception de la composition BR 5% qui donne une ouvrabilité plastique **.**

b. Compacité

La compacité est une caractéristique essentielle qui influe sur les performances du béton. L'optimisation de la compacité relève d'une méthode visant à réduire la quantité d'eau à ajouter au mélange sec et à optimiser la teneur des ajouts **[51].**

Certains chercheures ont remarqué que l'incorporation des fines dans le mélange améliore la compacité par :

- **Effet granulaire :**un Béton de sable se diffère d'un béton traditionnel par sa granulométrie fine. Donc, la porosité dans le cas du BS est élevée et par conséquence le dosage nécessaire du ciment sera très important. L'utilisation du ciment seul n'est pas économique et en plus le BS ne sera finalement qu'un mortier.
- **Effet de l'addition des fines :** l'introduction de fines d'ajout est nécessaire dans le cas des BS. L'ajout de fines entraîne un perfectionnement de la compacité du squelette granulaire et améliore par conséquence la maniabilité du BS. (**La figure II.6)** montre l'effet de fillers calcaires sur la densité des sables sable alluvionnaire RS, sable de dune DS et le mélange RDS.

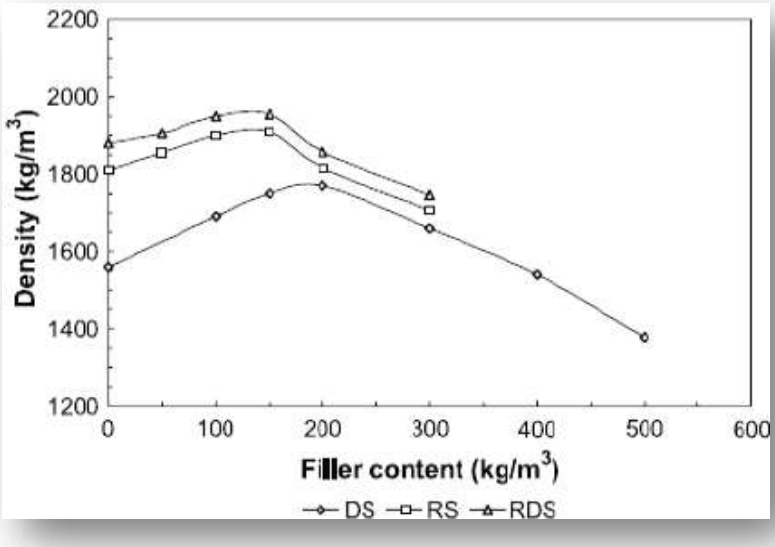


Figure II.6 Effet de fillers calcaire sur la densité des sables DS, RS et RDS **[43]**

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

- **Résistance à la compression**

L'introduction de l'addition calcaire mène à une densification de la matrice cimentaire. La mouture de ses particules, permet à ses grains de s'intercaler dans les pores crées par l'hydratation, entre les granulats et les produits d'hydratation, ce qui multiplie les liaisons microscopiques, développe l'adhérence granulat-matrice et par conséquent accroît la résistance des bétons étudiés aux fines calcaires **[47].**

La résistance à la compression du béton a été mesurée selon la norme **NF EN 12350-6 [52]** à l'aide d'une machine d'une capacité de 3000KN. Le test a été réalisé sur des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm aux échéances de 7, 28 et 90 jours. La valeur de résistance à la compression a été décidée comme étant la moyenne de trois essais sur éprouvettes cubiques.

On remarque aussi que l'analyse de l'évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés montre que les mélanges contenants 2.5% et 5% de fillers calcaire développent des résultats plus ou moins semblables à ceux du béton témoin à toutes les échéances. Ceci est dû essentiellement aux caractéristiques des fillers calcaires qui forment un noyau où se cristallise tout autour la portlandite (Soroka et al, 1977).Par conséquent, provoquer une accélération de l'hydratation des grains de ciment.Cependant, les mélanges contenants 7.5% et 10% des fillers calcaire accordent une moindre résistance par rapport au mélange de référence. Cette réduction de la résistance à la compression des mortiers à liant binaire s'explique par leur dosage en ciment Portland plus faible, qui induit une réduction de la production d'hydrates**[53].**

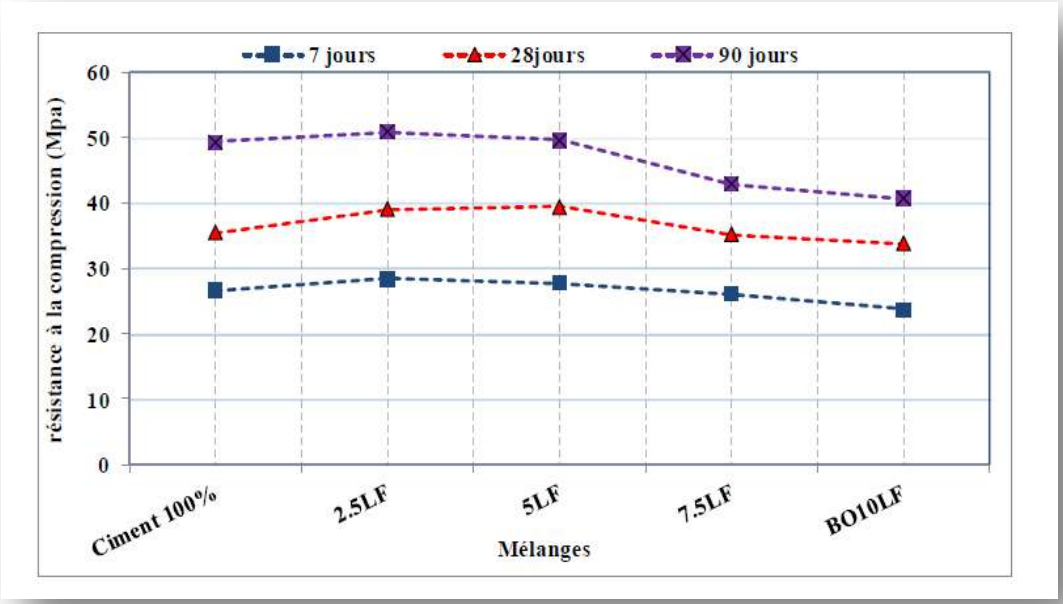


Figure II.7: Variation de la résistance à la compression des mélanges étudiés **[53]**

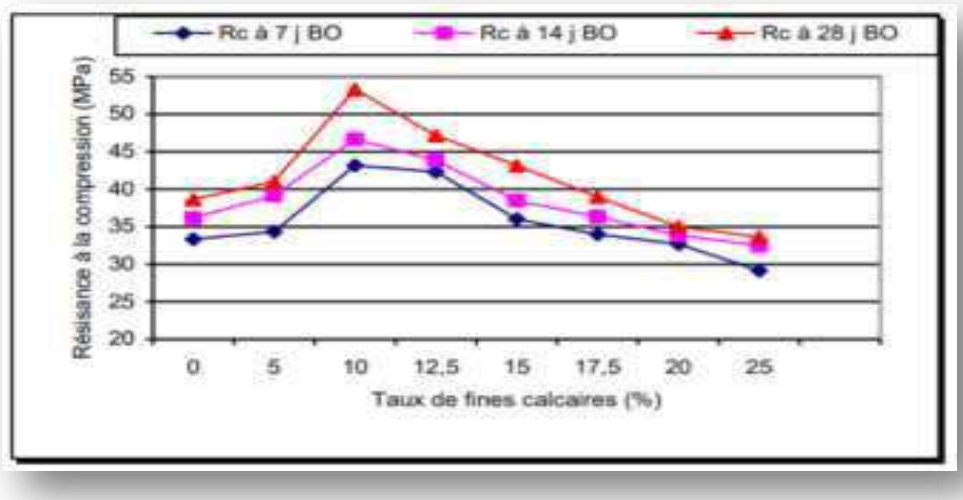


Figure II.8: Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires
En fonction du taux de calcaire **[47]**

II.3.11 Les adjuvants

Les adjuvants employés devront être conformes aux **normes NF P18-340 [54],** généralement on utilise des plastifiants ou super plastifiants dont l'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable en réduisant la quantité d'eau ce qui augmente les caractéristiques du béton. Ils ont un rôle essentiel dans la technique des bétons de sable. Ils défloculent les éléments fins et

admettent de limiter le dosage en eau; le rapport E/C dans les bétons de sable est plus élevé que dans les bétons traditionnels: diminuer ce rapport permet d'augmenter les performances et de réduire les dangers de retrait excessif **[44].**

D'autres adjuvants tels que les entraineurs d'air sont ajoutés pour créer un réseau de microbulles d'air qui assurent la protection du béton de sable vis-à-vis du gel et des fondants utilisés en période hivernale. Leur emploi est obligatoire dans les zones froides **[51].**

II.3.12 Les fibres (renfort de structure)

Les fibres composées de matière résistante à la traction sont additionnées afin d'obtenir un matériau doté d'une certaine résistance à la traction.

Elles sont surtout employées dans le but d'améliorer le comportement du béton aux jeunes âges ainsi que ses caractéristiques mécaniques. On utilise, dans le cas échéant, des fibres organiques comme le polyester et le polypropylène, métalliques, de végétaux, treillis, alvéolespour limiter les effets de retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Le dosage et la nature sont des paramètres très importants pour garantir l'efficacité de ces ajouts **[53].**

II.3.13 Les gravillons

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et prend la dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable **(figure II.9)**, et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même. Les gravillons utilisés doivent être adéquats aux spécifications de **la norme NFP 18- 541 [46].**

L'ajout de gravillons, en faible dosage, a pour objectif d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique **[51].**

En pratique, il est à signaler que le béton de sable que le rapport pondéral (G/ S) reste inférieur à 0,7, alors il est compris entre 1,4 et 1,7 pour les bétons traditionnels.

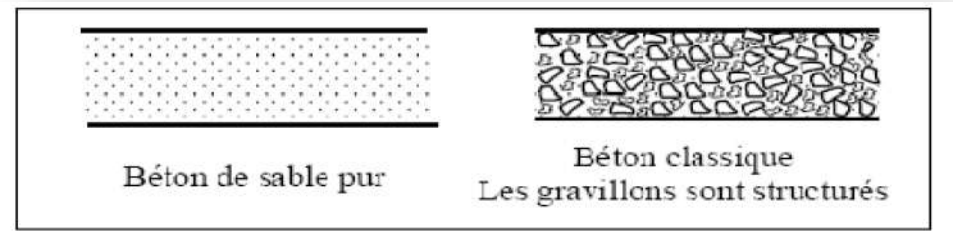
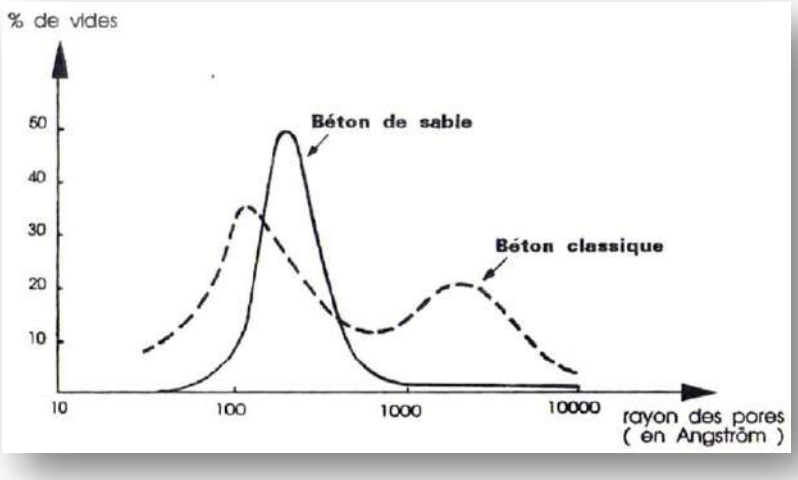


Figure II.9 Différence entre béton de sable et béton ordinaire [**44**]

II.4 Durabilité du béton de sable

Les paramètres tels que porosité, répartition géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels.

Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Cette distribution poreuse particulière contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis à vis des essais de durabilités **[51].**



FigureII.10: Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores **[44]**

II.5 Comportement mécanique du béton de sable

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques demeure un repère dans l'esprit des utilisateurs. Ainsi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montée en résistance est plus lente ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrages mis en

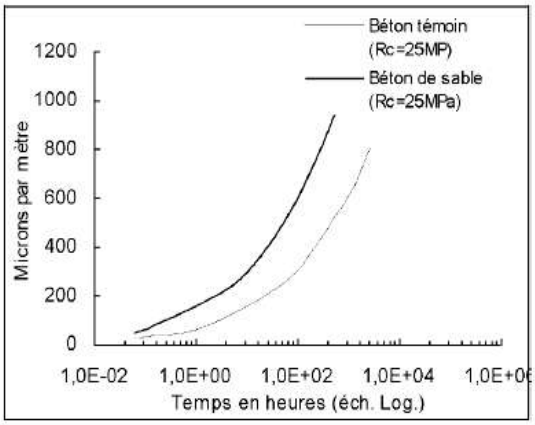
charge précocement.D'autre part, il est facile d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques [51]. Même à court terme. La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres tels que : la finesse des fines d'addition, la nature de fines d'addition, la dimension du D_{max}

II.6 Variations dimensionnelles du béton de sable

I1.6.1 Fluage

La cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable, alors que le fluage de dessiccation du béton de sable à une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importantes.

Les valeurs du fluage du béton de sable, sont deux fois que celles du béton ordinaire **(figures II.11 et II.12).**Ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25MPa.



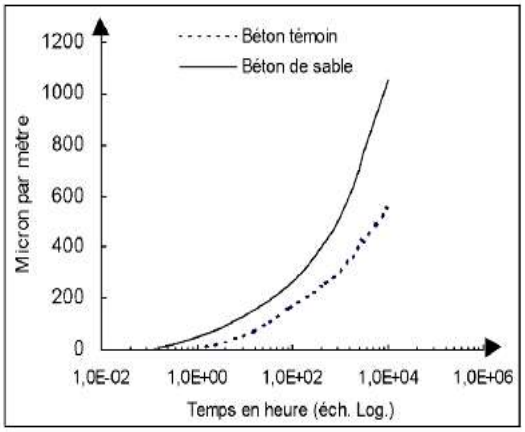
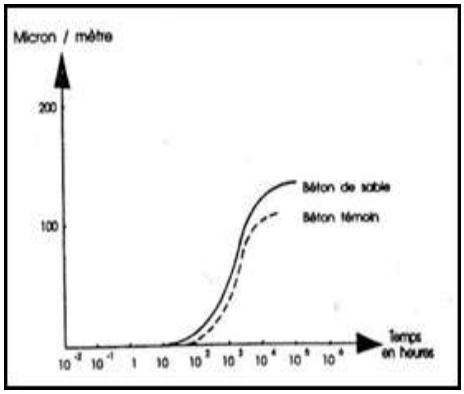


Figure II.11 fluage d'auto-dessiccation **[43]** **figure II.12F**luage total **[43]**

II.6.2 Retrait

Pour le béton de sable on distingue deux types de retrait :

- ✓ **Retrait de dessiccation :** un retrait d'auto dessiccation (retrait de séchage) a lieu en milieu ambiant et peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons.
- ✓ **Retrait endogène :**ce retrait est caractérisé par une cinétique semblable aux autres gammes de béton, une différence de l'ordre de 10% environ par rapport à ce dernier **[43].**



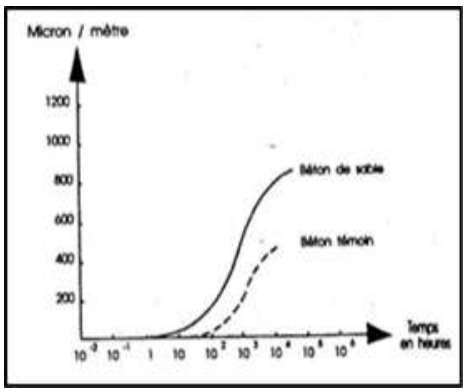
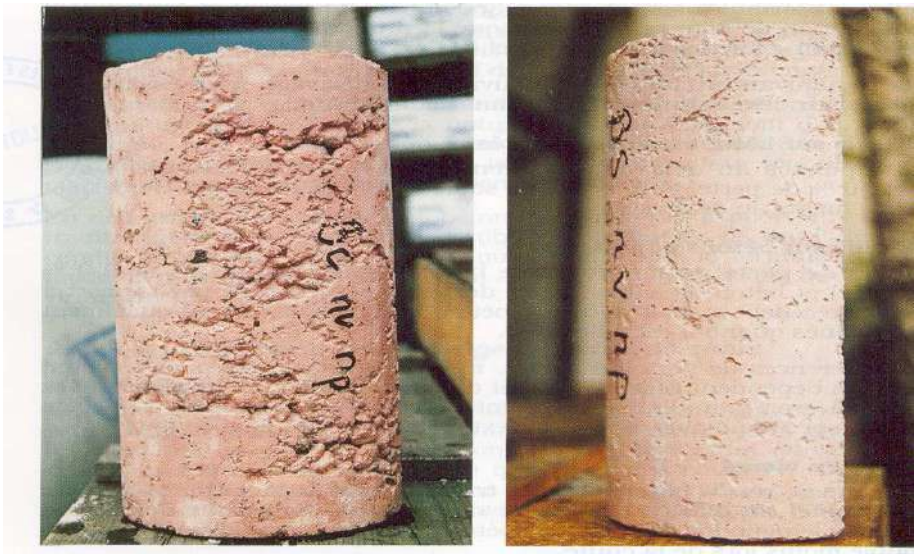


Figure II.13 Retrait total**[51]FigureII.14**Retrait d'auto dessiccation**[51]**

II.6.3 Phénomène de ségrégation des constituants

Les bétons de sable se caractérisent par une faible étendue granulométrique l'absence de gravillons, donc une plus grande homogénéité. A ces caractéristiques s'ajoute son excellente maniabilité ce qui lui garantit un comportement vis-à-vis du phénomène de ségrégation mieux que celui des bétons ordinaire**[53].**

La figure II.15 montre les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes coulées qui sont non vibrées et non piquées.Cette caractéristique réduit l'énergie de vibration nécessaire et peut être exploitée pour réduire le nombre de phases de bétonnage et donc les reprises.



a) Béton ordinaire b) Béton de sable

Figure II.15 Eprouvettes non vibrées non piquées **[53]**

II.7Domaines d'emploi des bétons de sable

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

II.7.1 Le béton de sable en bâtiment

Actuellement, dans plusieurs pays, le béton de sable prend sa place dans le secteur de bâtiment grâce à ses qualités notamment d'ouvrabilité. Son absence de ségrégation et principalement sans doute pour ses qualités d'aspect qui permettent d'avoir un aspect esthétique considérable comme le montre **la figure II.16.**



Figure II.16 Pièces présentant un bel aspect de surface, qualité de peau satiné et uniforme **[53]**

II.7.2 Le béton de sable dans la préfabrication

Le béton de sable est plus adapté à la préfabrication, on constate que les performances recherchées en préfabrication sont réunies dans le béton de sable tels la facilité en moulage, la montée en résistance, démoulage rapide et l'aspect de surface exceptionnel **[43].**

- **Ombrelles d'étanchéité**

  La finition du métro de Leningrad en Russie est assurée par la mise en place d'une ombrelle d'étanchéité **(Figure II.17)** ; il s'agit d'une voûte à caractère autoporteur constituée de plusieurs éléments (généralement trois) assemblés sur place et réalisés dans une usine de préfabrication (**Figure II.18).**

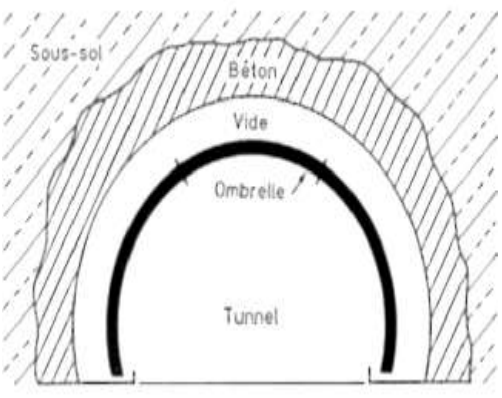




Figure II.17 Ombrelles d'étanchéité en place **[43]Figure II.18**Tunnel du métro de Leningrad **[43]**

- **Toiture à plis**

  Ces éléments préfabriqués ont une épaisseur de 5 cm, une hauteur de 2 m et une longueur pouvant atteindre 32m (**Figure II.19 et II.20**)



Figure II.19 Bâtiment à Toitures à plis **[43].**

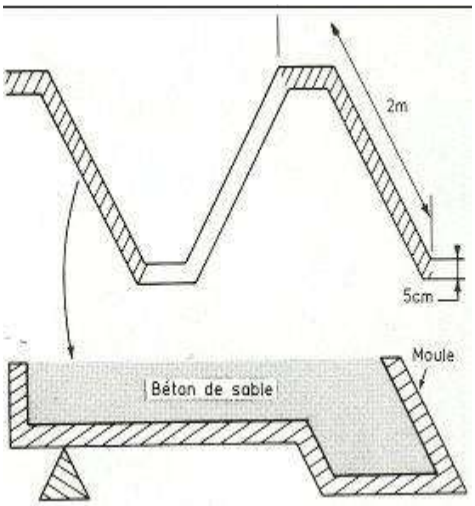


Figure II.20 Moulage d'un élément **[43]**

- **Béton de sable projeté**

Le domaine d'application de la projection de béton comprend aussi bien la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes.

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines (**figure II.21et II.22).**

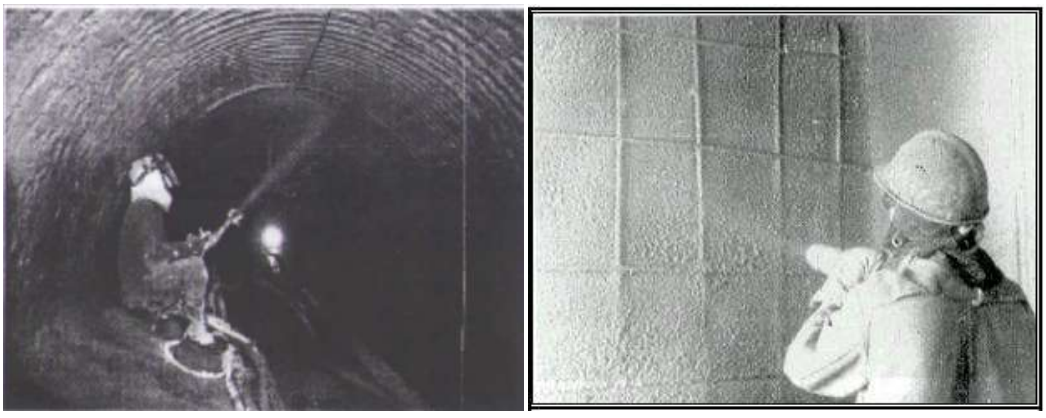


Figure II.21: Projection sur surface avec Nouveau ferraillage **[43]**

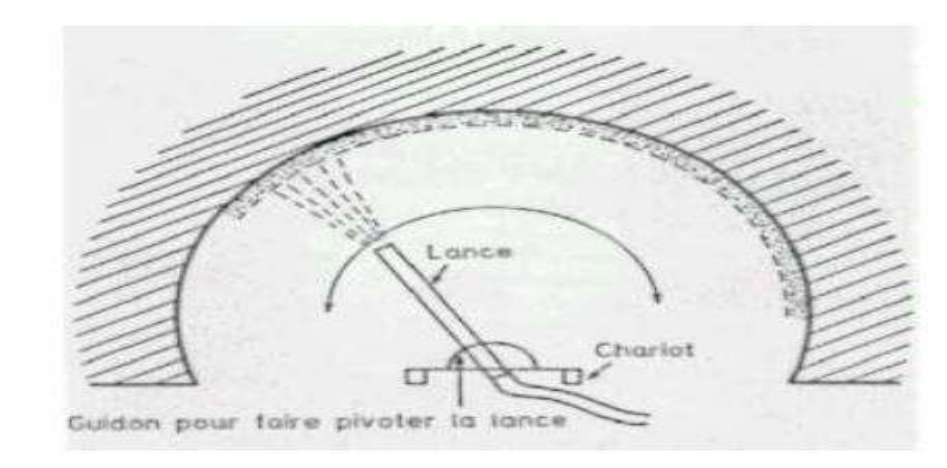


Figure II.22 Renforcement d'un égout **[36]**

- **Bétons de sable fluides**

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécutionet la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétonsont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence devibration, la faible accessibilité aux zones ferraillées et aux formes complexes des coffrages etle besoin de pomper le béton à des distances importantes.En plus, l'absence totale oupartielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation. L'intérêt réside dans les avantages de béton fluide suivants :

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

II.8 Limites des bétons de sable

Actuellement, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton ordinaire, pour des raisons économiques ou techniques.

- ✓ **Raisons économiques :**toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût.
- ✓ **Raisons techniques :** on n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints **[43].**

II.9 Méthodes de formulation des bétons de sable

La formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants afin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques.

Ainsi, toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème.

Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique.

A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulation à savoir la résistance mécanique et la maniabilité**[47].**

II.9.1 Approche théorique de la formulation des bétons de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte, généralement le ciment avec l'eau, assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci **[43].**

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 doncdiminuer au maximum la porosité.

Cependant la détermination de cette compacité maximalen'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée.

Caquot **[42]** a pu établir à partir desdonnées expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélangegranulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/D_{max}).

Donc on écrit la relation de Caquot comme suit :

$$\mathbf{V= V_0\ (d/D_{max})^{1/5}} \quad \textbf{……. (equationII.1)}$$

V : Volume des vides du mélange granulaire ;

$\mathbf{V_0}$: Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8 ;

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

Dmax : La dimension de 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.

A- 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:

- Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 µm et qui sont le ciment et les fines d'ajout ;
- Une fraction du sable.

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

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

$$P_s = V = 0.75\ (0.08/D)^{1/5} \quad \textbf{(equationII.2)}$$

Avec :

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80 µm et Dmax

Dmax: Diamètre maximal du plus gros grain du mélange.

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

En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80m m) et le volume des vides associé 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 $_{max}$)$^{1/5}$…… (**EquationII.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 finesaugmente **(Fig.2.23).**

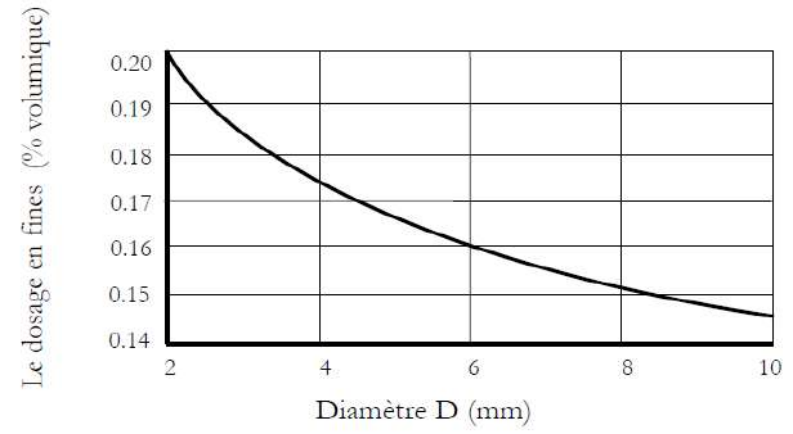


Figure II.23 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines **[42]**

B- Dosage en eau d'un béton de sable

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

(e + v) min = 0.8 (d/Dmax) 1$^{/5}$……..….. **(equation II.4)**

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

d = (60/(f)) mm × ρ…… (equationII.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 mm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale comme le montre **la figure II.24** :

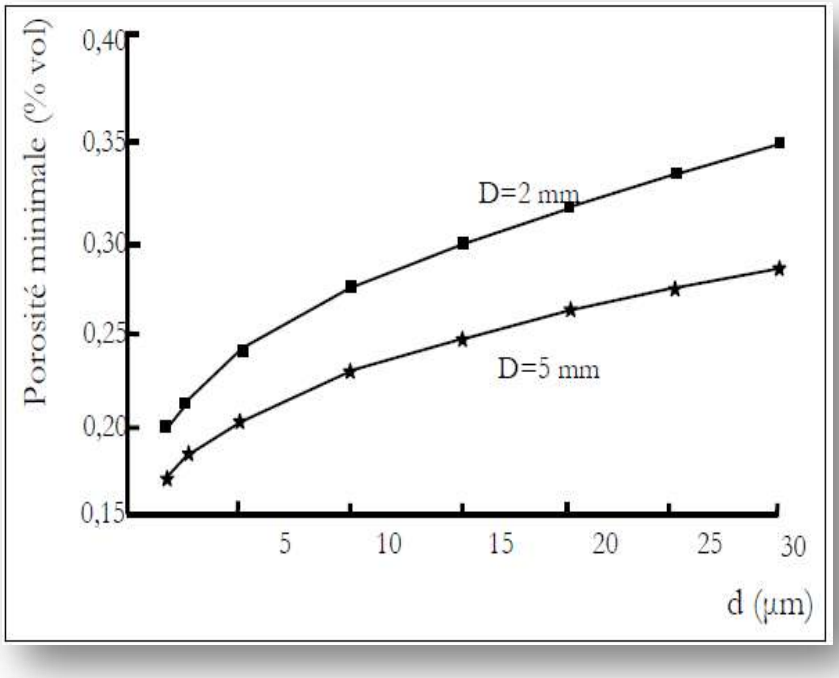


Figure II.24 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton
Pour deux tailles du sable **[42]**

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).

Pratiquement, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité ; **la figure II.25** nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

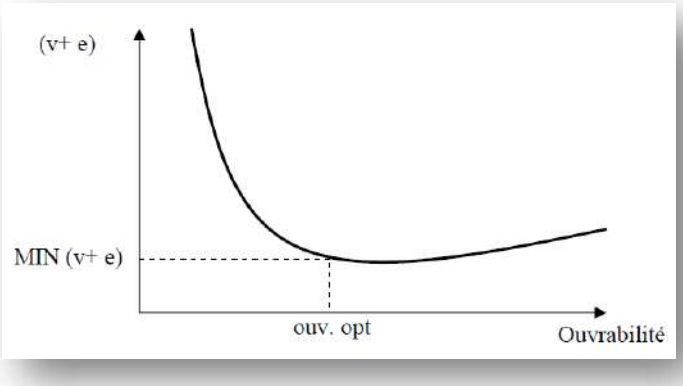


Figure II.25 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée **[44]**

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

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

[Vides] = K [eau]…… **(equationII.6)**

Avec : **K** : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

C- Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, ($1m^3$), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide)**[43].**

[Sable]=1000-[fines]-[eau]-[vide] (l/m3). ...……(**equationII.7)**

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

II.10 Méthode expérimentale de formulation des bétons de sable

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

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

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc., et ont donné pleine satisfaction **[43].**

II.11 Les différentes étapes de la formulation

II.11.1Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

A l'heure actuelle, nous tenterons de chercher une méthode afin de déterminer une formule d'un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate **[43].**

- **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 (l/m^3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

❖ **Détermination du dosage en sable**

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

En effet, un béton contient toujours un volume d'air, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

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

$V_{air}+ V_C+V_E+ V_{adj}+ V_{sable}$= 1000 (En litres) ..... **(equationII.9)**

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

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

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

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

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

La formule du béton doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$\mathbf{S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \mp V \times MVA_{sable}} \quad \textbf{(equationII.10)}$$

Où

S_i : dosage en sable après correction

S_{i-1} : dosage en sable avant correction MVAT, MVAR : les masses volumiques du béton théorique et réel
MV sable : masse volumique absolue du sable
V : le volume d'eau à rajouter ou à retrancher selon l'écoulement.

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

Après chaque correction la masse volumique théorique sera comparée à la masse volumique réelle.

En ajustant le dosage en eau et en sable conformément à ce principe, le dosage en eau devient définitif et le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule fait le mètre cube du béton de sable.

II.11.2 Détermination du dosage en fines d'addition

Il est important d'introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines. L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides

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

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

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

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:

- ✓ **Fine d'addition N° 1 :** Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m3 de fines**. (Figures II.26 et II.27)**

- ✓ **Fine d'addition N° 2 :** Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.
- ✓ **Fine d'addition N° 3** : Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m3de fines

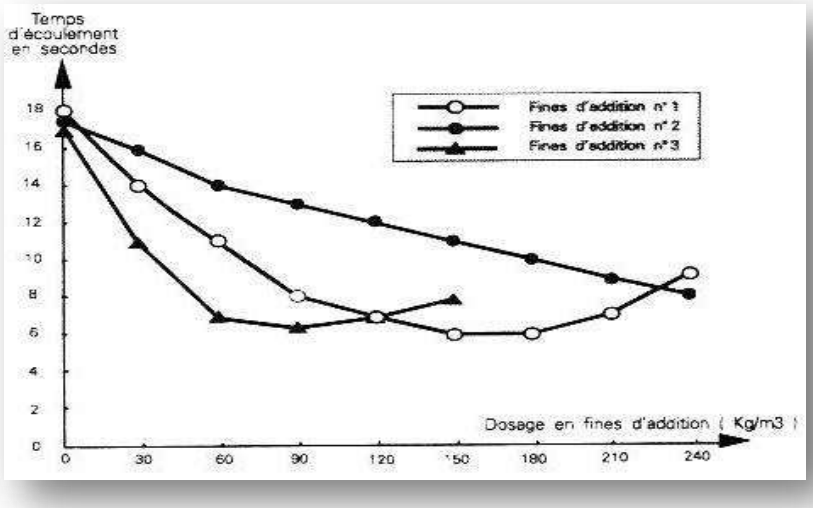


Figure II.26 Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition **[43]**

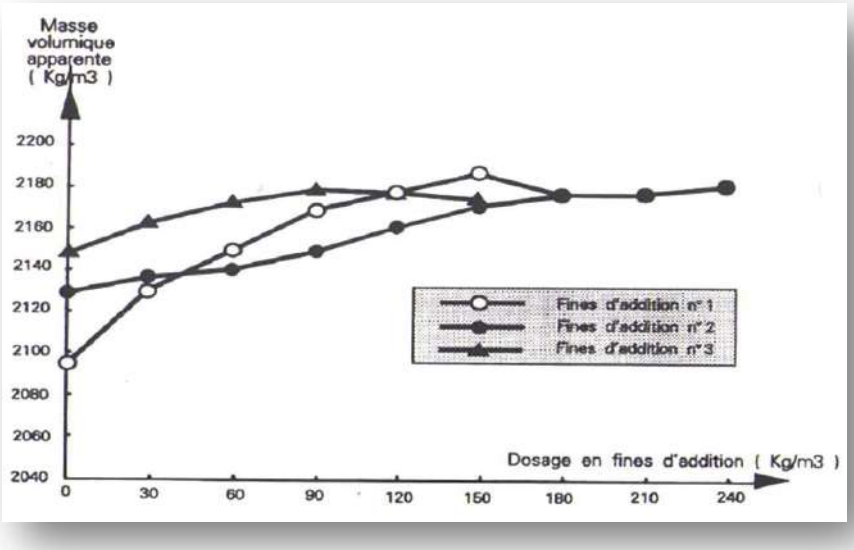


Figure II.27 Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition **[43].**

II.12 Conclusion

D'après cette partie de recherche bibliographique, l'essentiel est résumé sur la formulation du béton de sable, ces constituants ainsi que l'importance de son utilisation. La formulation des bétons de sables relève de l'optimisation de la compacité d'un mélange quaternaire : sable, ciment, filler et microfiller. En effet, l'avantage du béton de sable c'est qu'il est un matériau présentant moins de fissures.

Chapitre III

Matériaux et essais

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on va présenter les matériaux de construction utilisés pour la confection des bétons étudies avec leurs caractéristiques et les essais faites au laboratoire, comme pour tous les bétons, la formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues à savoir :

- La granularité ou le fuseau granulaire du squelette
- Les dosages en sable, ciment, eau, superplastifiant

La caractérisation des bétons à l'état frais, et à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai.

III.2 Les matériaux utilisés

III.2.1 Sable

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

Les caractéristiques physiques de sable utilisée sont données dans le **tableau III.1** sous-dessous :

Tableau III.1 : Propriétés physiques d'identification de sables utilisé

Caractéristiques	Type de sable	Norme
Provenance	Oued-Souf	/
Classe granulaire	0/5	/
Module de finesse	2.28	NF EN 933-1**[55]**
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.56	NF EN 1097-6**[56]**
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.63	NF EN 1097-6**[56]**
Taux d'absorption d'eau (%)	0.9	NF EN 1097-6**[56]**
Equivalent de sable (%)	77.003	NF EN 933-8**[57]**

Le pourcentage des passants aux diamètres des Tamis est appelée courbe granulométrique.

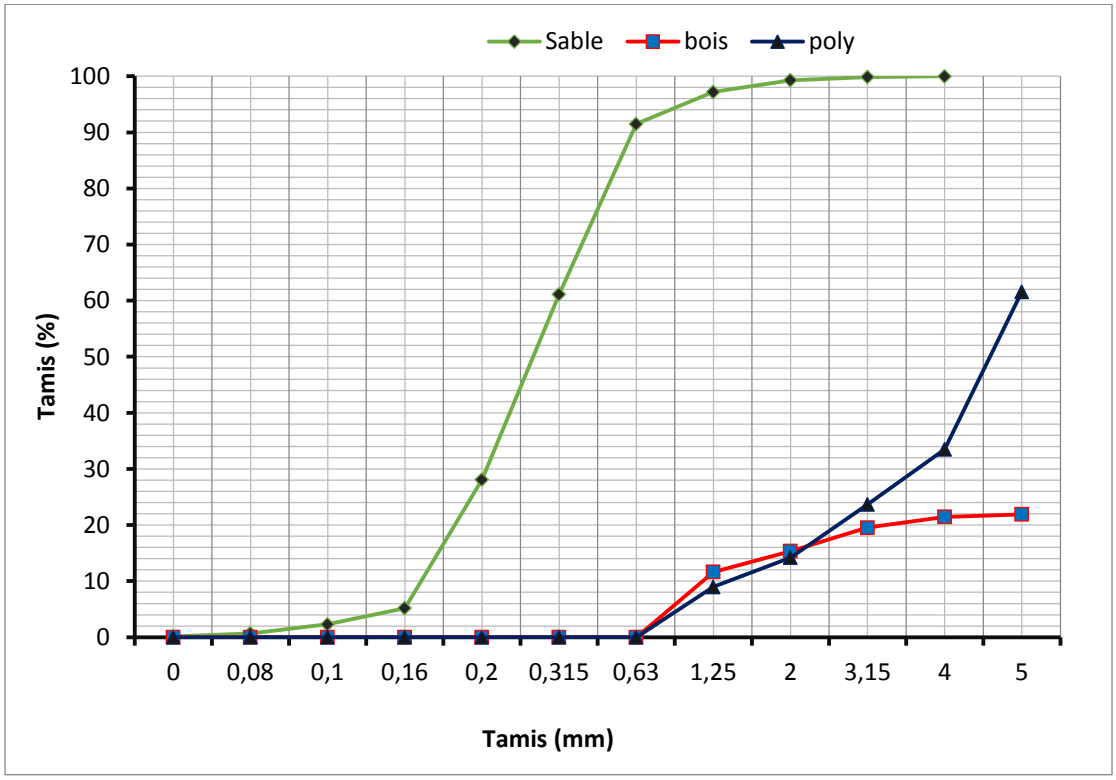


Figure III.1 Courbes granulométriques de sable et de déchets utilisées

III.2.2 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II/A (Mâtine) **(Figure III.4**), avec une résistance minimale à la compression à 28 jours de 42,5 MPa, produit par la cimenterie de Lafarge (M'sila) dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à **la norme NA 451 [58]. (Annexe B).**



Figure III.2 Type de ciment utilisé

Le **tableau III.2** résume l'Analyse chimique du ciment et composition hypothétique du clinker, selon la fiche technique du ciment **[59].**

Tableau 0III.2:L'analyse chimique du ciment et composition du clinker[47].

Analyse chimique Du ciment					Composition hypothétique Du clinker	
Perte au feu (%)	Résidus Insolubles (%)	Teneur en Sulfates SO^3 (%)	Teneur en oxyde De magnésium MgO (%)	Teneur en Chlorures (%)	Silicates Tricalciques C3S (%)	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

- **Essais physiques**
- **La finesse**

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de liant par gramme de poudre. L'essai consiste faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment, en utilisant un pérméabilimètre de Blaine ,(**Figure III.4)** plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface est proportionnelle à √t. La surface spécifique est calculée par la formule:**[59]**

$$S=k\frac{\sqrt{e^3}.\sqrt{t}}{\rho(1-e).\sqrt{n}} \quad \text{..... (EqIII.1)}$$

S : Surface spécifique (cm_2/g).
k : Constante de l'appareil. (k=43)
e : Porosité de la couche tassée. (e=0,5)
t : Temps mesuré en secondes.
P : Masse spécifique du ciment (g/cm_3).
H : Viscosité dynamique de l'air à la température d'essai (en poises).



FigureIII.3. Périméabilimètre de Blaine

- **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après **la norme NF P 15-431[60].**



Figure III.4.L'appareil de Vicat

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après **la norme NF P 15-473 [61].**

III.2.3 Eau de gâchage

L'eau qui a été utilisée dans cette étude pour le gâchage est une eau du robinet de notre laboratoire sans passer par l'analyse chimique de cette eau. Sa température était comprise entre 10 et 22°C. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

III.2.4 Super plastifiant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération, de forme liquide brun clair, d'un PH égal à 6± 1, de densité 1,06 ± 0.01 fabriqué par la société Algérienne 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).**



FigureIII .5 Superplastifiant VISCOCRETE TEMPO 12

III.2.5 Ajouts (fillers)

Les fillers utilises dans notre cas sont du fillers de calcaires. Ils sont obtenus par broyage et tamisage (au tamis 80 µm) des déchets de concassage d'une carrière de meftah à la wilaya de Blida. Cecalcaire est destiné vers la fabrication du ciment au cimenterie de GikaMefta. Rappelons que le calcaire est le plus adaptés au béton de sable et donne de meilleures performances**.**

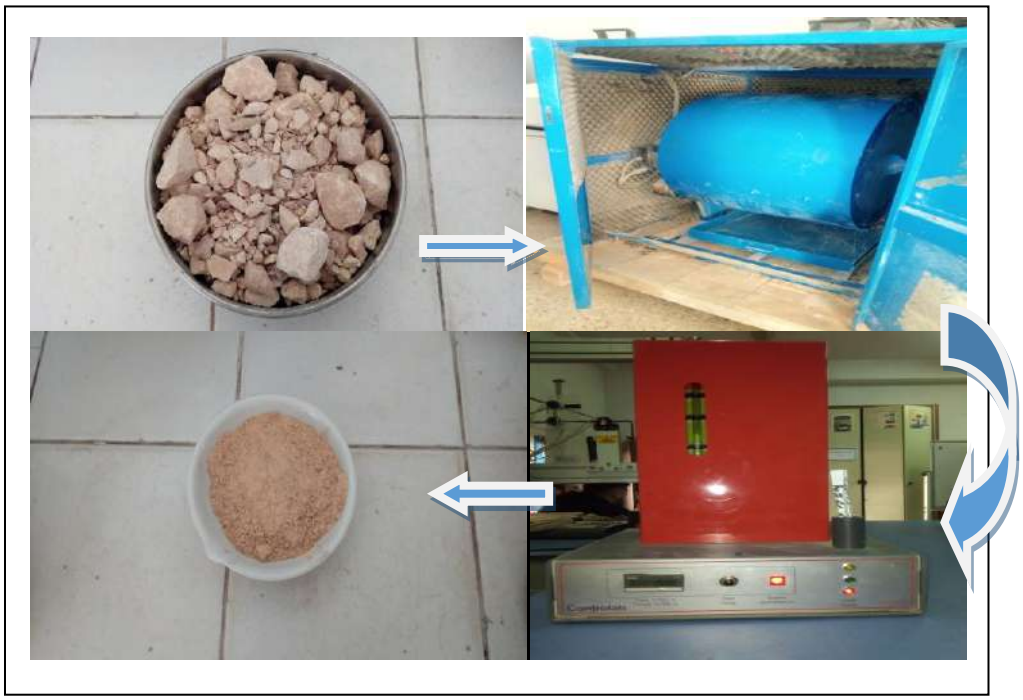


Figure III.6 La procédure de concassage de fillers calcaire**.**

Leur caractéristique physique est mentionnée dans le **tableau III-3** suivant. :

Tableau 0-3: Caractéristiques physiques de calcaire

Caractéristique	Calcaire
Masse volumique absolue (g /cm^3)	2,59
Finesse de mouture (cm^2 /g)	2297.03

III.2.6Granulats des billes de polystyrène

Les granulats de polystyène expansé (EPS) sont des granulats organiques artificiels,les échantillons se présentent sous forme de billes parfaitement sphériques,

l'enveloppe extérieure de ces perles est lisse et d'un grain serré ce qui les rend hydrophobes, elles demeurent donc imperméables, même sous forte pression d'eau**.**

III.2.7Traitement des billes de polystyrène

Pour but d'augmenter la densité des billes de polystyrène on a essai plusieurs modes de traitement .enfin on a choisi le traitement avec peinture lavable à cause de son meilleure résultatle mode de traitement effectuée est comme suit :

- ✓ **100 g** billes de polystyrène**+1000g** lavable
- ✓ **Séchée à l'air 24 h**
- ✓ **Séparée les billes avec un fortement des mains**

Les Caractéristiques physiques du des granulats polystyrène expansé sont donnés dans **le tableau III-4.**

Tableau III-4: Caractéristiques physiques du des granulats polystyrène traité et non expansé

Caractéristique	
Masse volumique absolue de EPS non traité (g /cm^3)	0.025
Masse volumique absolue de EPS traité (g /cm^3)	0.19
Diamètres des granulats (mm)	1.25-5
Absorption d'eau d'EPS traité (%)	1.67
Module de fines MF	3.8

III.2.8 Granulats de copeaux de bois

Ce sont des granulats organiques végétales, les échantillons se présentent sous forme de copeaux. Ils proviennent des déchets résultant du défonçage et du rabotage des travaux de la menuiserie type (Bois rouge). Ils présentent un aspect de forme irrégulière,

avec une limite granulométrique supérieure voisine de 5 mm et une limite granulométrique inférieure voisine de 0.1mm.

III.2.9 Traitement des copeaux de bois

Afin de rechercher quelques améliorations sur certaines caractéristiques des compositesétudiés, notamment la sensibilité à la présence de l'eau, nous avons pensé au traitement des copeauxde bois avant de les incorporer dans le béton de sable ,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.

Les différentes caractéristiques mesurées des coupeaux de bois sont mentionnées dans le **Tableau III.5**suivant.

Tableau III.5: Caractéristiques physiques du copeaux bois traités et non expansé

Caractéristique	
Masse volumique absolue de bois non traité (g /cm^3)	0.86
Masse volumique absolue de bois traité (g /cm^3)	1.30
Masse volumique apparente de bois traité (g /cm^3)	0.16
Masse volumique apparente de bois non traité (g /cm^3)	0.07
Diamètres des granulats (mm)	1.25-5
Absorption d'eau de bois non traité (%)	8.98

III.3 Formulation du béton de sable Léger

On a mélangé 5 séries de béton de sable allégé par les billes de polystyrène traités et les copeaux de bois traités qui sont ajouté comme substituions par rapport au volume du sable à des niveau située entre 0 % jusqu'a 50 % (chaque pourcentage est divisé à moitié entre EPS et Bois) et comparé avec le témoin.

Le tableau III-6 présente les différentes compositions des bétons confectionnés.

Tableau III.6: Composition des différentes BSESPB étudié dans un 1 m^3

Mélanges	**Composition (kg/m^3)**						
	Ciment	**Sable**	**Calcaire**	**Eau**	**Adjuvant**	**EPS**	**Bois**
BSESP B 0%	350	1470	110	220	2.1	0	0
BSESPB10%		1323			1.6	5.54	34.12
BSESPB20%		1176			1.4	11.08	68.25
BSESPB30%		1029			1.0	16.62	102.36
BSESPB40%		882			0.8	22.16	136.49
BSESPB50%		735			0 .6	27.71	170.62

III.3.1Mode de 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 :

- $\frac{1}{2}$ l'eau + adjuvant + polystyrènes + copeaux de bois en mélange les ingrédients en premier temps pendant 30 S.
- puis on ajoute une quantité de ciment + fines (le calcaire) pendant 30S.

- On ajoute le sablependant 30S.
- enfin on verse la deuxième moitiéde l'eau pendant 15 S.
- remettre la machine de vitesse rapide pendant 1min et 30S.
- arrêter la machine pendant 15S.
- remettre l'appareil de vitesse rapide pendant 2min.

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



Figure III-7 : Le malaxage du béton sable

III.3.2 Confection et conditionnement des éprouvettes :

Les différents types de bétons de sable sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire à l'air ambiant (20°C, 50% HR) . Le béton a été coulé dans des moules métalliques de forme prismatiques 4x4x16 cm^3 destinées aux essais de traction par flexion et de variations dimensionnelles, ainsi que des éprouvettes 4×8×16 cm destinées pour les essais thermiques conformément.

Elles ont été coulées dans les moules en plusieurs couches et mises en place par vibration manuelle. Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans un cure, dans l'eau à 20 C° ± 2 C° ou dans l'air libre selon la nature de l'essai, jusqu'au moment de l'essai de rupture.

Au jour prévu, les 3 éprouvettes sont rompues en flexion et en compression. **Lanorme NA 442 [62]** définit les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 3, 7 et 28 jours.

III.4 Les Essais réalisés sur béton de sable

III.4.1Essai à l'état frais :

Essai au maniabilimètre L.C.P.C

Selon les normes L.C.P.C [**63]** et **NF P 15-437[64]** 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)

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 III.8**) et comporte

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



Figure 0-8: Maniabilimètre à béton de sable

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

Huiler légèrement les parois internes de la cuve

1. 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 trois couches.

1. Chaque couche piquée de 25 coups au moyen de la tige de piquage.
2. Araser la dernière couche.

La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre en 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 III.9).**

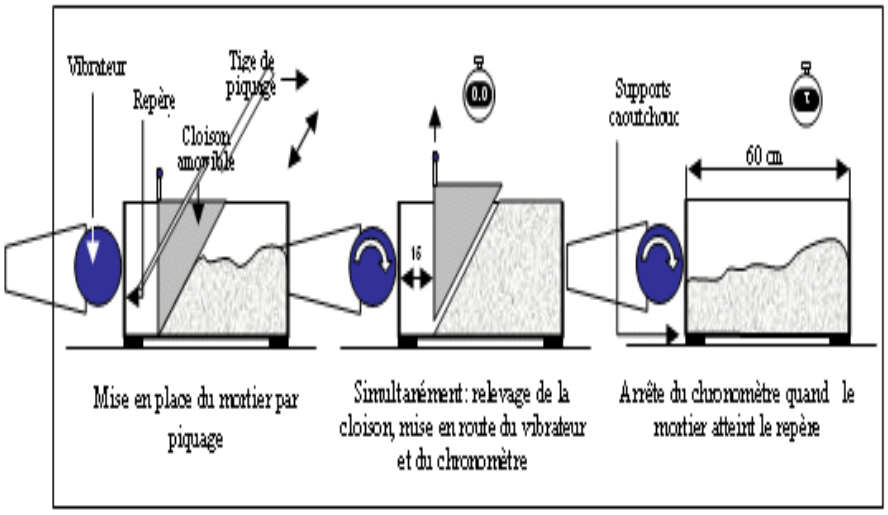


Figure 0-9: Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à béton de sable

La densité

La masse volumique du Béton de sable a été mesurée selon **la norme NF EN 12350-6 [50]**, voir le **Figure. III.10**



Figure 0-10: Mesure de la densité du Béton de sable

L'air occlus

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton de sable frais, 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 de sable frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1litre selon **la norme française NF P 18-353 [65].**



Figure. III. 11. L'aéromètre à mortier.

III.4.2 Essai à l'état durcis

Essai de traction par flexion

Selon **la norme EN 196-1 [66]** c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (**Figure III.12),** 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.

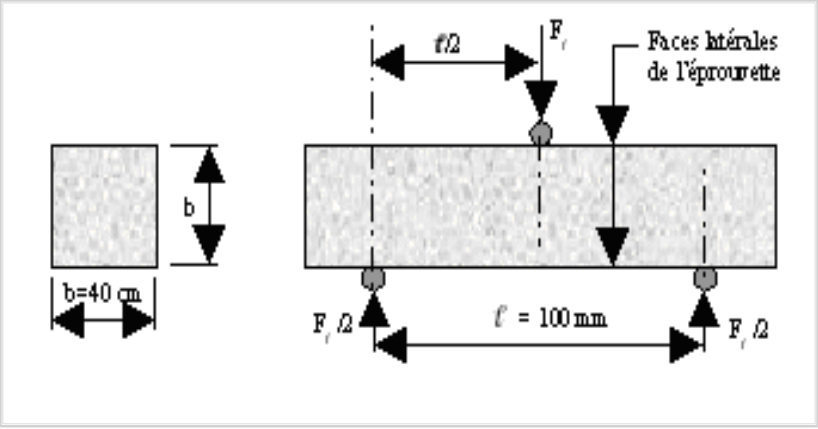


Figure III.12: Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

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

$$\sigma t = (M / I)v \qquad (eqIII.2)$$

Avec :

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

$$M = Ff\ L/4 \qquad (éq\ IIII.3)$$

I : Moment d'inertie de la section transversale :

$$I = a4/12 \qquad (eq\ III.4)$$

v : La distance de la fibre la plus éloignée :

$$v = a/2 \qquad (eqIII.5)$$

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

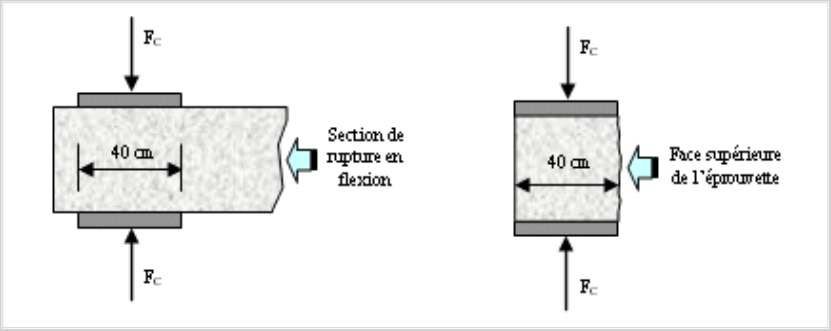
$$\sigma t = (1.5Ff\ L)/\ a3 \qquad (eqIII.6)$$

Et

$$ft28 = 0.9\ Ft.L\ /\ a3 \qquad (eqIII.7)$$

Essai de compression :

La résistance à la compression a été mesurée selon **la norme NF EN 196-1 [66]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 3, 7, 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN conforme a **NA 5076 [67].** 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 (3j.7j.28j).



FigureIII-13: 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.13**, la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$Rc = Fc / b^2 \quad (eq III.8)$$

Variations dimensionnelles

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 (4x4x16cm) conformément à **la norme NF P 15-404[71].**

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).

La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C, et le gonflement la conservation des éprouvettes est fait à un bac d'eau de température de 25à 30°C.



Figure.III.14 Dispositif mesure du retrait et gonflement

Mesure des variations de longueur

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

Avant chaque sérié de mesures, l'appareil est étalonné avec une tige de métal de 1600 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette (la tige est réalisée en métal Invar ou protégée contre les variations de température qu'elle est appelée à subir au cours des manipulations).même métal que l'appareil.

Mesure des variations de masse :

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

Expression des résultats :

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

- **ΔL:** Variation de longueur par apport à la longueur origine,
- **L0** : Longueur de base, prise égale à 280mm.
- **ΔM:** Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage,

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

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

Conduite de l'essai :

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

$$l = L + dl(t) \qquad \textbf{(eqIII.9)}$$

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

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0) \qquad \textbf{(eqIII.10)}$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \qquad \textbf{(éqIII.11)}$$

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

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 III.16**), 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 (m_i- m_0) **NBN NE 13057 [72]**.

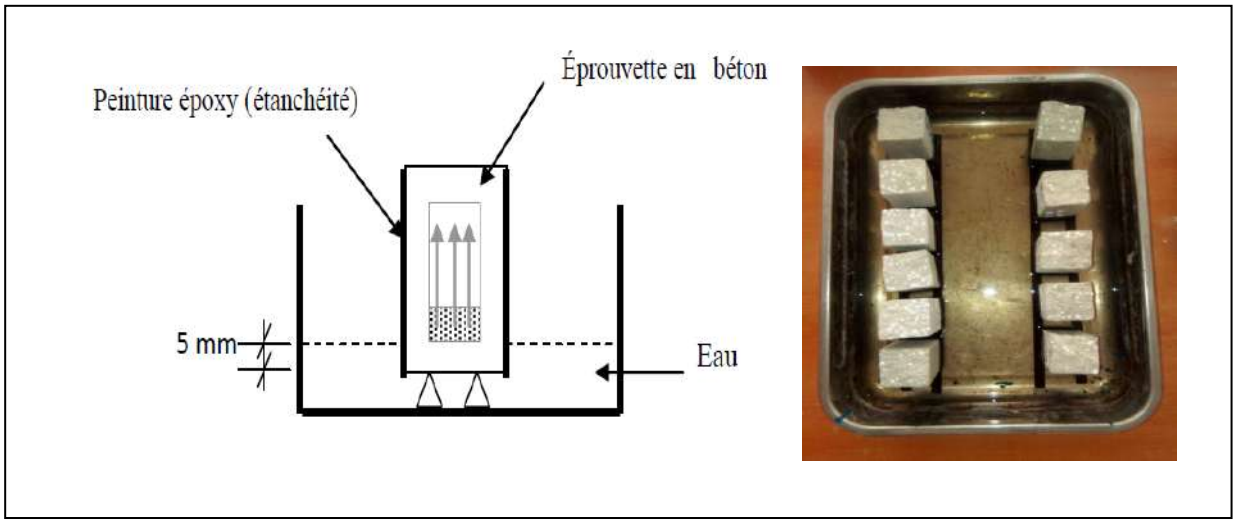


Figure III.15 Absorption d'eau par succion capillaire

Porosité

À la fin de la cure, les demi-prismes d'éprouvette 4x4x16cm sont séchés dans une étuve ventilée à 40 ± 5 °C jusqu'à poids constant ; elles sont ensuite prolongé dans l'eau, jusqu'à poids constant (Fig.4.24). L'échantillon est passé ensuite à imbibition sous vide, et après saturation une pesée sous eau (M_{eau}) et une autre dans l'air (M_{air}) sont réalisées. Ensuite,l'échantillon est séché dans une étuve ventilée à 105 ± 5 °C jusqu'à poids constant et ànouveau, une mesure de masse (M_{sec}) est réalisée selon la recommandation l'AFPC-AFREM.

La porosité volumique accessible à l'eauε, exprimée en pourcentage, est donnée parl'équation :

$$\varepsilon(\%) = \frac{Mair - Msec}{Mair - Meau} \times 100 \quad \text{..... (EqIII.12)}$$

ε (%): La porosité totale.

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

M_{sec} : La masse d'éprouvette sèche.

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



Figure.III.16 Mesure de la porosité accessible à l'eau

Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. Notée λ, elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre **[68].** Elle s'exprime en W/m°C. Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant **[69].**

Dans notre cas la conductivité thermiques des différents bétons a été mesurée à l'aide d'un CTMètre conformément **la norme NF EN 993-15[70]** sur des échantillons de 4 ×8×16 cm.



FigureIII-17. Dispositif pour l'essai de la conductivité thermique

Résistance au feu

Cet essai consiste à préparer des demi prismes d'éprouvettes 4×4×16cm^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 ,600°C 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[73].**

Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont ensuite refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24heures 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:[Perte de masse (%)] = $[(M_1-M_2)/M_1)]$ x 100…… **(équation III.13)**

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

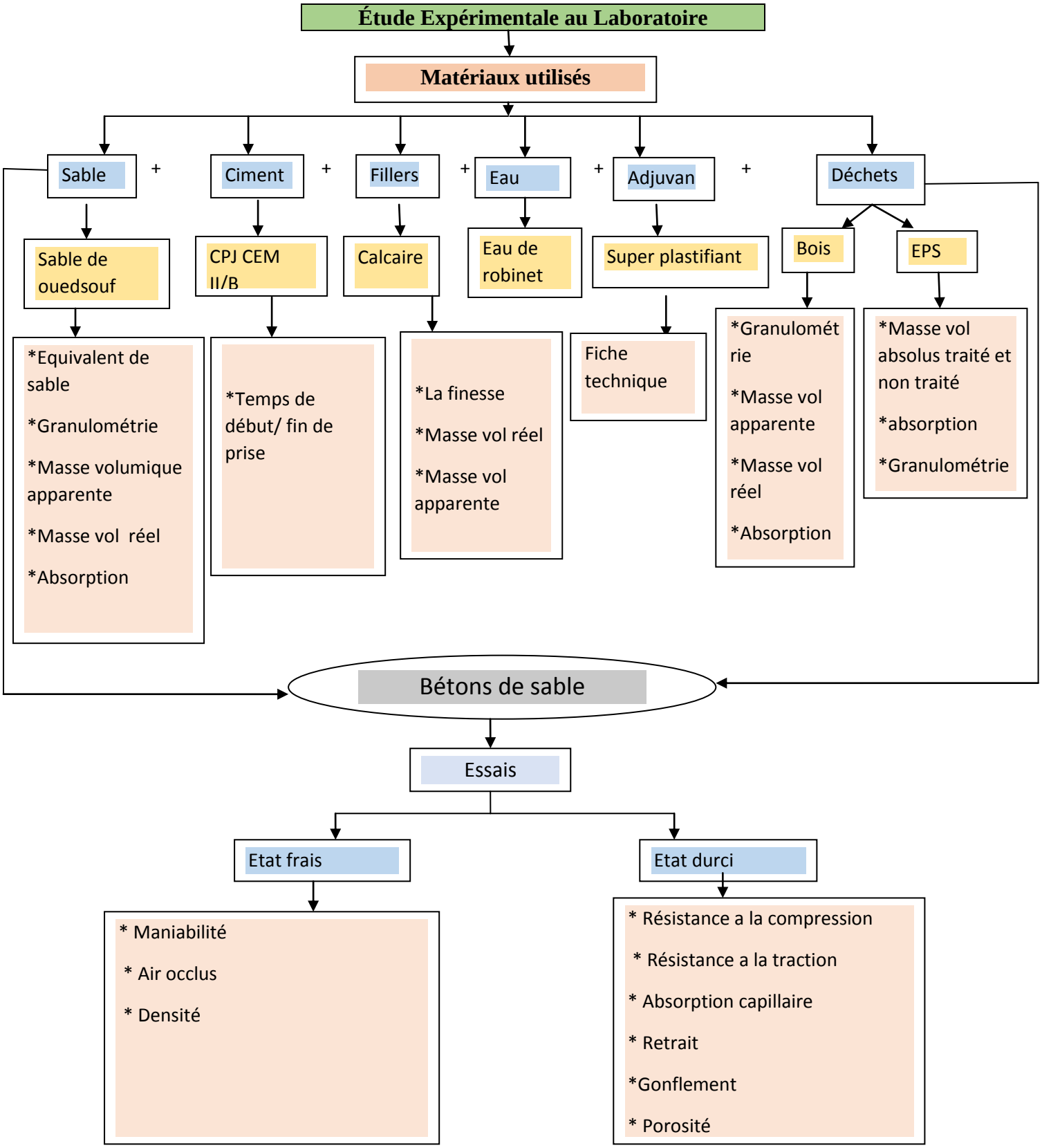


Fig.III.18 Variables étudiées

III.5 CONCLUSION :

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché Algérien (le ciment, les granulats, les super plastifiant).

Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur des bétons de sables, Pour déterminer leurs caractéristiques à l'état frais (maniabilité, densité),

Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique ont été réalisés et qui ont servi pour déterminer les propriétés mécaniques (compression, traction, absorption d'eau, retrait, gonflement).

Des essais menée au domaine thermique ont été réalisés et qui ont servi pour déterminer les propriétés de l'isolation est de transfert de chaleur .Pour reconnaitre l'effet polystyrène et les copeaux de bois sur le béton de sable ce soit à l'état frais ou durci.

CHAPITRE IV

Analyses et interprétations

IV.1 INTRODUCTION

Les résultats des différentes propriétés à l'état frais et durci des bétons réalisés et leurs interprétations et comparaisons au béton témoin font l'objet de ce chapitre.

IV.2 Béton frais

Le comportement du béton à l'état frais et son écoulement est représenté dans cette partie.

IV.2. 1. Temps d'écoulement

Selon la recommandation sablocreate, le temps d'écoulement du béton est bloqué entre 7 et 10 (s) pour avoir une fluidité constante du béton (Figure IV.1).

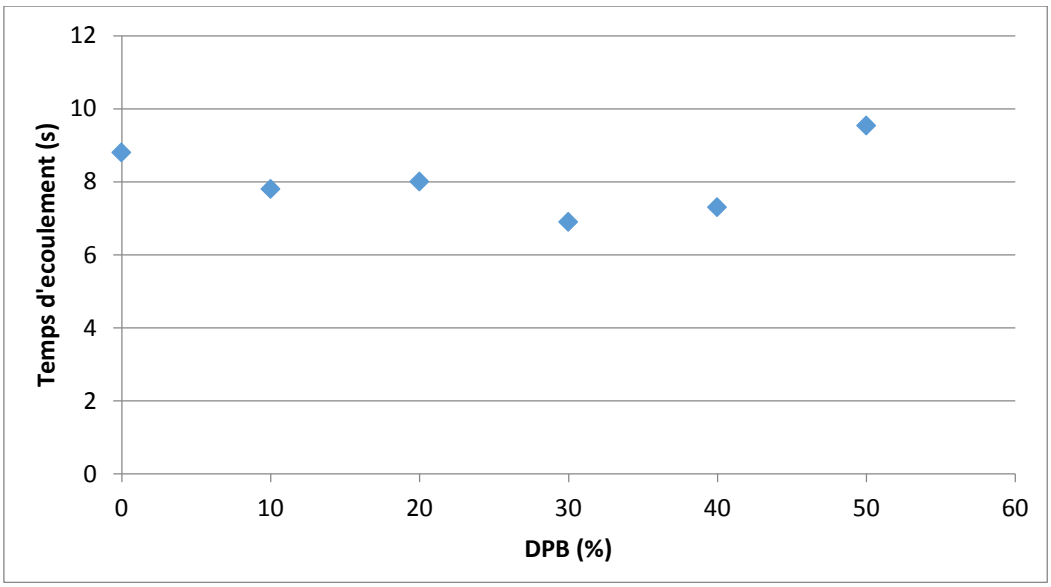


Figure IV.1: Variation du temps d'écoulement du BS

IV.1.2 Densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les figures ci-dessous (Figure IV.2).

La figure suivante montre que la substitution du sable par des déchets de polystyrènes et le bois (DPB) influe négativement sur la densité du béton de sable. La densité du béton

diminue en fonction de l'augmentation du dosage en (DPB). Ce résultat est logique et attendu, car la densité des (DPB) incorporés est plus faible que celle du sable substitué.

Ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [74,75, 76,77] qui ont trouvé aussi que la densité du mortier est diminuée d'une façon considérable en fonction du pourcentage de substitution, Le BS est plus léger avec ce couplage de déchets.

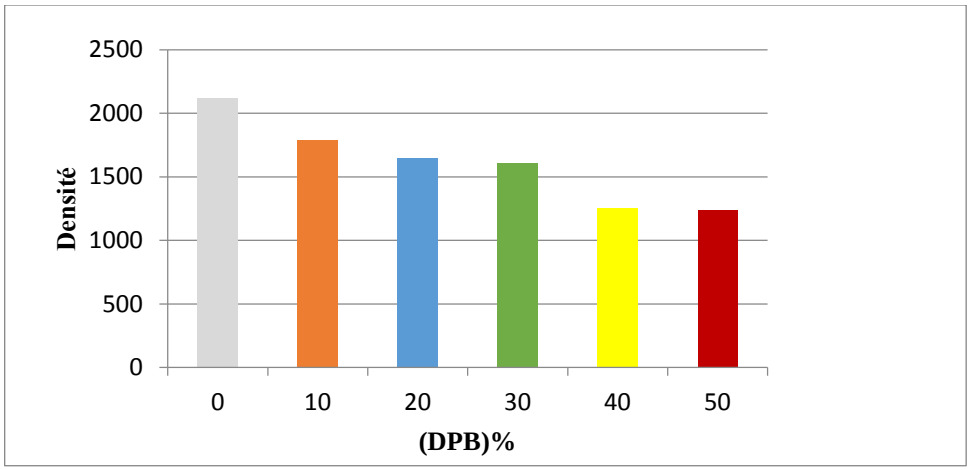


Figure IV-2: Densité des différents BS

IV.2.3 Air occlus

Dans cet essai, l'air occlus est mesuré (en pourcentage) pour chaque gâché du béton de sable. Ces résultats sont représentés sur un histogramme qui permet de comparer des valeurs des bétons entre eux.**(Figure. IV.3)**

D'après les résultats trouvés, on remarque que le volume d'air occlus diminue avec l'augmentation du taux d'incorporation en déchets de polystyrène et le bois (DPB) pour tous les types des bétons de sable,

Cela signifie que ce type de béton de sable est plus compacté et par conséquence moins poreux par rapport au BS de référence.

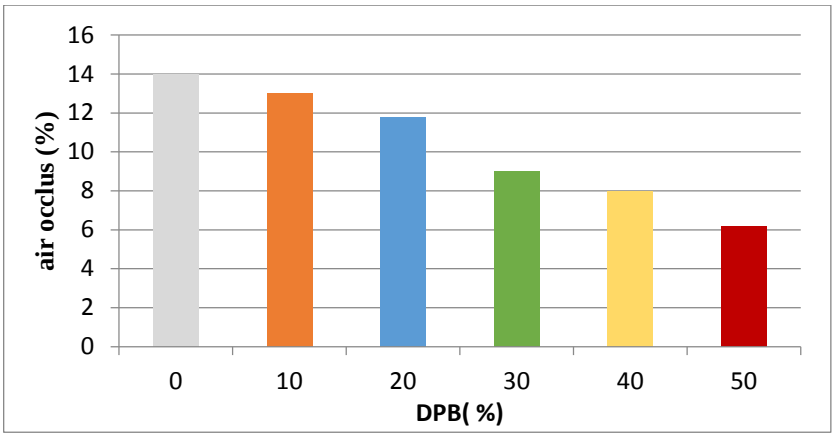


Figure IV.3. L'air occlus des BS à base de (DPB)%

IV.3 Etat durcis

De la même façon que le béton de sable frais, les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable durcis sont résumés ci-dessous :

IV.3.1 Porosité

La porosité des différents mélanges obtenus est résumée dans la figure IV.4 suivantes.

On remarque que la porosité des bétons de sable à base des déchets de polystyrènes et le bois (DPB) est plus élevée que celle du béton de sable de référence (BST). Les résultats obtenus montrent aussi que la porosité est augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de (DPB) cela explique que l'introduction de coupeaux de bois induit dans la matrice une porosité supplémentaire, ce qui en accord avec les résultats trouvés par **M.Bedrina et all[77]** La nature du poly et la forme du DB sont sans doute la cause. Cette porosité élevée va sans doute influer négativement sur le BS.

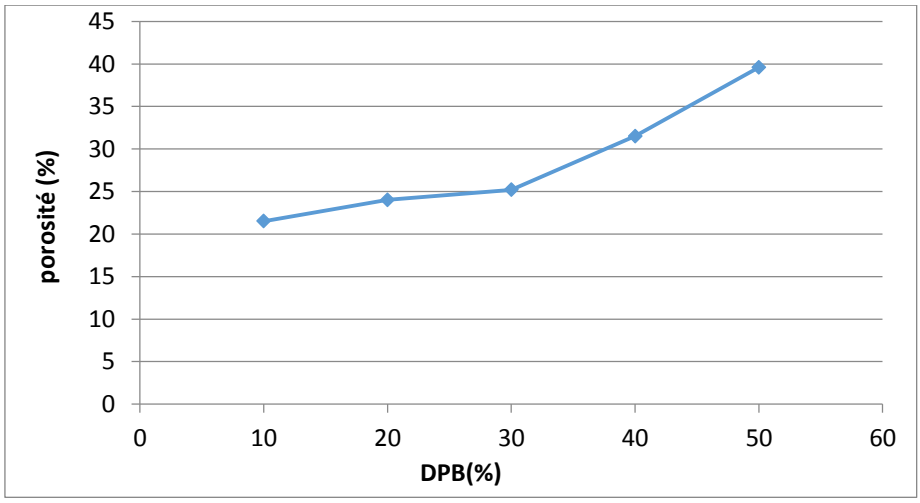


Figure IV.4 La porosité en fonction de % (DPB)

IV.3.2 Résistance mécaniques

Pour chaque essai, les résultats sont la moyenne de trois (03) mesures prises sur des éprouvettes de 4x4x16cm^3 à l'âge de 28 jours. Les résultats de l'essai de résistance effectué sur les différents bétons à base de déchets de polystyrènes et de bois à 28 jours sont présentés dans cette partie. Les variations de la résistante à la traction et à la compression sont montrées dans les figures Figure5 et Figure6.

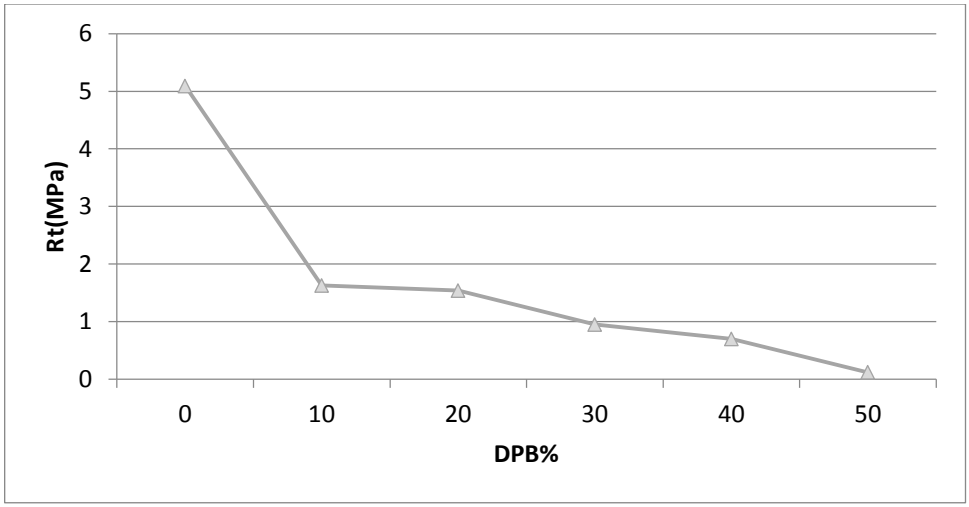


Figure IV.5:Résistance à la traction en fonction de % (DPB)

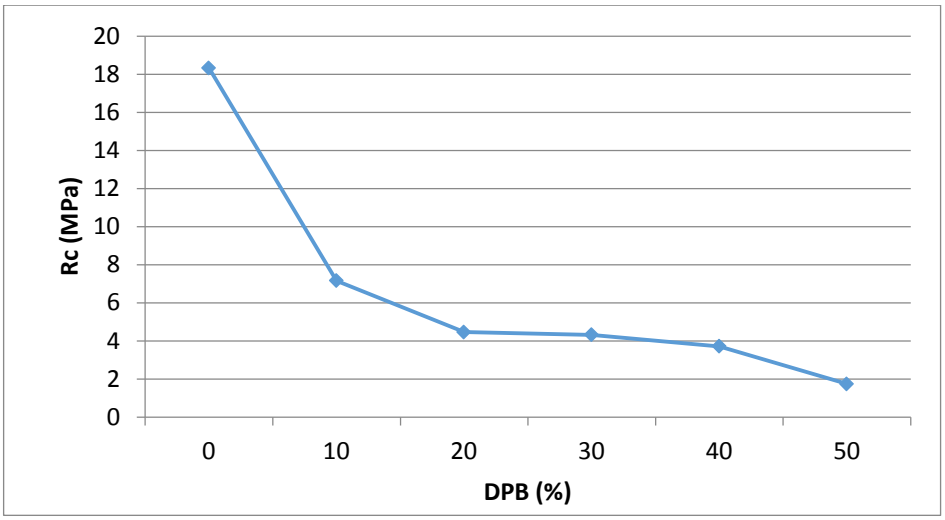


Figure IV-6:Résistance à la compression en fonction de % DPB

On constate que les résistances à la traction et à la compression diminuent avec l'augmentation du pourcentage de(DPB) devant celle du béton témoin. Cette chute de résistance est probablement engendrée en raison de la microstructure du BS, de sa porosité élevée et surtout la faible adhérence entre les billes de polystyrène et la pâte de ciment. La chute est considérable 70% pour un ajout de 10 à 20 % en DBP par rapport la résistance a la traction.

. Une chute de 60% (à 10 de DPB) qui arrive a 77 % (à 20% de DPB) et puis elle se stabilise. Les même causes de Rt semblent être la causes.

De plus, la faible résistance des copeaux de bois et les billes de polystyrène les rend dans le matériau des zones de très faible résistance. Ce qui est en accord avec les résultats de **Zireg** et **Rahmoun[1,47]**

IV.3.3Absorption d'eau par capillarité

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable à base de (DPB) sont illustrés dans les figures IV.7 suivantes.

On remarque que la capacité d'absorption d'eau des BST (10 et 20% DPB)est moins importante que celle du béton de sable de référence. Cette diminution est liée probablement à la porosité continue de BST (10 et 20% DPB) qui est moins importante par rapport au BST témoin. Au-delà de 20% on remarque que la capacité d'absorption d'eau dévient plus grande que celle du BS de référence.

La figure (Figure IV.7) montre que la capacité d'absorption d'eau de tous les autres types debéton de sable est augmentée en fonction de l'augmentation du pourcentage de (DPB). Cette augmentation d'absorption est liée à l'augmentation de la porosité continue qu'est plus importante et qu'est due à la mauvaise adhérence entre les billes de polystyrène et la pâte de ciment ainsi qu'à la nature fibreuse des coupeaux de bois.

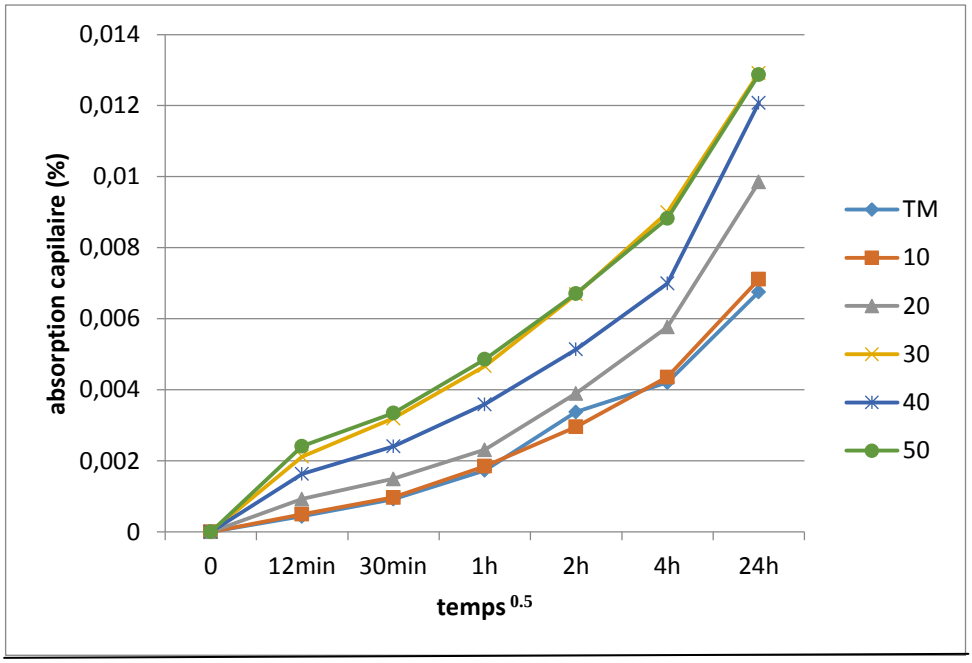


Figure IV.7 : Absorption d'eau des BST à base de DPB

IV.3.4 Variations de longueur

IV3.4.1 Retrait

En absence de toute charge extérieure, lors du séchage, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait.

Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage ; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite. Le retrait a des conséquences très graves (des fissures dans la construction) s'il n'est pas limité.

Dans notre cas, et pour les différents pourcentages en déchets de polystyrènes et les copeaux de bois (DPB), les valeurs du retrait obtenues sont illustrées par la courbe présenté dans la (figure(IV.8) suivante.

Ils ont trouvé que le retrait augment en fonction d'augmentation du pourcentage de (DPB).

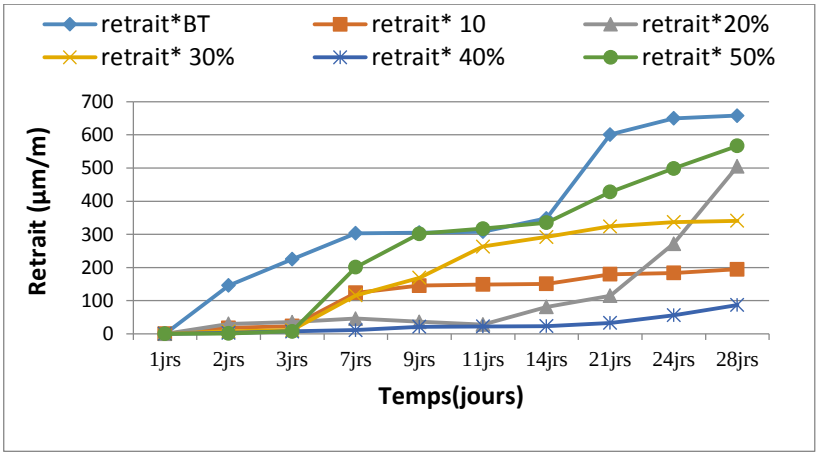


Figure IV.8: Le retrait des BST à base de DPB

D'après les résultats présentés dans la figure IV.8, on peut dire que le polystyrène et le bois ont des effets négatifs sur le retrait, plus on augmente le pourcentage de (DPB), plus le retrait augmente. Ce phénomène est lié à la faible rigidité des billes de polystyrène **[78].**
aux propriétés non absorbantes des granulats de polystyrène **[79].**

RamazanDemirboga [80] a remarqué que l'introduction de polystyrène dans les bétons influe défavorablement sure le retrait, ce qui est similaire avec notre travaille.

Neville [81] a indiqué que les granulats légers entraînent généralement desvaleurs de retrait plus élevées, principalement en raison de leur faible module d'élasticité.
Pour le bois **Zireg[1]**a indiqué que, le phénomène de retrait est différent, en effet pour la granulométrie, le retrait augmente au court du temps, et cela est dû 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.

IV.3.4.2Gonflement

Les résultats du gonflement des différents bétons après 28jours d'immersion dans l'eau, sont illustrés dans la figure IV.9 ci-dessous :

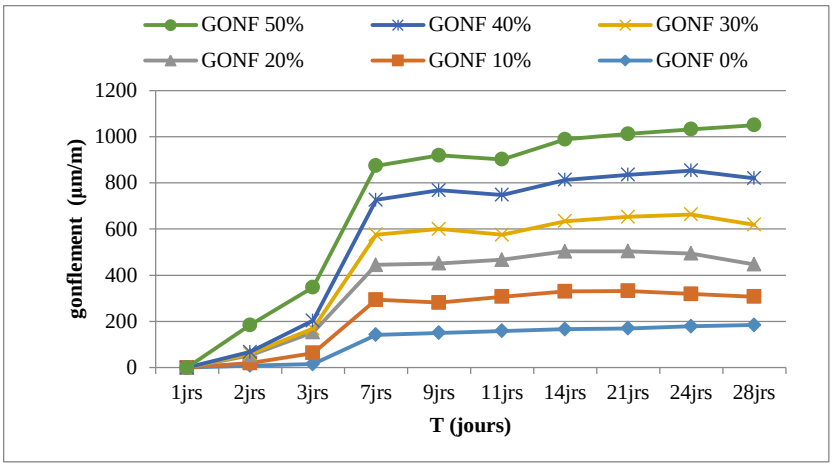


Figure IV.9 Gonflement des BST à base de DPB

On remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton de sable augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que les bétons de sable à base de DPB ayant un gonflement moins important que celui du béton de sable de référence. Les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de Polystyrène et le bois, et selon le type du sable utilisé. Cette augmentation en masse peut
être expliquée par le remplissage d'eau des vides causé par l'ajout du polystyrène.

IV.3.5 Variations de masse

IV.3.5 .1 Perte de masse

La perte de masse des déférents bétons est illustrée dans la figure IV.10 suivante

On remarque que la perte de masse de tous les types du béton de sable à base de DPB est nettement plus importante que celle du béton de sable de référence .On
Ce changement de volume du béton est duau séchage et sans doute due à la perte de l'humidité qui dépend de l'environnement.
L'évaporation trop rapide de l'eau de gâchage d'un béton frais génère des retraitset que s'ils sont importants, provoquent la fissuration du béton aux endroits de plus faible résistance mécanique.

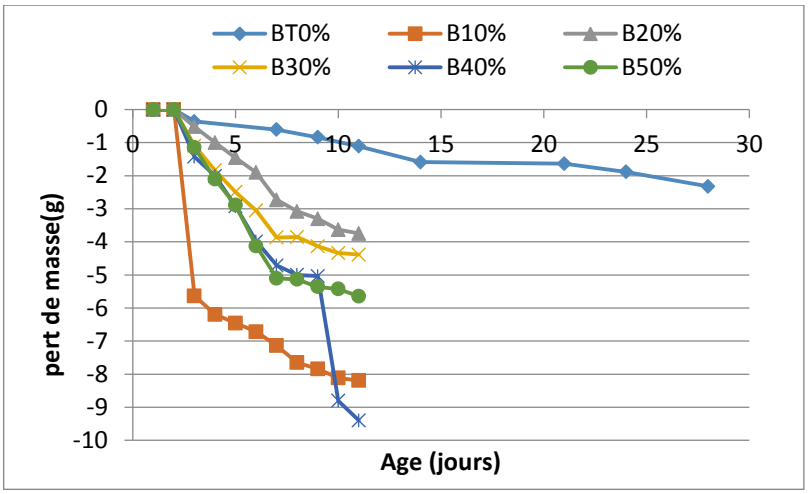


Figure IV.10. Perte de masse des BS à base DPB

IV.3.5 .2 Gain de masse

Les résultats du gain de masse des déférents bétons sont illustrés dans la figure ci dessous figure IV.12.

On remarque que le gain de masse des bétons de sable à base de DPB est moins important que celui des bétons de sable de référence, et d'après les résultats trouvés, il convient de noter un gain visible en masse du béton et ceci crois avec l'accroissement en pourcentage d'ajout en polystyrène. Cette augmentation en masse peut être expliquée par le remplissage d'eau des vides causé par l'ajout du polystyrène **[47].**

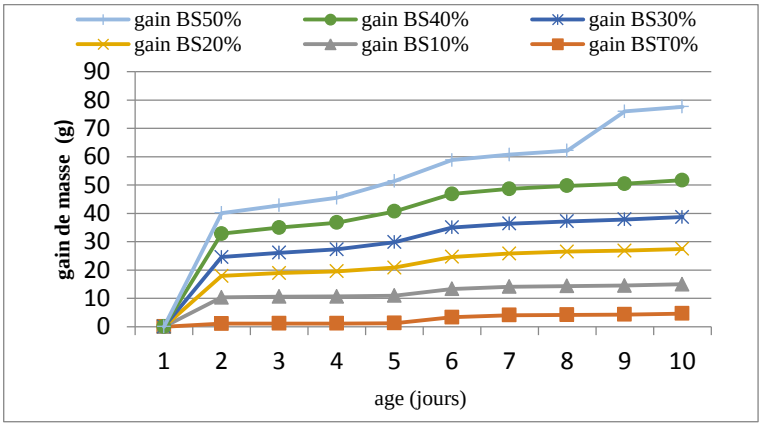


Figure IV.11 Gain de masse des BST à base de DPB

IV.3.6 Corrélation entre différents propriétés du BS

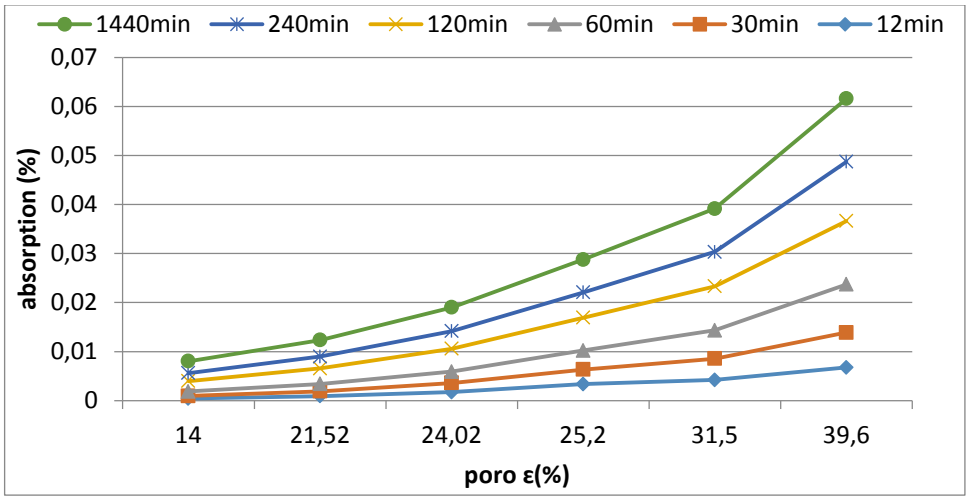


Figure IV.12: Relation entre la porosité et l'absorption d'eau par capillarité des BSDPB

Le BS absorbe plus d'eau avec les déchets DPB. Malgré que le poly n'absorbe pas mais le DB influe d'une façon direct sur l'abs du béton.

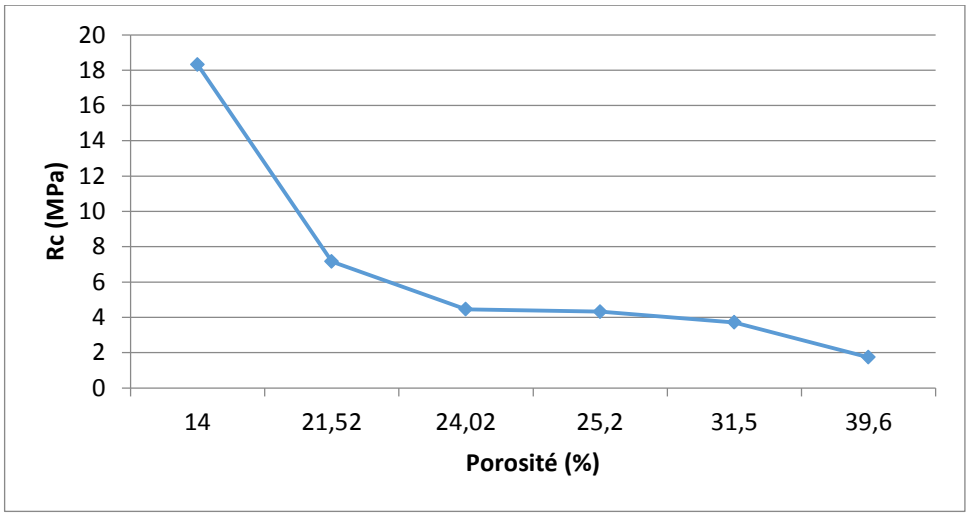


Figure IV.13: Relation entre la porosité et la résistance à la compression des BSDPB

La Rc est ↘ en fonction ↗ de pourcentage de la porosité. Ceci confirme les résultats précédents.

IV.3.7 Effet Conductivité thermique

Les résultats du la conductivité thermique des déférents bétons sont illustrés dans la figure ci dessous **figure IV.14.**

On remarque une diminution de la conductivité thermique selon le taux de substitution du bois et polystyrène. Cela est du aux propretés isolantes de ces matériaux. La conductivité thermique a diminué avec l'augmentation de la teneur en (DBP) pour plusieurs raisons. Premièrement, elle est liée à la faible conductivité thermique du bois et du polystyrène. Deuxièmement, l'augmentation de la teneur en (DPB) a entraîné une diminution de la densité, de sorte que la conductivité thermique a diminué en raison de sa relation inverse avec la densité **[Al Rim et al] [82]** résultats sont en accord avec les recherches antécédentes **[BEDRINA et al /ZIREG] [77.1].** Le pouvoir isolant de BS augmente. Ce genre de béton est recommandé pour le domaine d'isolation.

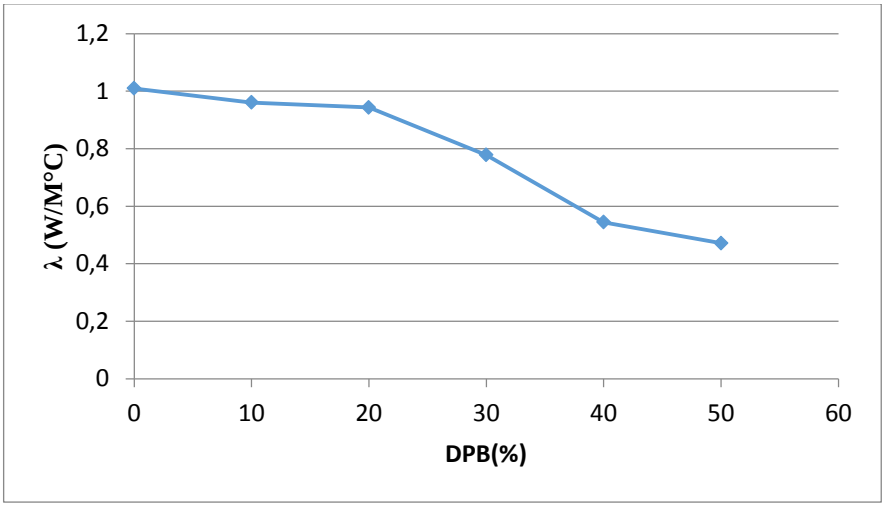


Figure IV.14:conductivité thermique en fonction de DPB(%)

IV.3.8 Résistance au feu

Les résultats obtenus sur la perte de résistance après le chauffage des éprouvettes à 400et 600 C° sont représentés sur les figures suivantes :

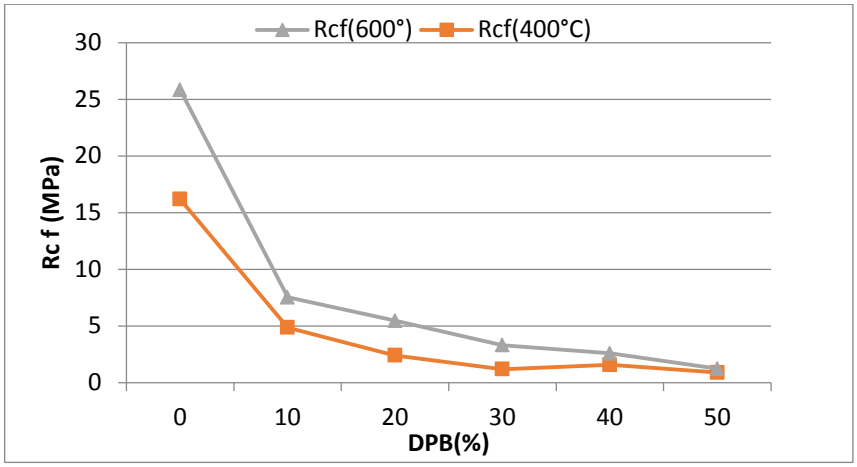


Figure IV.15: la résistance au feu en fonction de % (DPB)

Rc diminue avec l'augmentation du % en DPB. C logiques vues la nature des 2 type de déchets utilisé. De ce coté, ce genre de béton est utilisé avec précautions. La stabilité des éléments. De structures seront en danger en cas de feu.

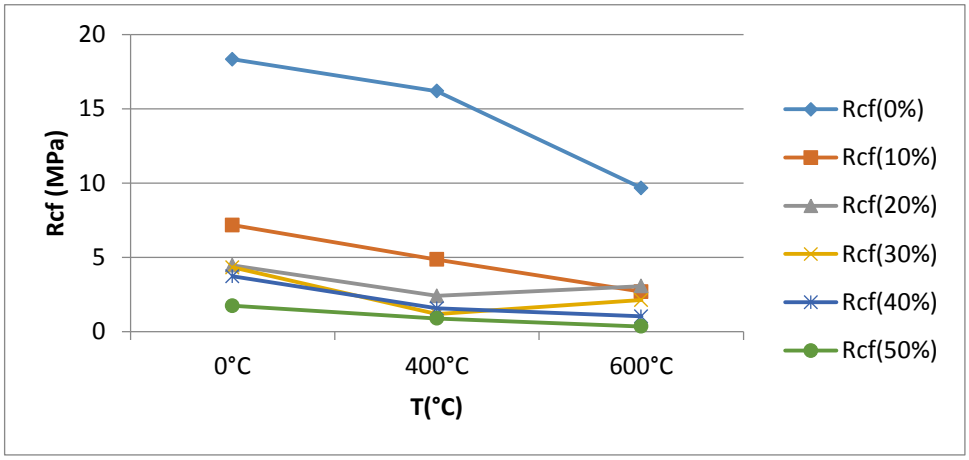


Figure IV.16 : la résistance au feu en fonction de température

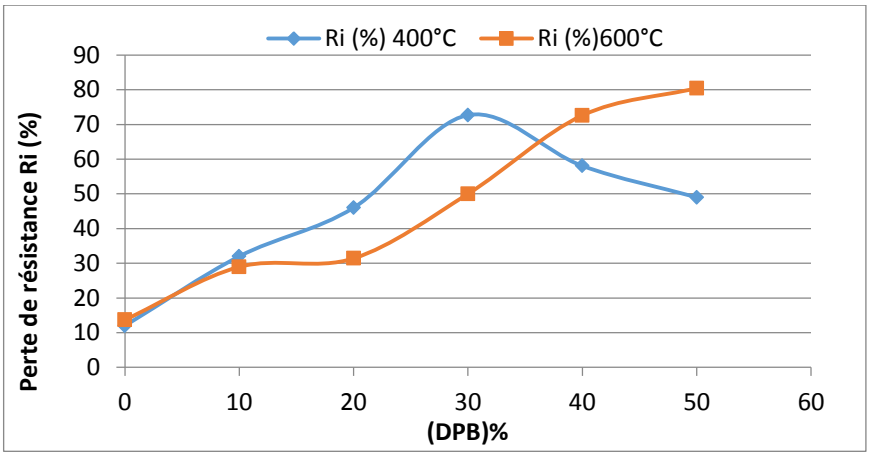


Figure IV.17: Perte de résistance en fonction de % (DPB)

Les résultats obtenus montrent qu'il y a toujours un pic de résistance à 400 °C pour tous les types de béton de sable. On enregistre aussi toujours à cette température une augmentation importante de la résistance à la compression. Les résultats indiquent aussi que la résistance à la compression des bétons de sable à base de DPB est plus faible que celle du béton de sable témoin.

On remarque aussi qu'au-delà de 400°C, il y a toujours une diminution quasi linéaire de la résistance à la compression pour tous les types de béton de sable.

Nous constatons alors que c'est l'eau non évaporable (notamment chimiquement liée dans leshydrates), qui participe à l'établissement des pressions internes qui jouent un rôle dele rapport de la résistance à chaud est diminué jusqu'à une faible résistance obtenus à 600°C, et cela est due à l'augmentation considérable de la porosité pour tous les bétons chauffés.

Aspect des éprouvettes

Les éprouvettes Avant le chauffage **les éprouvettes après le chauffage à 600 C°**



BST0%



BST0%



DPB10%



DPB10%



DPB20%



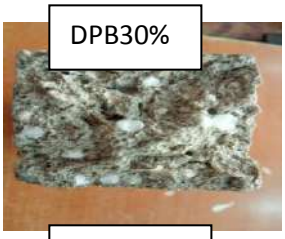
DPB20%



DPB30%



DPB30%



DPB40%



DPB40%



DPB50%



DPB50%

Dans ce chapitre, nous avons présentés les différents résultats des essais expérimentaux ainsi que leur interprétation à l'état frais et à létat durci des **BS** afin d'étudier l'influence des DPB sur les propriétés physico- mécaniques et thermique. On peut conclure que :

- La densité du béton de sable est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de DPB.
- l'air occlus de BS est diminue en fonction d'augmentation du DPB%.
- Les performances mécaniques (Rc et Rt) des bétons de sable sont diminuées en fonction d'augmentation du pourcentage de DPB%.
- La conductivité thermique du béton de sable est diminuée en fonction de substitution du sable par le DPB%.
- La porosité des bétons de sable est augmentée en fonction d'augmentation du pourcentage de DPB%.
- L'absorption capillaire des bétons de sable est augmentée en fonction de substitution du sable par le DPB.
- La substitution du sable par la poudre plastique engendre un retrait plus important par rapport au béton de sable de référence.
- Le gonflement sous l'eau de tous les bétons de sable à base de poudre plastique est moins important que les bétons de sable témoin.
- la perte de masse du béton de sable est augmentée en fonction d'incorporation de DPB.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effet du polystyrène et les copeaux de bois sur le comportement et la durabilité du béton de sable avec un nouveau procédé de traitement des billes etles copeaux de bois traité .

À la lumière des résultats obtenus, on peut conclure que :

- Le procédé de traitement à l'aide de la peinture lavable (acrylique) a donné satisfaction représentée par une augmentation de la densité de polystyrène 10 fois plus que celle à l'état pure. Ce qui facilite son utilisation (avec moins de ségrégation possible) dans le béton de sable.
- La maniabilité des différents mélanges de béton de sable étudiés avec l'ajout du polystyrène est située entre 7 est 10 seconde selon la recommandation avec un rapport E/C est un dosage en super plastifiant fixe.
- La résistance à la compression et à la traction du béton de sable diminue avec L'augmentation en pourcentage de polystyrène. Cette chute de résistance est due principalement à l'augmentation de la porosité du béton causée par la présence du polystyrène.
- La bonne corrélation linéaire entre la résistance à la compression et la densité du béton de sable avec le polystyrène et les copeaux de bois traduit l'effet bénéfique qu'engendre le polystyrène

traité et les copeaux de bois traité sur la diminution de la densité du BS sans retour négatif sur sa résistance à la

compression.

- L'absorption d'eau par capillarité du béton de sable augmente avec L'augmentation en pourcentage du polystyrène et les copeaux de bois.
- La faible rigidité des billes de polystyrène et les copeaux de bois engendre un effet négatif sur le retrait des bétons de sables.
- La faible adhérence béton–polystyrène conduit à la création de vides à L'intérieure du mélange et par conséquent augmente sa porosité, ce qui devient nécessaire de limiter le pourcentage d'ajout en polystyrène.

RECOMMANDATION

RECOMMANDATIONS

Dans la continuité des travaux réalisés dans le cadre de ce travail de recherche et sur la base des résultats intéressants trouvés, des travaux restent à mener dans plusieurs axes à savoir :

- L'étude de la rhéologie des bétons de sable à base des DPB .
- L'étude de la durabilité des bétons de sable allégé par les copeaux de bois et polystyrène ; (perméabilité à l'eau et au gaz, attaque par les acides et sulfate, carbonatation…..).
- Prévoir une modélisation des résultats permettant les prévisions sur les caractéristiques des bétons de sable des copeaux de bois et polystyrène.
- L'étude d'un autre type de béton avec ajout des copeaux de bois et polystyrène.

REFERENCE

BIBLIOGRAPHIQUE

Référence

[1] Zireg « INFLUENCE DE DIFFERENTS FACTEURS D‟ALLEGEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANIQUES ET THERMIQUES D‟UN BETON A MATRICE CALCAIRE-CIMENT» Thèse de magister 2005

[2]Tafraoui.A" « Caractérisation et valorisation du sable de l‟erg occidental Algérien dans le BUHP et l‟outillage ». Thèse de doctorat de l‟USTHB Alger.2007

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

[4] American Concrete Institute, Guide pour le béton de structure à base de granulats légers, Traduction du CATED, SDT BTP, 1970.

[5]R.Dupain, R.Lanchon, J.C.SaintArroman, Granulats, sols, ciments et Bétons, édition Casteilla, paris,1995

[6] 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.

[7]ACI 21 213R-87 « Guide for Structural Lightweight (Reapproved 1999) Aggregate concrete »

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

[9]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.

[10] Bederina .M: « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l‟ENPd‟Alger (2007).

[11] **Arnould.M et M Virlogeux** (1986):granulats de béton légers, Presses de l'écolenationale des ponts et chaussées ; Paris.

[12]GUEDDOUDA.M.K et al (9-11 Février 2007): Caractérisation et stabilisation des sols expansifs; colloque international, Sols et Matériaux à Problèmes ; Tunisie, pp.27-34.

[13]A. Ledhem, Contribution à l‟étude‟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.

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

[15] M. Benmalek, A. Bali : "Le béton de sable de dune, un matériau de construction performant pour le monde arabe" ; C.A.M, à DAMAS, Syrie (1-3 juin 1997).

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

[17] V.S Ramachandran, Utilisation des déchets et sous produits comme granulats du béton, CNRC construction, Juin 1981

[18]Bederina .M, Laidoudi .B, Goullieux .A, Khenfer .Mm, Bali .A Et Queneudec .M ; Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes ; Construction and Building Materials ;Volume 23, Issue 3, Pages 1311–1315 , March 2009.

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

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

[21] **P. Revil, J. Bipin,** Using technology to improve the performance of lightweight cement, Middle East Drilling Technology Conference Bahrain November 23& 25, 1997

[22]]**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 91.

[23] Z.Makloufi, Etude du béton calcaire du turonien de Laghouat, thèse de Magister de l'université de Laghouat, p159, 2001.

[24] A.Bouguerra, F.de Barquin, A. ledhem, RMDheilly, M Quenendec, étude de la porosité des Bétons de Bois à matrice argileuse : relation avec les propriétés mécaniques et thermiques, Soumis à Materials and Structure/Matériaux et Construction.

[25] N.Kaid ,H.Khelafi, Déformations de retrait d'un mortier pouzzolanique contenant 2% de fluidifiant, séminaire international de Geomat'02, université de M'Sila-Algerie 10-11 Mars 2003.

[26] A.Bougerra, H.sallée, F.de barquin , RM dheily, M quéneudec, isothermalmoistureproperties of wood-Cementitious composites, Cement and ConcreteResearch 29 (1999) pp339-347.

[27] 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.

[28] A.Bougerra, A.Ledhem, A.de Roodenbeke, M.Quenedec, Incorporation de déchets Argileux dans les Bétons de Bois propriétés mécanique et thermiques, Déchets-Sciences et Techniques N°4 Dec 96.

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

[30]P.Corman, Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, Paris, 1961.

[31]Norme française NF P 14-304 : Blocs en béton de granulats légers pour murs et cloisons.

[32]A.Sarja, Wood reinforced concrete, Natural fiber reinforced cement and concrete, Vol.5 Blackie, pp 63-91.

[33] A. Bouguerra, Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux: comportement hygrothermiques des matériaux élaborés, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1997.

[34] R.P.Bennett, R.Furgeaud,I.Paljak, Le béton cellulaire autoclavé : propriétés et utilisations Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux publics N.371 Oct 79 pp75-101.

[35] F.Z Aouadja . M .Mimonne , M. Laquerbe, Béton de Bois : variations de longueur et résistances mécaniques, Algérie Equipement.

[36] Belmecheri« Etude d'˝un composite à base de sable de dune, Ciment et granulats en billes de polystyrène expansé » Thèse de magister 2012

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

[38]Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, Etude et analyse du polystyrène expansé Avril 1998, Alger.

[39]Bing Chen, Juanyu Liu, Propreties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. Cement and ConcreteResearch 34 (2004), pp.1259-1263.

[40]J.M Chaix ; G.Laviales ; D.Quenard, structure et propriétés d'un matériauxpolyphasique modèle : le Béton légers isolant thermique, compte rendu de fin d'étude, CSTB Grenoble mars (1989).

[41] K Ganeshbabu, D. SaradhiBabu, Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, Cement and Concrete Composites 26(2004), pp.605-611.

[42] SKENDER Zakaria, « Durabilité du béton à base de concassage », mémoire de magister, ENP 2009.

[43]GUENDOUZ .M thèse de doctorat « Contribution a la formulation et a la caractérisation d'un-éco matériau de construction a base de déchets plastique : application au béton de sable»2017

[**44**] **Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées**(1994): Béton de sable, Caractéristiques et pratique d'utilisation ; Projet " SABLOCRETE ".

[45] Norme Française, NF P18-500 : Béton ; Béton de sable1995

[46] Norme Française, NF P 18- 541 : Granulats –Granulats pour béton hydraulique spécifications 1994

[**47]RAHMOUNE.M** « Elaboration d'un éco-matériaux allégé à base de polystyrène » mémoire de master juin 2018.

[48] Norme Française, NF P15-301 : Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité.

[49] Norme Française, NF P18-303 : Eau de gâchage pour béton

[50]ASTM C 618 « Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete »

[51] SAITI ISSAM, « Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA » thèse de magistère 2014

[52]Norme Française, NF EN 12350-6 « Essais pour béton frais – Partie 6 : masse volumique», avril 2012, (indice de clacement : P18 - 431 – 6)

[53] DEBOUCHA.W, LEKLOU .N, KHELIDJ .A, OUDJIT. M « L'EFFET DES FILLERS CALCAIRE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ET L'ABSORPTION CAPILLAIRE DU BETON », Conférence CITEDUB3 (Alger, 26 et 27 Septembre 2016).

[54] Norme Française, NFP 18-340 : Adjuvant spéciaux pour béton. Décembre 1998.

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

[56]Norme Française, 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.

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

[58] Norme algérienne, NA 451 Essais pour détermination les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Détermination de la teneur en eau pae séchage en étuve ventilée1998

[59] A. Batata, M. Zerouni(3-4 déc.1991) :"Le béton de sable de dune: sa performance et ses propriétés"; MATLOC91, Séminaire à Biskra (CNERIB)

[60]Norme Française NF P15-431 : Liants hydrauliques - Technique des essais - Détermination du temps de prise sur mortier normal 94

[61]Norme Française NF P15-473 : Méthodes d'essais des ciments – Partie 2 : analyse chimique des ciments (Indice de classement) 2006

[62]Norme algérienne, NA 442 Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

[63] Norme Française, NF P 18 - 452 « Béton – Mesure du temps d'ecoulement des

bétons et des morties aux maniabilimètres», Norme enregistrée, Mai 1988.

[64] Norme Francaise, NF P 15-437 « Liants hydrauliques – technique des essais – Caractérisation des ciments par mesure de fluidité sous vibration des moriers», Juin 1987.

[65] Norme Française NF P 18-353,: « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton », 2007.

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

[67]Norme algérienne, NA 5076 Essais pour béton durci-Résistance en compression – caractéristique des machines d'essai.

[68] AGEDEN - Energies Renouvelables en Isère « Propriétés et performances thermiques

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

[70] NF EN 993-15déterminations de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle) 2005

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

[72] 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

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

[74] Rahmani, E., et al. "On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles." Construction and Building Materials 47 (2013): 1302-1308.

[75] Allahvedi, Ali, Seyed Amin Azimi, and Mehdi Alibabaie."Development of multistrength grade green lightweight reactive powder concrete using expanded polystyrene beads."Construction and Building Materials 172 (2018): 457-467.

[76] CananTasdemir, OzkanSengul, and Mehmet Ali Tasdemir."A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes."Energy and Buildings 151 (2017): 469-475.

[77] M. Bederina1 , T. Bouziani1 , M. Khenfer1 , et M. Quéneudec « Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois »

[78]R. Sri Ravindrarajah, and A. J. Tuck. "Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads." Cement and Concrete Composites 16.4 (1994): 273- 277 *

[79]W. C.Tang, Y. Lo, and A. B. I. D. Nadeem. "Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete." Cement and Concrete Composites 30.5 (2008): 403-409.

[80] RamazanDemirbog, and Abdulkadir Kan. "Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes." Construction and Building Materials 35 (2012): 730-734.

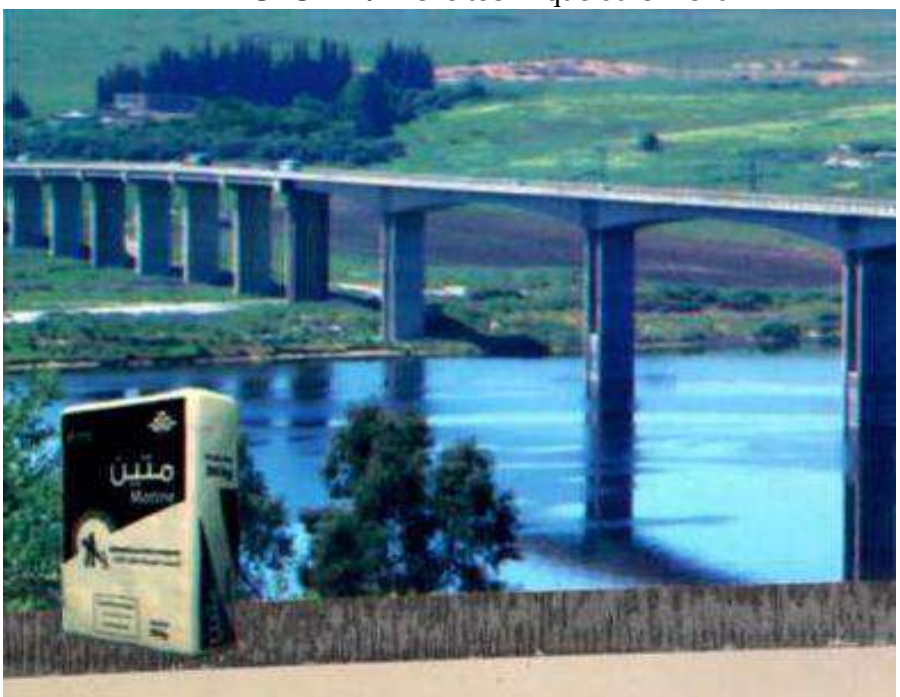
[81]Neville, Adam M. Properties of concrete. Vol. 4. London: Longman, 1995.

[82] K. Al Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R. M. Dheilly and M. Queneudec, Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites, Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 4, August 1999, Pages 269-276.

[83]HERIHIRI . O « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers ». MÉMOIRE DE MAGISTER 12 / 07 / 2010.

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 œuvre.

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 %

EPS+Bois (10%)	
EPS+Bois (20%)	
EPS+Bois (30%)	
EPS+Bois (40%)	
EPS+Bois (50%)	

Figure aspect des éprouvettes