

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

UNIVERSITE AMAR THELIDJI DE LAGHOUAT



Faculté de technologie

Département de Génie Civil

MEMOIRE DE MAGISTER

Option : Construction et Environnement

Présenté par : AHMED KOUIDRI

Ingénieur d'état en Génie Civil de l'Université de Laghouat

***Formulation et caractérisation physico-mécanique
et thermique d'un béton de sable de polystyrène***

- | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------|
| - Mr AZZOUZ Lakhdar | Professeur U.A.T. Laghouat | Président |
| - Mr BEDERINA Madani | Professeur U.A.T. Laghouat | Examineur |
| - Mr BENCHEIKH Boubakeur | M.C.U. Djelfa | Examineur |
| - Mr. KHENFER M ^{ed} Mouldi | Professeur U.A.T. Laghouat | Promoteur |
| - Mr ZIREGUE Ahmed | M.A.U. Laghouat | Co- Promoteur |

Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur, le Professeur **KHENFER Mohamed Mouldi**, qui m'a offert la possibilité de réaliser ce mémoire de magister sous sa direction. Je suis reconnaissant de la liberté et de la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail.*

*Je remercie vivement Monsieur le Recteur de l'université Amar TELIDJI de Laghouat, le Professeur **BENBERTAL Djamel**, pour ses encouragements et son soutien tout au long de la concrétisation de cette étude*

*Je remercie également Monsieur **AZZOUZ Lakhdar**, Professeur à l'Université de Laghouat, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury et d'examiner ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur **BEDERINA Madani** Professeur à l'Université de Laghouat ; à Monsieur **BENCHIKH Boubakeur**, Maître de conférences, à l'Université de Djelfa*

*Je remercie fortement Monsieur **GOUAL Mohamed Sayeh** Professeur à **ZIREGUE** l'Université de Laghouat, sans oublier mon Co-encadreur Monsieur **Ahmed**, Maître-assistant à l'université de Laghouat ainsi que Madame **DJOUZI Amina**, Maître-assistant à l'université de Laghouat, pour leur coopération dans l'accomplissement de ce projet . •*

*Je tiens également à exprimer mes remerciements à mes collègues et amis. Je pense en particulier à mon cher ami, Monsieur **CHOUCHA Abdelghani**, Vice-recteur à l'Université, pour sa contribution fructueuse ; Monsieur **BOUCEDRA Aissa**, Maître-assistant à l'Université de Laghouat, pour ses discussions profitables, ses encouragements, ses conseils judicieux et ses suggestions*

*Je ne saurais terminer ces remerciements sans mentionner mes amis et les membres de ma famille et spécialement Messieurs : **MEGOUSSI Khalifa**, Secrétaire général de l'Université, Monsieur **ROUIGHI Bachir** Secrétaire général de faculté, Monsieur **SAYAF Mohamed**, Chef de service, Monsieur **BAKCHICHE Tayeb**, Sous-directeur, qui m'ont soutenu et encouragé. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et mon amour pour eux .*

Mes remerciements vont également à tout le personnel de l'université de Laghouat, enseignants et personnels administratifs, en particulier ceux

Département de Génie Civil.

الهدف من الدراسة التي أجريت عبر هذه الأطروحة هو المساهمة في تـثمين النفايات الصناعية مثل الرمل الكلسي الناتج عن بقايا تكسير الأحجار الكلسية في مقالع الحصى ، ومن ناحية أخرى استخدام حبيبات البولستيران المصنعة المعروفة بوزنها الخفيف من خلال إدراجها في تطوير مواد بناء خفيفة الوزن ذات خصائص ميكانيكية وفيزيائية تستجيب لمتطلبات التنمية المستدامة وحماية البيئة.

في بادئ الأمر وبالأخذ بمعايير المقاومة والخليط تمت صياغة الخرسانة المخففة الوزن بحبيبات البولستيران .بعد ذلك وبالنظر إلى التطبيقات التي قمنا بها على خرسانة البولستيرين، فلقد سمحت بإظهار أثر تخفيف وزن الخرسانة الرملية عبر إضافة حبيبات البولستيرين، على الخصائص الميكانيكية والخصائص الفيزيائية والحرارية والتي لم تكن تغيراتها في نفس الاتجاه. هذه الملاحظة تتطلب البحث عن حل توافقي بين المقاومة الميكانيكية والراحة الحرارية، حيث ينبغي اعتبارها معياراً لاختيار هذه المواد حسب استخداماتها كمواد عازلة أو حامل عازلة.

Résumé:

L'étude entreprise dans ce mémoire est une contribution à la valorisation des déchets de l'industrie des carrières de concassage et des billes de polystyrène, connues par leur légèreté, et qui sont utilisés pour l'élaboration des bétons légers possédant des performances mécaniques et physiques répondant aux exigences du développement durable et de protection de l'environnement.

Dans un premier lieu et afin de répondre aux critères de résistance et de maniabilité, une formulation de bétons allégés par des billes polystyrène a été élaborée.

Ensuite, les travaux, effectués sur des bétons de polystyrène, ont permis de mettre en évidence l'effet d'allègement des bétons par le polystyrène sur les propriétés mécaniques et thermo physiques du matériau et qui ne varient pas dans le même sens.

Cette constatation exige la recherche d'un compromis entre résistance mécanique et confort thermique du matériau et qui doit être considérée comme un critère de choix de ces matériaux pour qu'ils soient utilisés comme des isolants ou des isolants porteurs.

Abstract :

The study undertaken in this thesis is a contribution to the recovery of waste from the crushing stones and polystyrene beads, known by their lightness, and are used for the development of lightweight concrete having mechanical performance and meet the physical requirements of sustainable development and environmental protection. At first, and in order to meet the criteria of strength and workability, a concrete mix design lightened by adding polystyrene beads was developed.

Then, the works performed on polystyrene concrete, helped to highlight the effect of lightening of concrete using polystyrene on mechanical and thermo- physical properties of the material which they do not change in the same direction.

This finding requires a search for a compromise between mechanical strength and thermal comfort of the material so that be considered as a criterion of choice of these materials in order to be used as insulators or carriers insulators.

Listes des notations et symboles

- b : côté d'une section [mm]
C : compacité [%]
P : porosité [%]
C : coefficient de courbure
C_u : coefficient d'uniformité
Esp : équivalente du sable par piston [%].
Esv : équivalente du sable par vue [%]
F_c, F_f : charge de rupture en compression et en flexion [N]
i : l'augmentation de la masse [g/mm²]
L : longueur de l'éprouvette
M : masse [Kg]
M_f : module de finesse
∑R_{cu} : la somme des refus cumulés [Kg]
R_c : résistance à la compression [MPa]
R_f : résistance à la flexion [MPa]
S : absorptivité mm/min^{0.5}
T : température [°c]
t : temps[min]
ρ_{app} : la masse volumique apparente [Kg/m³]
ρ_w : la masse volumique de l'eau [Kg/m³]
ρ_s : masse volumique absolue [Kg/m³]
λ : conductivité thermique [w.m⁻¹.k⁻¹]
MSLP : matrice sable léger de polystyrène
MCLP : matrice ciment léger de polystyrène

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I Généralités sur les bétons légers

Figure I.1: Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés (Arg) et de cendres volantes frittées (Cv), granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g	09
Figure I.2: Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique	11
Figure I.3: Variation du rapport E/C en fonction des fines	15
Figure I.4 : Variation de la compacité du mélange ciment en fonction de filler calcaire	16
Figure I.5: Variation de la masse volumique apparente en fonction de pourcentage de fines	17
Figure I.6: Variation de la densité en fonction des taux de fines	17
Figure I.7: Variation de la résistance à la compression pour une granulométrie grosse, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S : Argile/Sable)	17
Figure I.8: Variation de la résistance à la compression pour une granulométrie fine, et rapport Ciment/Sable =1/4.2, (A/S:Argile/Sable)	18
Figure I.9: Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines	18
Figure I.10: Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux De fillers	19
Figure I.11: Résistance relative à la traction des mortiers avec fines calcaires	20
Figure I.12: Résistance à la traction des mortiers (dosage 250kg/m^3)	21
Figure I.13: Résistance à la traction des mortiers (dosage 325kg/m^3)	21
Figure I.14: Pavé en béton de PSE.	22
Figure I.15: Mur en blocs de béton de PSE.	22
Figure I.16: Cloison en Béton de PSE Projeté	23
Figure I.17: Installation d'un plancher béton de PSE	23
Figure I.18: Structure chimique du polystyrène	24
Figure I.19: Structure alvéolaire du polystyrène	26
Figure I.20: Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène	27
Figure I.21: Résultats des contraintes maximales de compression uniaxial pour éprouvettes humides et sèches à base de billes non enrobées	28

LISTE DES FIGURES

Figure I.22 : Variation du retrait du béton de polystyrène en fonction du dosage en polystyrène	28
Figure I.23: Variation de la conductivité thermique des bétons allégés avec les billes de polystyrène en fonction de la teneur en eau	29
Figure I.24: Variation de l'absorption initiale à 30 min et l'absorption finale	31
CHAPITRE II Matériaux de base et techniques expérimentales	
Figure II.1: Diffractogramme du ciment CPJ 45	34
Figure II.2 : Le Chatelier	37
Figure II.3: Récipientstandard.	37
Figure II.4: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge	38
Figure II.5: Détermination du début et fin de prise	38
Figure II.6 Echantillons du sable calcaire utilisé	39
Figure II.7 : Appareillage pour l'analyse granulométrique par tamisage	40
Figure II.8 : Courbes granulométriques de sable calcaire	41
Figure II.9 : Détermination de l'équivalent de sable	42
Figure II.10 Echantillons des billes de polystyrène expansés	43
Figure II.11 : Pycnomètre rempli d'eau+échantillon	44
Figure II.12 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique de polystyrène expansé	44
Figure II.13: ManiabilimètreB	47
FigureII.14: Machine utilisée pour la mesure des résistances mécaniques	48
Figure II.15 : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression	48
Figure II.16: l'appareille pour la mesure du retrait	49
Figure II.17.: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire	50
Figure II.18 : Schéma de la sonde TPS	51
Figure II.19 : Dispositif de serrage,sonde, éprouvette	51
Figure II. 20 : Vue d'une sonde Hot disc	52
Figure II.21 : Dispositif expérimental pour la mesure de la caractéristique thermique (méthode TPS)	53
Figure II.22 : Schéma de la sonde TPS (mesure caractéristiques thermiques du polystyrène)	53
Figure II.23: Microscope Optique LEICA	54

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE III Formulation et caractérisation des bétons de polystyrène

Figure III.1 : Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C	58
Figure III.2: Malaxeur utilisé pour la confection des éprouvettes	59
Figure III.3 : Moules utilisés pour l'essai mécanique	60
Figure III.4 : Moules utilisés pour l'essai de variation dimensionnelle	60
Figure III.5: Variation de la masse volumique de la matrice ciment en fonction du dosage en granulats de polystyrène	62
Figure III.6 : Variation de la masse volumique de la matrice ciment + sable en fonction du dosage en granulats de polystyrène	62
Figure III.7 : Variation de la masse volumique du MCLP, $D = 1/2.5$ mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cure	63
Figure III.8 : Variation de la masse volumique du MCLP, $D = 3.15/4$ mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cure	64
Figure III.9 : Variation de la masse volumique du MSLP, $D = 1/2.5$ mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cure	65
Figure III.10 : Variation de la masse volumique du MSLP, $D = 3.15/4$ mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cure	65
Figure III.11 : Variation de la résistance à la compression de MCLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'air libre	67
Figure III.12 : Variation de la résistance à la compression de MCLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'eau	67
Figure III.13 : Variation de la résistance à la compression de MSLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'air libre	68
Figure III.14 : Variation de la résistance à la compression de MSLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'eau	68
Figure III.15: Variation de retrait de MCLP, $D = 1/2.5$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	70
Figure III.16: Variation de retrait de MCLP, $D = 3,15/4$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	70
Figure III.17: Variation de retrait de MSLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	71
Figure III.18 : Variation de retrait de MSLP, $D = 3,15/4$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	71
Figure III.19 : Variation de gonflement de MCLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de l'âge de	

LISTE DES FIGURES

l'éprouvette	72
Figure III.20 : Variation de gonflement de MCLP, $D = 3,15/4$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	72
Figure III.21 : Variation de gonflement de MSLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	73
Figure III.22 : Variation de gonflement de MSLP, $D = 3,15/4$ mm en fonction de l'âge de l'éprouvette	73
Figure III.23 : Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour MSLP Milieux de conservation :Airlibre	74
Figure III.24 : Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour MSLP Milieux de conservation:Eau	74
Figure III.25 : Variation de conductivité thermique de MCLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de masse volumique	76
Figure III.26 : Variation de conductivité thermique de MCLP, $D = 3.15 /4$ mm en fonction de masse volumique	76
Figure III.27 : Variation de conductivité thermique de MSLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de masse volumique	77
Figure III.28 : Variation de conductivité thermique de MSLP, $D = 3.15 /4$ mm en fonction de masse volumique	77
Figure III.29 : Variation de conductivité thermique de MSLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de la résistance à la compression	78
Figure III.30 : Variation de conductivité thermique de MSLP, $D = 3.15 /4$ mm en fonction de la résistance à la compression	79
Figure III.31 : Variation de la masse volumique de MSLP, $D = 1 /2.5$ mm en fonction de la résistance à la compression	80
Figure III.32 : Variation de de la masse volumique de MSLP, $D = 3.15 /4$ mm en fonction de la résistance à la compression	81
Figure III.33 : Schéma représentatif du modèle d'homogénéisation auto cohérente dans le cas d'un matériau (Bi-phasique)	82
Figure III.34 : Comparaison des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'homogénéisation auto- cohérente et le modèle d'Assaad (MSLP 1/2,5 à l'état sec et saturé).	83

LISTE DES FIGURES

- Figure III.35:** Comparaison des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente et le modèle d'Assaad (MSLP 3.15 /4 à l'état sec et saturé). 83
- Figure III.36:** Photosvisuelle des coupes d'échantillons de MCLPet MSLP 84
- Figure III.37:** Photosmicroscopique des coupes d'échantillons de MCLPet MSLP 85

Liste des Tableaux

CHAPITRE I Généralités sur les bétons légers

Tableau I.1: Choix des granulats en fonction des classes de béton	08
Tableau I.2 : Coefficient de dilatation de quelques types de bétons légers	10
Tableau I.3: Module d'élasticité de quelques types de bétons légers	12
Tableau I.4 : Variations dimensionnelles de bétons légers	12
Tableau I.5: Conductivité thermique des bétons de polystyrène	30
Tableau I.6: Détails des séries de bétons élaborés	30

CHAPITRE II Matériaux de base et techniques expérimentales

Tableau II.1: Analyse chimique du ciment utilisé	34
Tableau II.2: Temps du début de prise et de la fin de prise de ciment	38
Tableau II.3: Analyse granulométrique du sable calcaire	41
Tableau II.4: Résultats de l'essai de L'équivalent de sable calcaire	43
Tableau II.5: Caractéristiques physiques des granulats polystyrène expansé	45
Tableau II.6: Analyse granulométrique des granulats de polystyrène de diamètre 1/2.5	45
Tableau II.7: Analyse granulométrique des granulats de polystyrène de diamètre 3.15/4	45
Tableau II.8: Composition chimique de l'eau de gâchage	46
Tableau II.9: Caractéristiques thermiques du polystyrène	54

CHAPITRE III Formulation et caractérisation des bétons de polystyrène

Tableau III.1: Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C	57
Tableau III.2: Compositions pondérales de MCLP	58
Tableau III.3: Compositions pondérales de MSLP	59
Tableau III.4 : Valeur du temps Vébé en fonction du dosage en granulats	61
Tableau III.5: Variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression pour différents classes et pourcentages de polystyrène en milieu sec	79
Tableau III.6: Variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression pour différents classes et pourcentages de polystyrène en milieu sec	80

Table des matières

Résumé

Dédicace

Remerciement

Listes des notations et symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 01

CHAPITRE I Généralités sur les bétons légers

Introduction 04

I. Classification des bétons légers 04

I.1. Classification basée sur la composition 04

I.1.1. Les bétons caverneux 04

I.1.2. Les bétons cellulaires 05

I.1.3. Les bétons de granulats légers 05

I.2. Classification basée sur l'utilisation 05

I.2.1. Les bétons de remplissage 05

I.2.2. Les bétons porteurs et isolants 06

I.2.3. Les bétons de structure 06

I.3. Classification des granulats légers 06

I.3.1. Forme des grains et aspect de surface 07

I.3.2. Taille des granulats 07

I.3.3. Masse volumique 08

I.3.4. Résistance des granulats 08

I.3.5. Porosité et absorption 08

II. Caractérisation physiques des bétons légers 09

II.1. Masse volumique apparente 09

II.2. Variations dimensionnelles 09

II.3. Aspect acoustique 10

II.4. Conductivité thermique 10

III. Caractérisation mécaniques des bétons légers 11

III.1. Résistance à la compression 11

Table des matières

III.2. Module d'élasticité et cisaillement	11
III.3. Retrait de fabrication et fluage	12
III.4. Durabilité des bétons légers	13
IV. Principaux avantages des bétons légers et utilisations	13
IV.1. Utilisations diverses des bétons légers	14
IV.2. Aspect environnemental des bétons légers	14
V. Effet des fines des sables calcaire sur les propriétés des bétons	14
V.1. Influence des fines calcaires sur le rapport E/ C	15
V.2. Influence des fines calcaires sur la compacité	16
V.3. Influence des fines calcaires sur la résistance à la compression	17
V.4. Influence des fines calcaires sur la résistance à la traction	20
VI. Etude des bétons légers de granulats de polystyrène	21
VI.1. Avantages du béton de polystyrène	22
VI.2. Le polystyrène	23
VI.2.1. composition chimique	23
VI.2.2. Fabrication du polystyrène expansé	24
VI.2.3. Propriétés du polystyrène	25
VI.2.4. Billes de polystyrène	25
VI.2.5. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène	25
VI.3. Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène	27
VI.3.1. Résistance à la compression	27
VI.3. 2. Module d'élasticité et retrait	28
VI.3. 3. Conductivité thermique	29
VI.5. Durabilité des bétons légers de polystyrène	30
VI.6. Absorption des bétons légers de polystyrène	31
VII. Conclusion	32
CHAPITRE II Matériaux de base et techniques expérimentales	
Introduction	34

Table des matières

I. Caractéristiques des matériaux premiers	34
I.1. Le ciment	34
I.1.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques	34
I.1.2. Masse volumique absolue	35
I.1.3. Masse volumique apparente	36
I.1.4. Compacité et Porosité	37
I.1.5. Prise	38
I.2. Sable calcaire	39
I.2.1. Masse volumique absolue	39
I.2.2. Masse volumique apparente	40
I.2.3. Compacité et Porosité	40
I.2.4. Analyse granulométrique par tamisage	40
I.2.5. Equivalent de sable	42
I.3. Granulats des billes de polystyrène	43
I.3.1 Masse volumique absolue	44
I.3.2 Analyse granulométrique des billes de polystyrène par tamisage	45
I.4. Caractérisation de l'eau de gâchage	46
II. Caractérisation du béton frais	47
II.1 Essai de consistance	47
III. Caractérisation du béton durci	47
III.1. Masse volumique apparente des bétons	47
III.2. Résistance à la compression	48
III.3. Variation dimensionnelles (mesure de retrait et de gonflement)	48
III.4. Essai d'absorption d'eau	49
III.4.1. Essai de l'absorption capillaire	49
III.5. Caractéristiques thermiques	50
III.5.1 .Méthodes de mesure des paramètres thermiques	50
III.5.2. Dispositif expérimental	51
III.5.3. Avantages de la méthode TPS	51
III.5.4. Conception de l'élément TPS	52
III.5.5 .Conductivité thermique de polystyrène utilise	53

Table des matières

III.6. Microscope Optique LEICADMLM	54
IV. Conclusion	55
CHAPITRE III Formulation et caractérisation des bétons de polystyrène	
Introduction	57
I. Formulation de la matrice cimentaire	57
II. Formulation de la matrice ciment+sable	58
III. Préparation des éprouvettes	59
III.1. Mode de malaxage de béton de polystyrène	60
III.2. Mise en moule	60
III.3. Mode de conservation	61
IV. Caractérisation des bétons frais	61
IV.1. Consistance et maniabilité	61
IV.2. Etude de la masse volumique du béton frais	62
V. Caractéristiques des bétons durcis	63
V.1: Variation de la masse volumique apparente en fonction du dosage en granulats de polystyrène	63
V.2. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en granulats de polystyrène	66
V. 3. Variation dimensionnelle	69
V.3.1. Variation de retrait de MCLP	70
V.3.2. Variation de retrait de MSLP	71
V.3. 3. Variation de gonflement de MCLP	72
V.3. 4. Variation de gonflement de MSLP	73
VI. Essai d’Absorption d’eau par capillarité des bétons légers de polystyrène	74
VII. Caractéristiques thermiques	75

Table des matières

VII.1. Variation des caractéristiques thermiques en fonction de la masse volumique	75
VII.2. Variation des caractéristiques thermiques en fonction de résistance a la compression	78
VII.3. Variation des caractéristiques physiques en fonction de résistance a la compression	80
VIII. Etude de modélisation des bétons légers de polystyrène	81
VIII.1. Modèle d'homogénéisation Auto-Cohérente	81
VIII.2. Modèle Assaad	82
IX. Microstructure des bétons légers de polystyrène	84
IX.1. Apparence visuelle	84
IX.2. Apparence microscopique	85
X. Conclusions	85
Conclusion générale et recommandation	88
Références bibliographiques	

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, une nouvelle politique appelée développement durable est entreprise afin de répondre aux nouvelles exigences de la vie. En effet, le développement durable repose sur les trois aspects : le confort, l'économie et l'environnement. A cet effet, les recherches dans le domaine de génie civil se sont réorientées vers l'étude et le développement de nouveaux matériaux tout en considérant le côté économique.

Le secteur de la construction, grand consommateur de granulats naturels, exprime le besoin de matériaux nouveaux présentant des propriétés particulières ou améliorées par rapport aux matériaux classiques. En outre de nos jours, dans tous les pays du monde, il y'a cette tendance à développer de nouvelles techniques simples dont les performances technologiques seront adaptées pour répondre à ces nécessités ainsi qu'aux besoins de la construction et de faire apparaître l'intérêt économique.

De nouveaux types de bétons, dits bétons légers, ont ainsi été développés. A travers le monde, ces bétons légers sont utilisés dans tous les secteurs de bâtiments et travaux publics, et il n'y a pas de champs d'emploi de béton normal qui ne puisse pas être substitué par l'utilisation des bétons légers. Dans notre pays, les dépenses excessives d'énergie pour le réchauffement et la climatisation des habitats, surtout dans les zones du sud, a incité les autorités du secteur de l'habitat à lancer un programme national appelé programme **HPE** (habitat à hautes performances énergétiques). En considérant qu'une grande partie de chaleur passe à travers le plancher, le matériau utilisé pour la réalisation des chapes doit en premier lieu avoir de performances thermiques excellentes et possède une masse volumique relativement faible.

Dans ce cadre nous avons proposé de mettre en œuvre un béton léger à base de billes de polystyrène incorporées dans une matrice cimentaire à base de sable calcaire. En effet, les carrières de sable des oueds et de mer ont connu ces dernières années une surexploitation excessive provoquant un dépaysement atroce. En revanche les industries de carrières génèrent des quantités énormes de déchets de calcaire pouvant être utilisés dans les bétons. D'autre part le polystyrène expansé, connu par sa légèreté et son excellent pouvoir isolant, peut-être le granulats idéal pour un tel matériau.

Introduction générale

Notre mémoire est composé de *trois chapitres principaux* :

- le premier chapitre sera consacré à une étude bibliographique exhaustive sur le béton léger, sur le béton de sable calcaire et sur les bétons de polystyrène.
- Un deuxième chapitre portera sur la caractérisation des matériaux et les méthodes expérimentales pour valoriser les matériaux en question.
- Le troisième chapitre abordera la formulation et la manufacture des différents bétons en fonction de différentes compositions et dosages afin d'obtenir la composition adéquate ainsi que l'interprétation des résultats expérimentaux et leur confrontation avec les différentes études récentes expérimentales et thermiques.

Enfin, notre travail est soldé par une conclusion générale qui regroupe les résultats de notre recherche tout en répondant aux objectifs initialement visés.

Introduction

Le béton est un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats naturels (sable, gravillons) ou artificiels (granulats légers) agglomérés par un liant. Le liant peut être qualifié d'hydraulique, lorsque sa prise se fait par hydratation. Ce liant est habituellement du ciment, on obtient dans ce cas un « béton de ciment » l'un des plus fréquemment utilisés.

Le béton varie en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation par ses performances et par son aspect, on distingue :

- les bétons courants ;
- les bétons lourds;
- les bétons de granulats légers ;
- les bétons cellulaires ;
- les bétons fibrés;
- les BHP, lesBAP.

Parmi ces bétons cités ci-dessus, les bétons de granulats légers ou simplement les bétons légers qui sont en train de gagner du terrain, permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés. Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique ; la conductivité variant dans le même sens que la densité.

Concernant le béton de sable calcaire, et puisqu'il représente le constituant de base de notre composite, nous avons dressé un état de connaissance sur son historique, sur ses constituants, sur sa formulation et sur ses domaines d'applications du moment qu'il constitue une partie de la construction des parois et les dalles ainsi que les chapes pour remédier aux irrégularités du gros béton à savoir l'étanchéité. Les bétons légers sont néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction [1].

I. Classification des bétons légers

La classification des bétons légers est basée essentiellement sur les compositions et sur l'utilisation du béton.

I.1. Classification basée sur la composition

I.1.1. Les bétons caverneux

Les bétons caverneux sont des bétons constitués d'un squelette de granulats légers ou non, ayant

Sensiblement la même grosseur et d'un liant assurant l'enrobage et le collage des grains entre eux. En fait, il s'agit de bétons dont on a supprimé tout ou une partie des éléments fins et le liant correspondant servant à leur enrobage avec les granulats courants, la densité peut être de l'ordre de 1.6 à 1.8 t/m³. On peut descendre au-dessous avec les granulats légers (0.7 à 1 avec de l'argile expansé). Les résistances mécaniques sont très faibles (en compression, on a en général $3 < f_{c28} < 7 \text{ MPa}$ [2]. Le but recherché est un matériau économique, un gain de légèreté et une bonne isolation thermique.

I.1.2. Les bétons cellulaires

Dans le cas des bétons cellulaires, on génère dans une pâte de nature hydraulique des petites bulles d'air ($\emptyset \cong 1 \text{ mm}$) ou d'un gaz spécial pour former une structure cellulaire après séchage [3]. Il existe deux principales méthodes pour créer la structure cellulaire, la première consiste en une réaction chimique dans la masse, la deuxième utilise un agent moussant d'où la division en deux catégories : le béton gaz et le béton mousse.

Les résistances en traction sont en général de l'ordre de 30 % de celles en compression. [2] Le but recherché est d'avoir une très grande légèreté, une très bonne isolation thermique et une grande résistance au feu.

I.1.3. Les bétons de granulats légers

Dans les bétons de granulats légers, les granulats normaux sont remplacés par des granulats légers présentant une structure alvéolée ou cellulaire. Le but recherché est la légèreté mais surtout la bonne résistance mécanique. Parmi ces granulats, on trouve :

1. granulats minéraux naturels préparés et non préparés,
2. granulats artificiels préparés et non préparés,
3. matériaux organiques.

I.2. Classification basée sur l'utilisation

I.2.1. Les bétons de remplissage

Leurs masses volumiques sont faibles et comprises entre 300 et 1000 kg/m³, ils sont non ou peu porteurs, [4]. Leurs résistances en compression sont souvent faibles. Ils sont en général de bons isolants thermiques. Leur constitution est d'ailleurs souvent caverneuse ou cellulaire.

On les utilise donc principalement pour le remplissage de murs non ou peu porteurs, pour la fabrication de formes de pente de toiture -terrasses et d'éléments manufacturés.

I.2.2. Les bétons porteurs et isolants

Leur masse volumique est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, [4].

Ils présentent des caractéristiques mécaniques nettement meilleures à celles des bétons précédents.

Les qualités isolantes de ces types de bétons sont naturellement inférieures mais suffisantes pour assurer le confort thermique sous certaines épaisseurs.

On les utilise principalement pour la fabrication des pièces préfabriquées (panneaux, dalles,...) ou murs banchés.

I.2.3. Les bétons de structure

Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Dans cette classe figurent les bétons destinés à être armés ou précontraints pour la constitution de structures. Ils présentent des résistances mécaniques importantes qui peuvent être du même ordre que celles des bétons pleins normaux, leur isolation thermique est relativement faible.

I.3. Classification des granulats légers

Les granulats légers sont des granulats ayant une masse volumique réelle ne dépassant pas 2000 kg/m³ ou une masse volumique en vrac ne dépassant pas 1200 kg/m³[5]. Les granulats légers peuvent être classés selon leur nature comme suit:

- **Matériaux minéraux naturels non préparés** : Par définition ce sont des matériaux qui n'ont subi que des traitements mécaniques tels que lavage, broyage, tamisage. Les granulats les plus connus dans cette catégorie sont : la ponce, les pouzzolanes, roches d'origine volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques. [6] et [7]

- **Matériaux minéraux naturels préparés** : Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emploi 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 spécial, 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 [7].

- 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 [8].

- 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 répandus les granulats de bois (copeaux ou sciure) et le liège expansé.

Le choix du type de granulats légers doit prendre en considération chaque propriété du granulat [8].

I.3.1. Forme des grains et aspect de surface

La forme et en particulier l'aspect de surface influent sur l'adhérence matrice-ciment. Les granulats légers peuvent présenter des différences considérables quant à la forme et l'aspect des grains, suivant l'origine et les procédés de fabrication. La forme peut être cubique et assez régulière, en majorité arrondie ou anguleuse et irrégulière. Les aspects de surface peuvent aller depuis l'aspect relativement lisse avec des alvéoles fins jusqu'à l'aspect irrégulier avec des alvéoles petits ou gros. [8]

I.3.2. Taille des granulats

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

- Les granulats légers fins : Ils sont principalement composés de matériaux cellulaires d'origine minérale, conforme aux prescriptions suivantes :

- a) Ils conviennent à la fabrication de béton léger.
- b) Ils ont une granulométrie inférieure à 5mm.
- c) Ils ont une densité sèche inférieure à 1100 kg/m^3 .

- Les gros granulats légers:

- a) Ils conviennent à la fabrication de béton léger de structure.
- b) Ils ont une granulométrie de 5 à 19mm.

c) Ils ont une densité sèche inférieure à 880 kg/m^3 .

I.3.3. Masse volumique

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

Le tableau I-1 fixe le choix des granulats en fonction de la classe du béton :

Tableau I-1: Choix des granulats en fonction des classes de béton. [9]

(+) utilisation recommandée + utilisation possible 0 utilisation impossible

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

I.3.4. Résistance des granulats

La résistance des granulats varie selon leur type et leur origine ; les granulats de béton de structure sont généralement durs et résistants et contribuent, en conséquence, dans la résistance du béton. Pour les bétons destinés à la fabrication d'éléments de construction isolants et isolants porteurs, la résistance des granulats n'est pas d'une grande importance, puisqu'en général ces granulats sont friables et peu solides et ne contribuent en aucun cas à la résistance, bien évident, ils sont à l'origine des faibles résistances de ces bétons [9].

I.3.5. Porosité et absorption

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75%.

[6]. La taille et la distribution des pores

influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption.

Les données de la littérature montrent que le taux d'absorption d'eau des granulats légers artificiels est très élevé, plus de 50% de l'absorption dès les toutes premières minutes [10] voir figure I.1 ci-dessous.

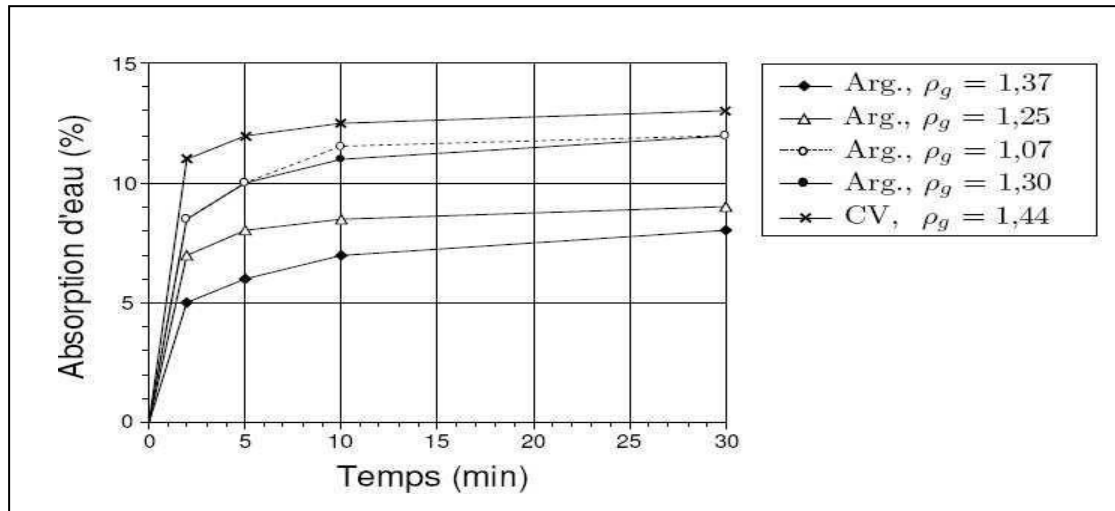


Figure I.1: Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés (Arg) et de cendres volantes frittées (Cv), granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g ; d'après [10].

Par ailleurs, la porosité des granulats légers varie proportionnellement à la taille des grains. Par conséquent, plus la taille des granulats diminue, moins ils sont poreux et plus leur densité apparente augmente. Les cendres volantes frittées, sont les plus absorbantes comparativement à l'argile expansée ; étant donné l'interconnexion plus élevée entre les pores. Le problème qui se pose lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers est qu'une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par les granulats légers. Certains moyens tel que le pré mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption d'eau des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers [11].

La nature des granulats et le taux d'humidité ont une grande influence sur les caractéristiques thermiques.

II. Caractérisation physiques des bétons légers

II.1. Masse volumique apparente

C'est la caractéristique principale d'un béton léger. En effet, pratiquement tout dépend d'elle, que ce

Soit les propriétés mécaniques, les propriétés thermiques ou même certaines variations dimensionnelles. Elle est inférieure à 1800 kg/m^3 [8].

II.2. Variations dimensionnelles

Le problème du retrait de fabrication et des variations dimensionnelle post-fabrication des bétons légers a toujours été l'une des préoccupations essentielles des entreprises et des bureaux de contrôle, car ces phénomènes risquent de se traduire par l'apparition de fissures nuisant à la qualité finale des constructions.

Dans le cas des bétons légers, ces coefficients se trouvent plus faibles que ceux des bétons normaux et la valeur moyenne se situe entre 7 et $9 \cdot 10^{-6} \cdot 1/C^\circ$ selon le type de granulats (tableau ci-dessous)

Tableau I.2 : Coefficient de dilatation de quelques types de bétons légers [12].

Type de bétons	Coefficient de dilatation en $10^{-6}/C^\circ$	
	Aux températures normales	Aux hautes températures
- Laitier expansé	7 à 12	6 à 11
-Argile et schiste expansés	5 à 8	4 à 5
- Ponce	10	8 à 9
- Pouzzolane	7	5

II.3. Aspect acoustique

L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger est, avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'air. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures à celle prévues par la « loi de masse ». Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm [13].

II.4. Conductivité thermique

L'intérêt des bétons légers dans ce domaine est de pouvoir satisfaire, non seulement aux exigences

thermiques, mais de pouvoir en même temps présenter des résistances mécaniques acceptables. Toutefois, il faut signaler que ces bétons contiennent, généralement, beaucoup d'eau au moment de leur fabrication ou de leur mise en œuvre. Cette eau peut rester plusieurs mois, voire plusieurs années, pour s'évacuer. Tout dépend bien sûr du climat et des possibilités de séchage par le chauffage. Les coefficients d'isolation prévus risquent donc de ne pas être atteints dans les premiers âges [13].

III. Caractérisation mécaniques des bétons légers

III.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton léger est d'autant plus élevée que la résistance spécifique des granulats légers utilisés. Cette résistance augmente avec la masse volumique. Toutefois le choix d'un béton se fait en fonction de type d'ouvrage et de son utilisation [14]. (Figures I-2).

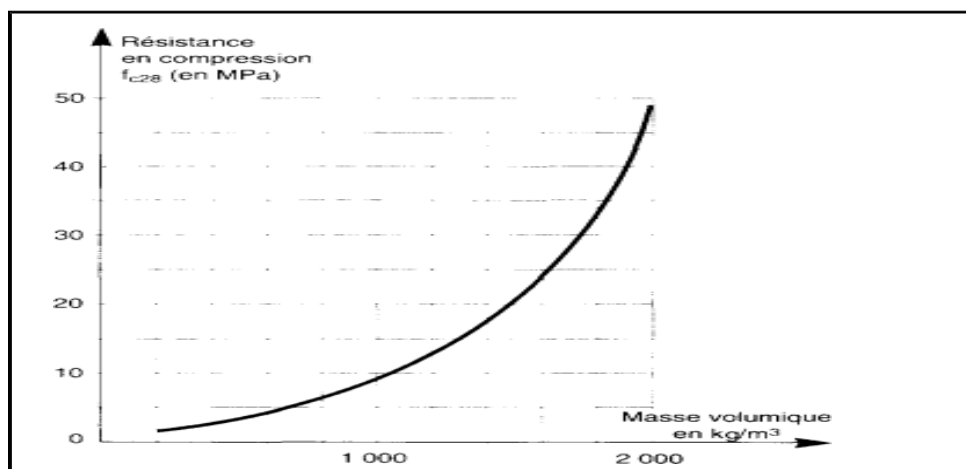


Figure I.2: Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique [3]

III.2. Module d'élasticité et cisaillement

D'après [15] le module d'élasticité des bétons légers est fonction de leurs masses volumiques apparente et leur résistance à la compression. La formule retenue pour les calculs est :

$$E_b = \delta_b 6000 \sqrt{\sigma_{jm}}$$

Avec : δ_b masse volumique apparente du béton en t/m^3 ;

σ_{jm} résistance à la compression du béton sur cubes en kg/cm^2 à (j) jours.

Le tableau ci- dessous donne quelques valeurs pour différents types de bétons légers.

Tableau I.3: Module d'élasticité de quelques types de bétons légers [15]

Type de béton	Eb (kg/cm ²)
Béton de ponce	30 à 70 000
Béton de laitier expansé	40 à 125 000
Béton de laitier expansé + sable	70 à 170 000
Béton d'argile ou schiste expansé	60 à 220 000
Béton de perlite	10 à 30 000
Béton de vermiculite	8 à 17 000
Béton cellulaire autoclave	17 500
Béton de cendre volante frittée	100 à 220 000

Comme pour les modules d'élasticité, les valeurs du cisaillement sont plus faibles que pour les bétons normaux. La plupart des valeurs se situent à 60 % de celles des bétons normaux pour des résistances à la compression comparables. Cela s'explique à notre avis par la faible résistance des granulats légers et leurs formes moins anguleux favorisent le cisaillement [16].

III.3. Retrait de fabrication et fluage

Le retrait de fabrication est le résultat du phénomène de prise et de durcissement des bétons lié à l'évacuation d'une certaine quantité d'eau comprise dans ces bétons. Il se traduit par une diminution parfois importante des côtés des pièces fabriquées. Le tableau ci-dessous présente variations dimensionnelles de bétons légers.

Tableau I.4 : Variations dimensionnelles de bétons légers [12].

Type de béton	Retrait de fabrication (mm/m) conditions normales	Variations dimensionnelles (mm/m) Après stabilisation
Bétons normaux pleins	0.30 à 0.50	0.20 à 0.35
Bétons normaux caverneux	0.20 à 0.30	0.15
Bétons d'argile expansée	0.40 à 0.70	0.20 à 0.40
Bétons de schiste expansé	0.35 à 0.90	0.20 à 0.30
Bétons de Mâchefer	0.40 à 1.20	0.30 à 0.40
Bétons de cendres volantes frittés	0.20 à 0.85	0.30
Bétons de granulats végétaux (sciures, liège, etc.)	-	-
Bétons de ponce	5 et plus	-
Bétons cellulaires crus	-	0.50
Bétons cellulaires autoclaves	0.60 à 1.30	-
	4	-
	0.50 et plus	0.36 à 0.45

D'après le tableau I.4, il se montre que les bétons légers, à l'exception des bétons caverneux, subissent plus de retrait que les bétons normaux : environ le double, il peut atteindre 0.5 à 1 mm/m et même quelque fois 5 mm/m pour certains d'entre eux.

Les variations dimensionnelles hygrothermiques dépendent des conditions de température et d'hygrométrie mais aussi, comme le retrait, elles dépendent essentiellement des caractéristiques du matériau. Si elles sont réversibles, il faut tenir compte de leur importance dans la conception des ouvrages (par exemple : longueur des murs à ne pas dépasser pour éviter des fissurations).

Consternant le fluage il peut entraîner de graves conséquences si l'on n'en tient pas compte. On risque donc des pertes de précontraintes (jusqu'à 25 %) et des excès de flèches. On doit donc prévoir à l'aide d'essais, le comportement des ouvrages et son évolution dans le temps. En définitive et pour donner un ordre de grandeur, on peut prendre le coefficient admis par le comité européen du béton. Ce coefficient est le suivant : Fluage béton léger \cong 1.3 à 1.6 fois fluage béton normal. Donc leur fluage est plus élevé que celui des bétons normaux.

III.4. Durabilité des bétons légers

L'utilisation des granulats légers n'affecte pas la durabilité à long terme du béton. En effet, la porosité des granulats est généralement discontinue et n'influe pas sur la perméabilité du béton. Cette propriété est plutôt contrôlée par la pâte de ciment durcie et par la qualité des interfaces pâte- granulats. La résistance au gel et à l'écaillage du béton est obtenue en combinant des granulats et une matrice de qualité. Bien que les granulats légers soient très absorbants, ils sont néanmoins très durables vis-à-vis du gel. Comme dans les bétons ordinaires, l'air entraîné permet de protéger efficacement le matériau contre le gel et contre l'écaillage [17].

La composition minéralogique des granulats légers manufacturés, obtenus par des procédés de fabrication à très haute température, donne aux granulats une bonne stabilité face aux attaques chimiques. Le bon choix du type de ciment et du rapport eau/ciment est cependant essentiel pour assurer la durabilité des bétons légers face aux agressions chimiques.

IV. Principaux avantages des bétons légers et utilisations

La grande légèreté des bétons légers par rapport aux bétons normaux est l'une des caractéristiques la plus intéressante. C'est elle qui permet des économies décisives dans la construction (économies sur les fondations ; économies sur les structures et économies sur les engins de manutention et les coffrages).

Le béton léger a un pouvoir isolant thermique plus important qu'un béton classique. Leur utilisation nous permet une simplification des éléments de construction et économies de chauffages.

Pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.

IV.1. Utilisations diverses des bétons légers

Les bétons légers sont utilisés dans les domaines suivants :

- Bloc de maçonnerie;
- pistes de sport, cendrées;
- couches filtrantes pour stations d'épuration;
- chapes;
- fours, cheminées;
- panneau préfabriqué;
- porcheries, étables;
- Sous-couches de route: protection contre le gel et couche de base dans la construction des routes et des voies ferrées;
- Les pavés.

IV.2. Aspect environnemental des bétons légers

La production du béton léger nécessite moins de matières premières (sables, pierres, graviers etc.). Ainsi, le nombre de cycles de transport liés à l'utilisation des bétons légers (comparativement à ceux ordinaires de même poids) étant moins élevé, cela entraîne moins de dégagement de CO₂ (qui est un gaz à effet de serre) et par conséquent la réduction des risques de changement climatique. Il nécessite aussi moins d'énergie fossile par rapport au béton ordinaire. Par sa qualité isolante, le béton léger limite les pertes d'énergie dans la construction [17].

V. Effet des fines des sables calcaire sur les propriétés des bétons

Le sable concassé est très abondant dans les carrières de gravier calcaire et son utilisation pourrait réduire considérablement les coûts des matériaux de béton, minimise le coût d'élimination de la poussière, réduit les pollutions environnementales et perte des ressources naturelles.

La consommation des granulats a connu un accroissement considérable avec les progrès dans le domaine de la construction au niveau de la qualité et aussi quantité et cela dans le but d'équilibrer la demande insistée des logements et l'expansion démographique.

D'importantes études sont menées sur l'utilisation des sables de concassage. Ces sables contiennent des taux de fines qui dépassent les exigences des normes en vigueur.

Des études antérieures [18], [19] ont montré qu'il est possible de fabriquer un bon béton en utilisant un sable concassé contenant jusqu'à 15% de fines.

V.1. Influence des fines calcaires sur le rapport E /C

Les fines calcaires ont une grande influence sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons ordinaires.

Les fillers calcaires ont la particularité de s'associer chimiquement avec les hydrates de ciment et donc favorisent l'adhérence entre les particules de sable du fait de la présence des fines. Les bétons de sable nécessitent plus d'eau de mouillage que les bétons classiques, ce qui se traduit par des valeurs E/C plus élevées ($>0,5$) si on ne considère que le ciment. Ce rapport devient similaire à celui des bétons classiques si on considère (C+F), F étant les fillers. Pour un rapport E/C constant, plus le sable sera grossier, plus la maniabilité sera bonne puisque la surface à mouiller est moins importante. De même, l'augmentation de la teneur en fines entraîne une perte de maniabilité sauf dans le cas des fines sphériques non absorbantes qui améliorent la maniabilité tout en réduisant la quantité devides.

Bouzoualegha utilisé deux sables calcaires (El khroub et Ben Azzouz). L'ensemble des bétons mis en œuvre ont été confectionnés à ouvrabilité constante avec un affaissement au cône $\approx 10\text{cm}$ en faisant varier le rapport E/C. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure I.3.

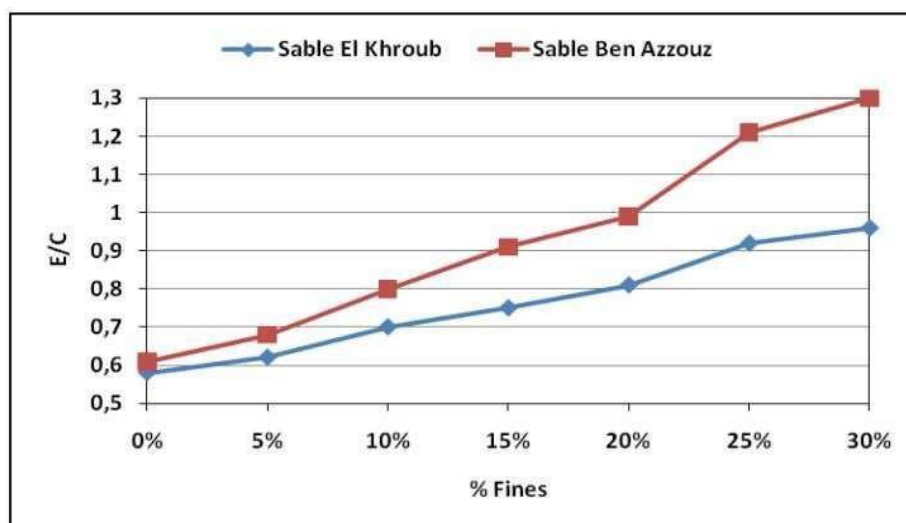


Figure I.3: Variation du rapport E/C en fonction des fines [20]

On a remarqué que le rapport E/C augmente avec le pourcentage des fines qui est lié au pouvoir absorbant des fines calcaires.

[18] et [19] ont effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois types de sable de concassage et deux types de ciments. Ils ont incorporé les fines calcaires dans les sables avec des pourcentages de 0, 10, 15 et 20 % et ils ont conclu que l'eau de gâchage varie proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires. [21], a remarqué que l'affaissement diminue avec l'augmentation du pourcentage de fines calcaires pour différents types de ciments utilisés. La plus faible diminution d'affaissement est observée à 25 % d'ajout calcaire, cette diminution est due principalement à la forte absorption d'eau par les fines calcaires.

V.2. Influence des fines calcaires sur la compacité

La variation de la compacité en fonction des fines calcaires est représentée sur la figure ci-dessus [22].

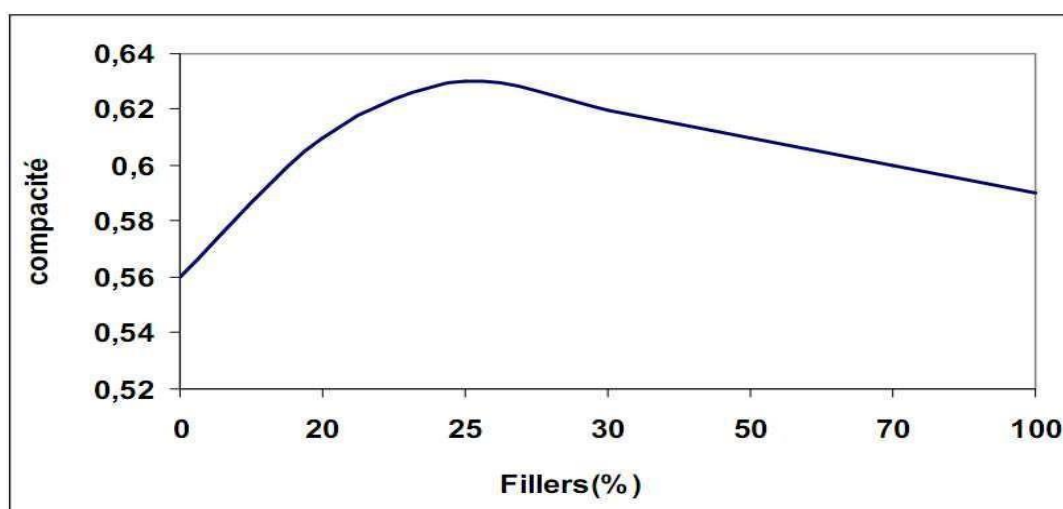


Figure I.4 : Variation de la compacité du mélange ciment en fonction de filler calcaire [22].

[22], ont montré que l'ajout de micro-filler calcaire permet d'augmenter la compacité de la pâte jusqu'à 25% de fines (figure I.4).

[23] a montré que la masse volumique augmente rapidement pour un taux de fines allant de 0 % à 10 % puis s'accroît très faiblement entre 10 et 25 %. Il a constaté que la compacité optimale est obtenue pour des pourcentages de fines allant de 10 à 25%. Figure I.5.

Les variations de la masse volumique et de la densité en fonction des taux de fines sont représentés sur les figures I.5 et I.6.

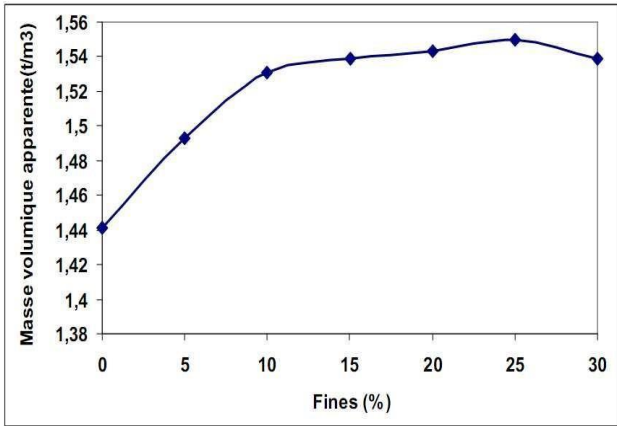


Figure I.5: Variation de la masse volumique apparente en fonction du pourcentage de fines [23]

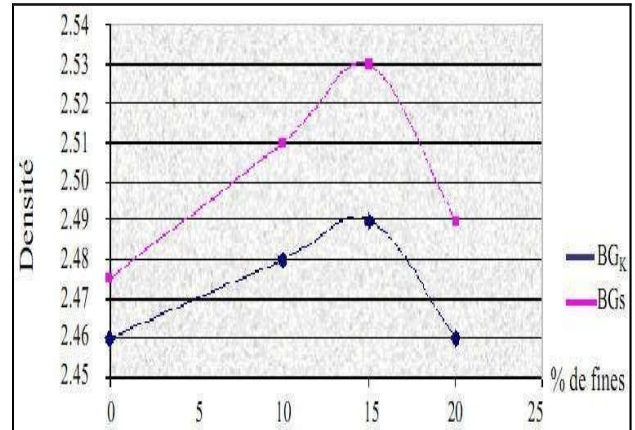


Figure I.6: Variation de la densité en fonction des taux de fines [24]

[24], ont remarqué que la densité réelle du béton augmente rapidement pour les taux de fines allant de 0 à 15%. Au-delà de 15% une diminution est observée pour les deux bétons (béton à base de granulats de kristel. (BGK), béton à base de granulats de sidi Ali Benyoub (BGS)).

V.3. Influence des fines calcaires sur la résistance à la compression

La présence des fines calcaires dans les mortiers et les bétons peut modifier considérablement leurs résistances mécaniques. [25] ont effectué des essais sur des mortiers confectionnés avec des sables de granulométrie grossière et fine avec des pourcentage de fines de 3%, 5%, 8%, 12% et 15% ou 3 %, 8 %, 12 %, 15% et 20 %, respectivement avec des teneurs d'argile dans le sables (A/S) de 0, 2,4 et 6 %.

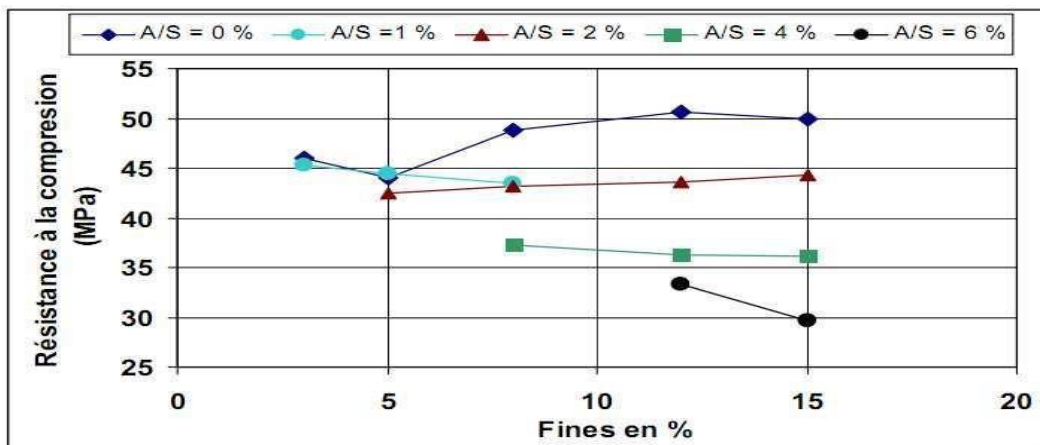


Figure I.7: Variation de la résistance à la compression pour une granulométrie grosse, et rapport Ciment/Sable = 1/4,2, (A/S : Argile/Sable) [25].

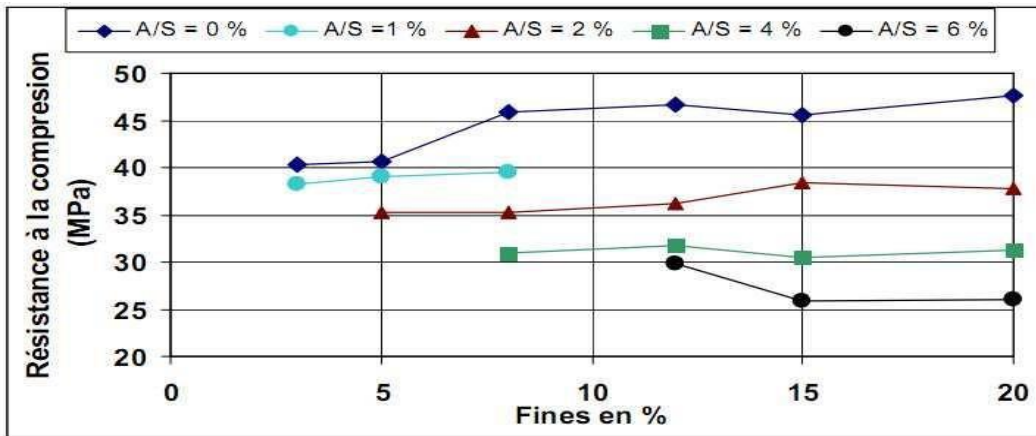


Figure I.8: Variation de la résistance à la compression pour une granulométrie fine, et rapport Ciment/Sable = 1/4.2, (A/S : Argile/Sable) [25].

Ils ont remarqué qu’au-delà d’un pourcentage de fines de 15 %, aucun changement de tendance il est remarqué (Figure I.8 et I.9). Par contre on remarque un accroissement de la résistance à la compression en présence des fines variant entre 3 % et 15 % en absence d 'argile pour les deux types de granulométrie grossière et fine. L’augmentation de la proportion d ’ a r g i l e dans le sable a induit une chute de la résistance à la compression des mortiers de façon remarquable (Figure I.8 et I.9). [26]ont réalisé des essais sur deux bétons confectionnés avec du sable concassé contenant des fines calcaires. Le premier avec un dosage en ciment de 350 kg / m³ et le deuxième avec un dosage de 300 kg/m³. Ils ont introduit les fines calcaires à des pourcentages de 0,5,10,15,20 et 25% en poids de ciment. La variation de la résistance à la compression à 28 jours des bétons avec le pourcentage des fines est représentée sur la figure suivante

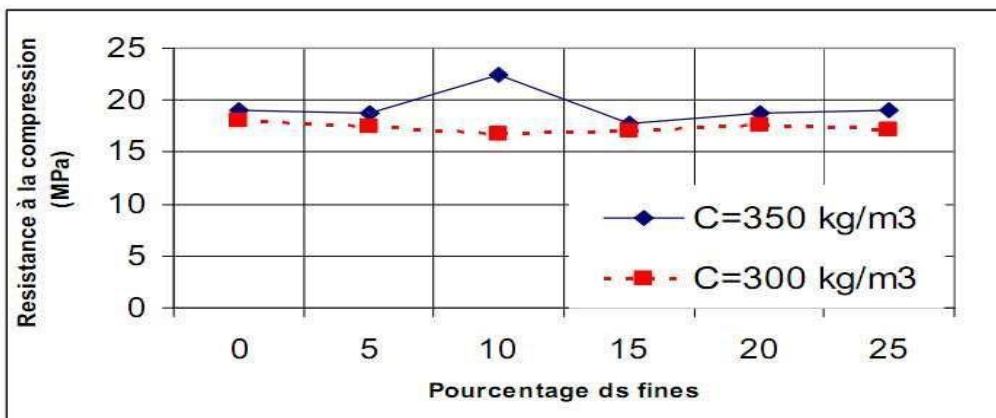


Figure I.9: Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage des fines [26]

D'après les résultats obtenus, ils ont conclu qu'il est possible d'utiliser des sables de concassage pour béton et mortier contenant 15 % à 20 % de fines calcaires sans affecter la performance du béton.

[19]a effectué des essais sur des bétons confectionnés avec trois types de sable de concassage et deux compositions (A et B). Il a varié le pourcentage des fines à (0 %, 10 %,15

%, et 20 %) pour la composition A et (0 %, 8 %,12 % et 15 %) pour la composition B. Il a remarqué que le béton (A) et pour tous les sables donne une augmentation de la résistance à la compression de 20 % pour un optimum de fines de l'ordre 15 %. Une augmentation de résistance à la compression de 7 % est observée pour le béton (B) pour un optimum de fines de12%.

[27], ont utilisé trois types de fines (Calcaire, Quartz, et Granite) pour la confection de trois mortiers con t en an t 5, 10, 15 et 20% de fines. Les essais réalisés sur ces mortiers ont montré que les fines calcaires, améliorent la résistance à la compression des mortiers à jeunes âges(7jours).

[21], a observé que la substitution de 15 % de fines calcaires au sable de concassage n'a pas affecté négativement la résistance à la compression.

[20], a montré la possibilité de confectionner des bétons à base de sable de concassage contenant des proportions de fines de l'ordre de 15 à 20% sans conséquences préjudiciables sur les caractéristiques mécaniques des bétons.

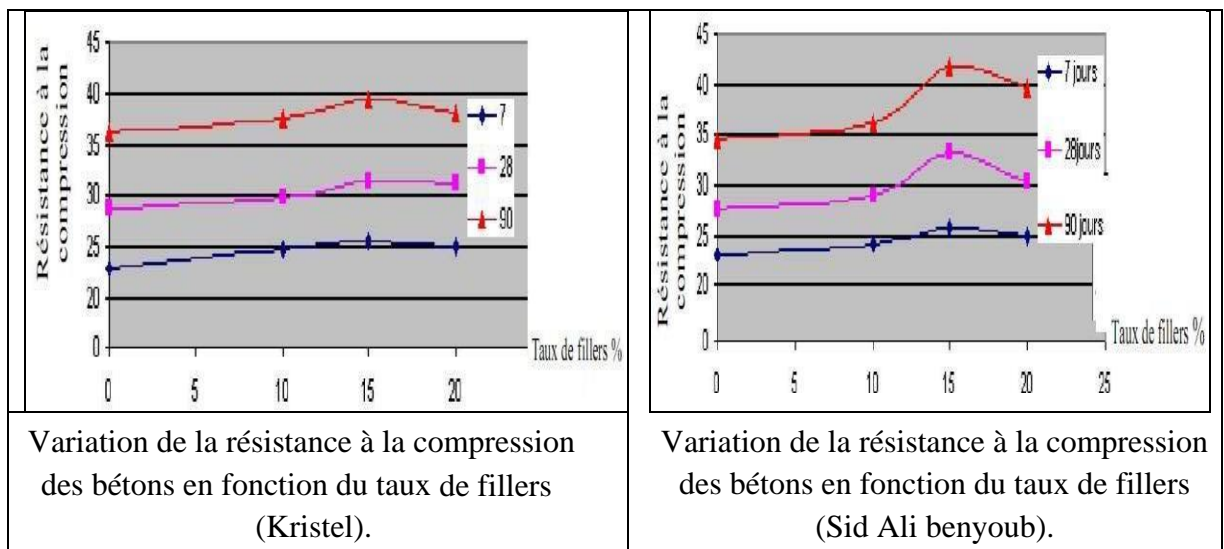


Figure I.10: Variation de la résistance à la compression des bétons en fonction du taux de fillers [24]

[24], ont fait une étude pour la valorisation des matériaux locaux (sable de concassage), à travers la connaissance des effets des fillers calcaires sur les caractéristiques mécaniques des mortiers et bétons. Les résultats ont montré que les bétons formulés avec les deux sables de concassage utilisés (Kristel et Sidi ali-benyoub) occasionnent une augmentation de résistance à la compression de 20% pour un optimum de fines de l'ordre de 15%. Figure I.10

Les mêmes courbes d'évolution de la résistance en compression en fonction du pourcentage de fines présentent la même allure quel que soit l'âge des éprouvettes des différents types de bétons testés.

V.4. Influence des fines calcaires sur la résistance à la traction

[27] ont montré que L'incorporation des fines a amélioré la résistance à la traction par flexion pour tous les âges. Cette résistance à une tendance semblable à celle observée pour la résistance à la compression des mortiers correspondants. L'augmentation était plus prononcée à jeune âge. Après 28 jours, l'effet de toutes les fines de pierres était essentiellement le même indépendamment de leurs compositions et de leurs quantités dans le mélange(FigureI.11).

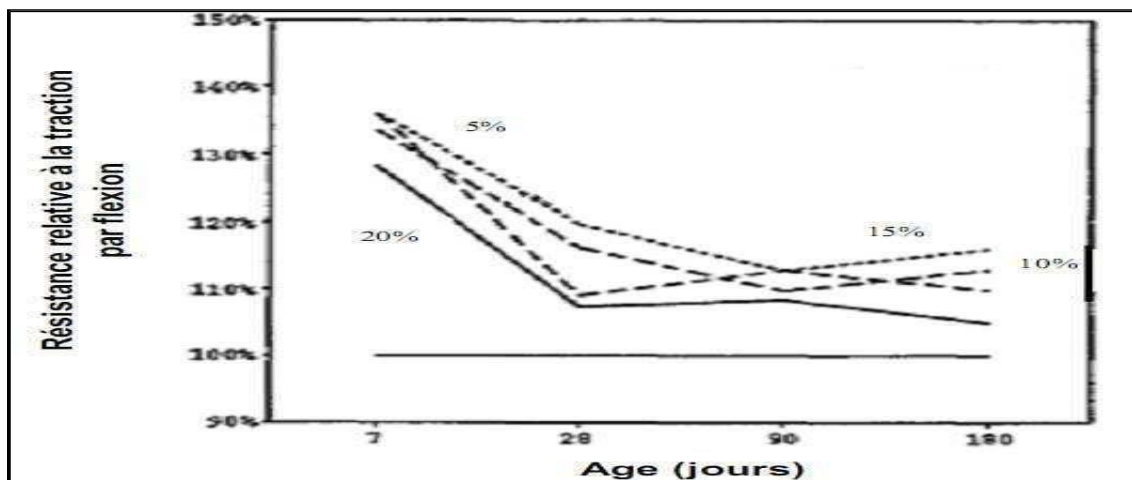


Figure I.11: Résistance relative à la traction des mortiers avec fines calcaires

[27].

[25] ont aussi obtenu le même résultat que [27] et les tendances observées pour la résistance à la traction par flexion sont similaires à celles de la résistance à la compression (Figures I.12 et I.13).

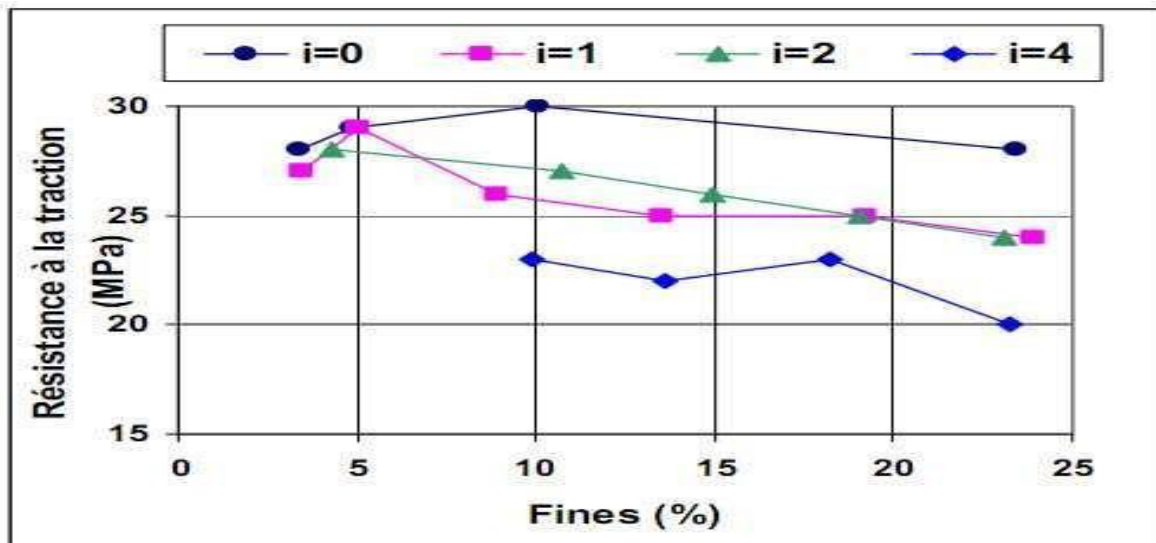


Figure I.12: Résistance à la traction des mortiers (dosage 250 kg/m³) [25].

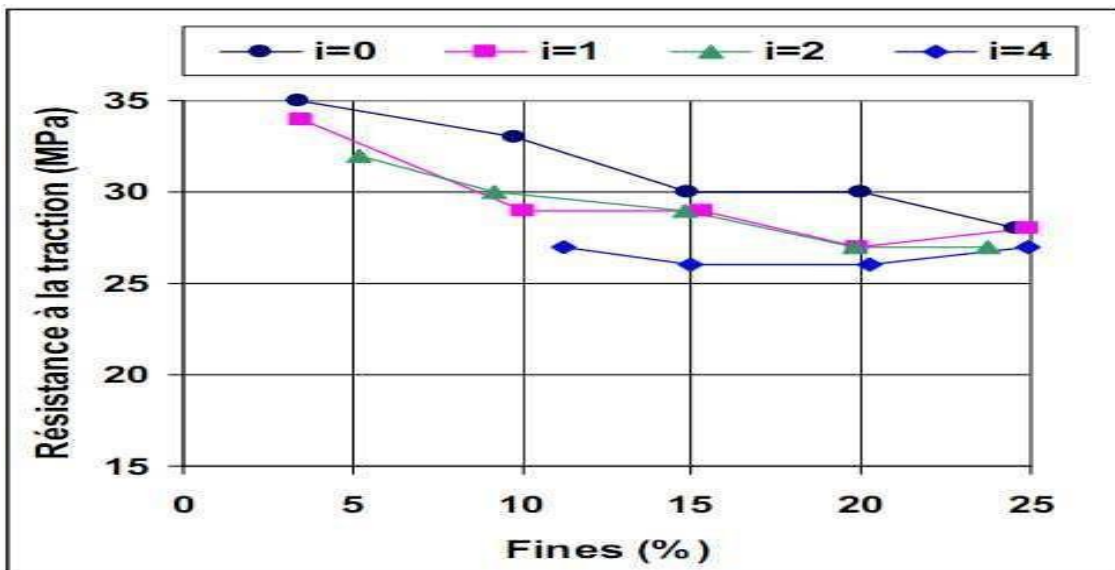


Figure I.13: Résistance à la traction des mortiers (dosage 325 kg/m³)[25].

VI. Etude des bétons léger de granulats depolystyrène

Les bétons légers à base de billes de polystyrène expansé doivent être considérés à part. Leurs masses volumiques peuvent être comprises suivant les formulations, entre 400 et 800 kg /m³ ou plus jusqu'à 1200, en diminuant le pourcentage de polystyrène constituant le gros granulat par rapport au mortier. Ils peuvent être confectionnés en centrale à béton et sont éventuellement pompables à l'aide de pompes à rotor au travers de canalisations de 80 ou 100 mm maximum.

Leur mise en place est aisée à condition de ne pas les vibrer. Ce qui provoquerait un remonté de billes de polystyrène [28].

VI.1. Avantages 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 et résiste aux agents agressifs.
- Sa mise en œuvre est simple et traditionnelle, sans vibration.
- Résistant aux chocs.
- 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, rattrapage de niveau, ravivage, remplissage pour réhabilitation de bâtiments anciens et bâtiments neufs ainsi que dans d'autres applications spécialisées comme les pavés et les constructions marines flottantes et dans la protection de structures militaires enterrées.



Figure I.14: Pavé en béton de PSE.



Figure I.15: Mur en blocs de béton de PSE.



Figure I.16: Cloison en Béton de PSE Projeté.



Figure I.17: Installation d'un plancher béton de PSE.

VI.2. Le polystyrène

Le polystyrène est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires.

VI.2.1. composition chimique

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène (figure I.18). Structurellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbones, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [29].

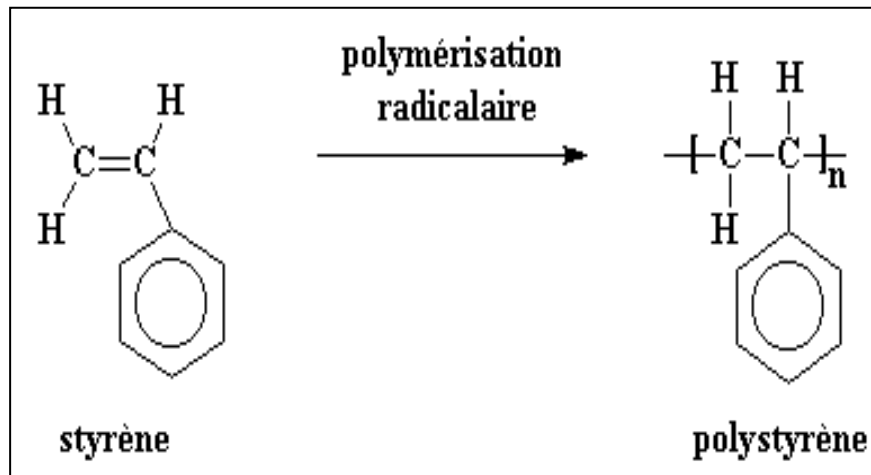


Figure I.18: Structure chimique du polystyrène [29]

Le produit de base servant à la fabrication du polystyrène expansé est obtenu sous forme de petites perles blanches, chimiquement très stable, et doué de propriétés thermoplastiques. Suivant les applications, on distingue trois types différents par leurs granulométries et leurs propriétés:

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un « porogène » (ou agent gonflant) : le pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produit « difficilement inflammable » ou auto-extinguibles ». Cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques.

VI.2.2. Fabrication du polystyrène expansé

La transformation du polystyrène en élément isolant (polystyrène expansé) comprend les étapes suivantes :

- Pré-expansion
- Stockage intermédiaire
- Seconde expansion

C'est au cours de cette opération que les perles sont façonnées suivant le produit que l'on désire obtenir [8].

VI.2.3. Propriétés dupolystyrène

Les propriétés remarquables du polystyrène sont notamment :

- Sa faible masse volumique est généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m³, [8].
- Son pouvoir isolant thermique,
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs),
- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, ...).

VI.2.4. Billes depolystyrène

Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par [30] ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

VI.2.5. Caractéristiques physiques et mécaniques dupolystyrène

➤ Densité

La densité du polystyrène à l'état brut $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ [32].

Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé. Elle est comprise entre 8 et 80 kg/m³. 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/m³, le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé [31].

➤ Propriétés morphologique

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques [1]. La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau.

La structure du polystyrène expansé (PES) comporte des soudures interperles, la taille des cellules

se situe habituellement entre 60 et 200 μm (figure I.19)

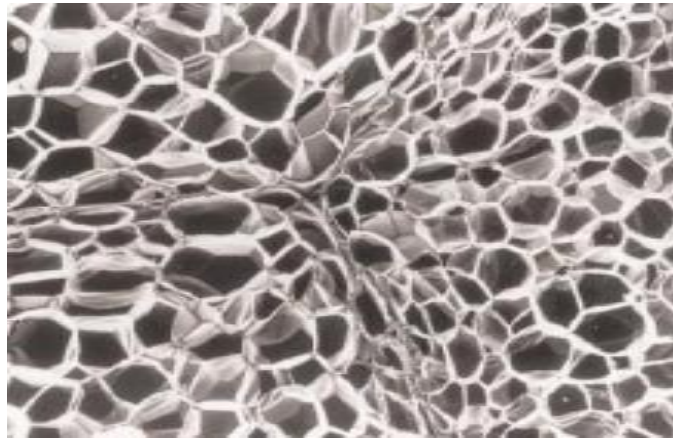


Figure I.19: Structure alvéolaire du polystyrène [8]

D'après [1] ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant, un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface. On signale que le polystyrène expansé connaît un début de ramollissement et de déformation à une température de 100°C. Concernant l'Absorption, le polystyrène est un matériau de faible absorption, elle est de 0.2 à 1.gr par 100.cm³ [32].

➤ **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 [32].

➤ **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. Sachant que la mousse de PSE est constituée de 98 % d'air et de 2 % de polystyrène en volume, le bon coefficient d'isolation thermique est dû à la présence d'air emprisonné dans les cellules. En général 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 [32].

Les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables devant celles de la matrice cimentaires. En effet, ces billes ont un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une

résistance en compression de l'ordre de 80 kPa [1].

VI.3. Caractéristiques physico-mécaniques des bétons depolystyrène

VI.3.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons de polystyrène est fonction inverse du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts. Généralement, la résistance à la compression varie entre 4.5 et 37 MPa[33]selon le % du polystyrène (figure ci-dessous).

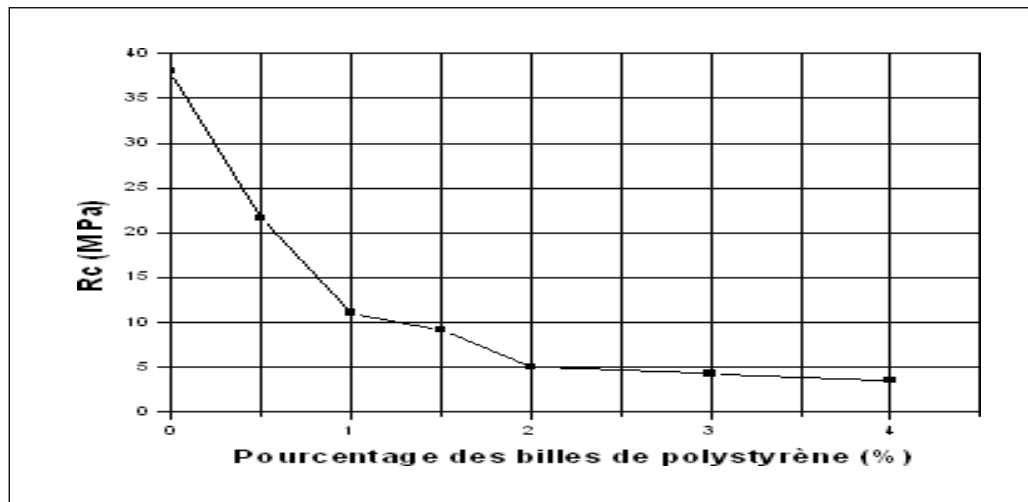


Figure I-20: Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [33]

Ces constatations sont en accord avec les travaux de [8]qui ont montré une chute de la résistance à la rupture en compression respectivement pour le béton léger à base de grains en polystyrène enrobés et non enrobés de l'ordre de 32,80% et 36,27% pour le béton composite avec 30% de billes de polypropylène enrobées, de 52,54% et 58,24% avec 40% et de 59% et 63,82% avec 50% par rapport au béton ordinaire (figure I.21).

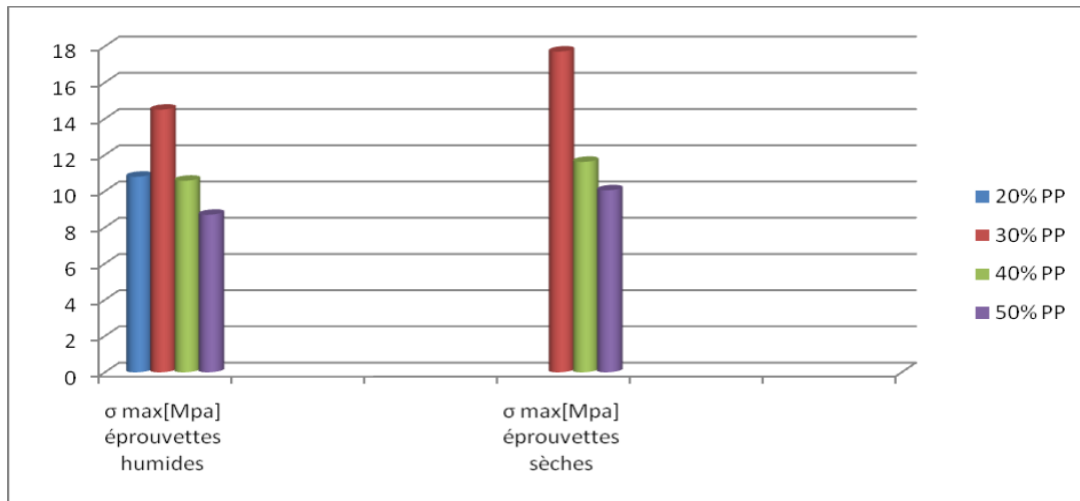


Figure I.21. Résultats des contraintes maximales de compression uniaxial pour échantillons humides et secs à base de billes non enrobées [8].

VI.3. 2. Module d'élasticité et retrait

Le module d'élasticité est de l'ordre de 20.000 kg/cm² pour des bétons de 750 kg/ m² de masse volumique apparente.

Le retrait est variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1.2mm/m [34]. Ce matériau présente une grande élasticité

La figure ci-dessus représente la variation du retrait du béton de polystyrène en fonction du dosage en polystyrène

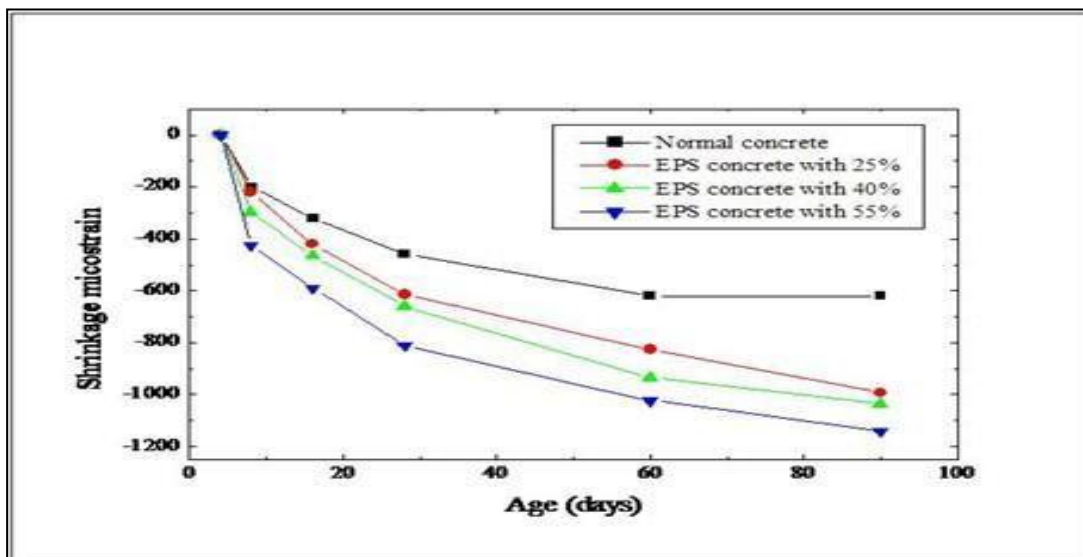


Figure I.22 : Variation du retrait du béton de polystyrène en fonction du dosage en polystyrène [35]

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.

VI.3. 2. Conductivité thermique

Les courbes de la figure I.13, montrent clairement que la conductivité thermique des échantillons de béton de polystyrène augmente au fur et à mesure que la teneur d'humidité croît. Il faut néanmoins souligner qu'elle est d'autant moins importante que le pourcentage des billes de polystyrène est plus élevé.

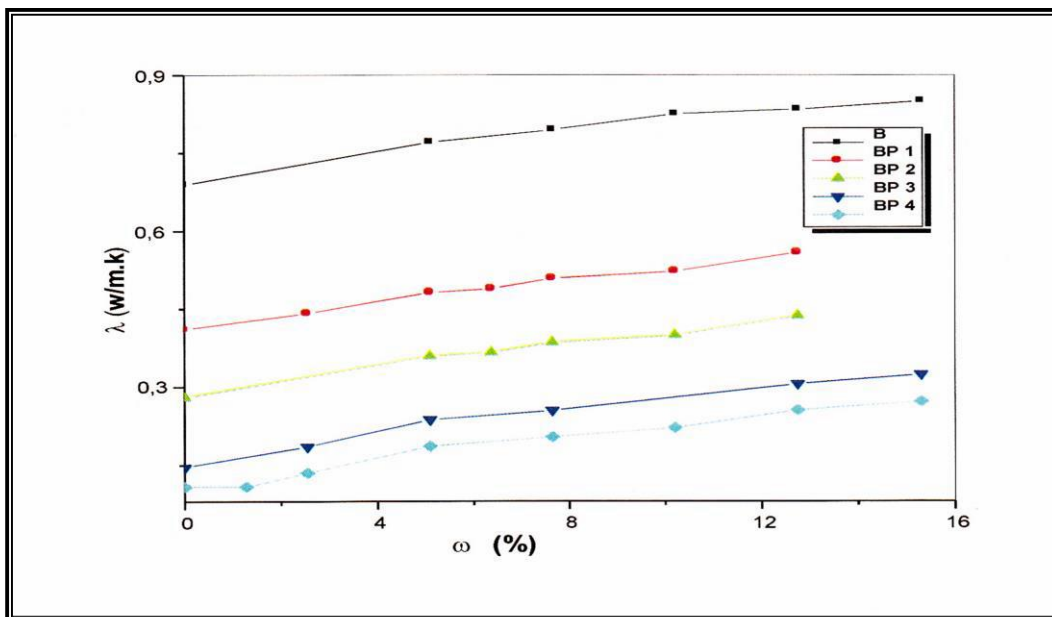


Figure I.23: Variation de la conductivité thermique des bétons allégés avec les billes de polystyrène en fonction de la teneur en eau [36]

Les bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant, leur conductivités thermiques sont assez faibles et pouvant descendre jusqu'à $0.065 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [36]

Pour les bétons de construction en témoignent cette propriété. Elle varie en fonction de la densité du béton.

Le tableau I.5 donne quelques valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse

volumique sèche.

Tableau I.5: Conductivité thermique des bétons de polystyrène [32]

Masse volumique (kg/m₃)	2062	1219	1023	743
Conductivité Thermique λ(Wm⁻¹.K⁻¹)	1.286	0.465	0.300	0.210

VI.5. Durabilité des bétons légers depolystyrène

➤ [34], ont présenté dans leurs travaux de recherche l'étude de performances mécaniques et de durabilité vis-à-vis de la corrosion et de la perméabilité des chlorures d'un bétonléger.

Deux types de bétons ont été étudiés :

1er type : B é t o n avec agrégats courant,

2ème type : Béton avec billes PSE.

- Unsuper-plastifiantNaphtalèneaétéajoutépour labonnemaniabilité

- La fumée de silice a été ajoutée dans la matrice cimentaire des deux types de béton avec trois pourcentages par rapport à la quantité de ciment (3%, 5%,9%).

Trois séries d'échantillons ont été réalisé et résumés dans le tableau I.6 suivant

Tableau I.6: Détails des séries de bétons élaborés [37]

Séries	Nombre de Mélange	Dimension du sable	Dimension des granulats	Types d'PSE	
				Type A	TypeB
Série 1	1	≤ 2,36mm	10	6,3 mm $\rho_a=9,5$ kg/m ³	4,75 mm $\rho_a=20$ kg/m ³
	2		10		
	3		10		
	4		10		
Série2	5	≤ 1,18mm	10	6,3 mm $\rho_a=9,5$ kg/m ³	4,75 mm $\rho_a=20$ kg/m ³
	6		10		
	7		10		
Série 3	8	≤ 2,36mm	16	6,3 mm $\rho_a=9,5$ kg/m ³	4,75 mm $\rho_a=20$ kg/m ³
	9		20		
	10		16		
	11		20		

Il se montre que les bétons avec polystyrène ont une perméabilité aux chlorures faibles. De même un taux de corrosion beaucoup plus faibles que les bétons courants.

VI.6. Absorption des bétons légers depolystyrène

La durabilité du béton dépend principalement de sa perméabilité, qui est définie par sa résistance aux ions agressifs. Les caractéristiques de l'absorption représente la porosité, sous-entendu le volume poreux du béton perméable et sa connectivité. L'absorption initiale (30min) évalue la qualité du béton qui a été défini plutôt par CEB. L'absorption initiale à 30 min ainsi que l'absorption finale sont représentés sur la figure I.24; selon les critères d'évaluation donnés par le CEB, tous les mélanges dans la présente étude ont montré une faible absorption (absorption < 3%) indiquant une « bonne » qualité du béton. En outre, les mélanges avec des pourcentages plus élevés des billes PSE ont montré des valeurs d'absorption plus faibles au stade initial comparés aux mélanges avec des pourcentages plus faibles. L'absorption totale des bétons d'PSE diminue avec l'augmentation du pourcentage de la fumée desilice.

En comparaison Kluge et al ont rapporté des valeurs d'absorption de l'ordre de 8-25% du poids du béton fabriqués avec des agrégats artificiels (agrégats légers tels que : le schiste, la perlite l'argile expansé et les cendres volantes). Cette comparaison est faite pour les bétons à même densité avec ciment auquel on a ajouté de la fumée de silice; ceci est dû à l'effet de la fumée de siliceetlanaturedesbillesd'PSEquiprésenteuncaractèrehydrophobe(nonabsorbant).

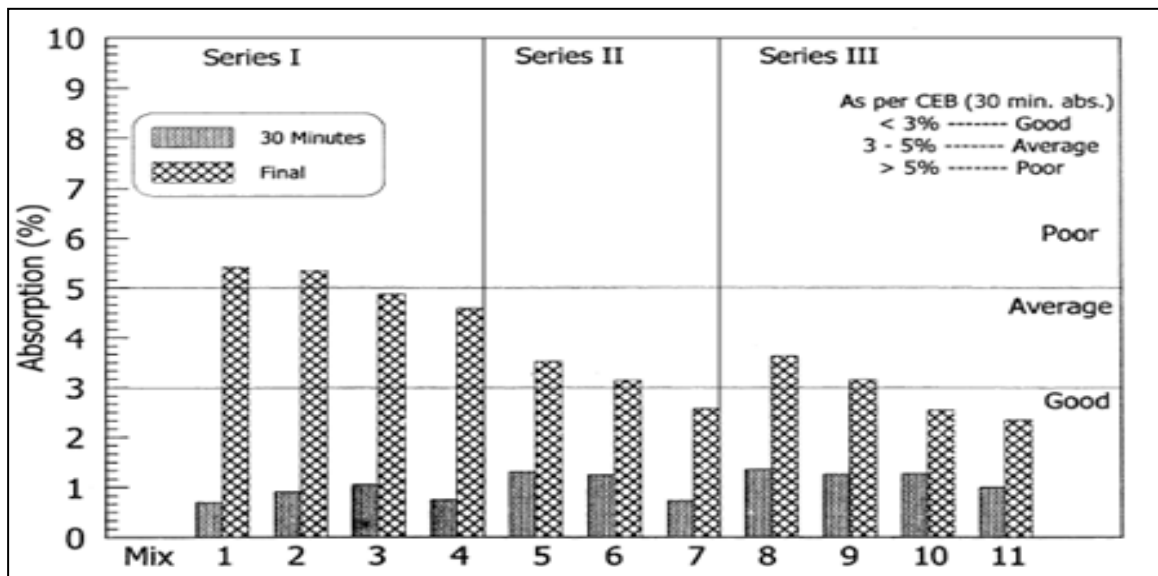


Figure I.24: Variation de l'absorption initiale à 30 min et l'absorption finale[37]

VII. Conclusion

Cette synthèse bibliographique, nous a permis, au début, de bien connaître les bétons légers qui couvrent un champ très large et nécessitant des matériaux et des procédures appropriés. Leur masse volumique peuvent varier de 300 à 1800 kg/m³.

Puis, une synthèse sur les bétons de sable calcaire à base de billes de polystyrène et leurs domaines d'application. Il faut noter que ce matériau présente des avantages techniques et thermiques qui le qualifient pour l'étanchéité.

Il se montre que les bétons de polystyrène décelé les propriétés physicomécaniques qui se résumement comme suite:

- La résistance à la compression est fonction inverse du dosage en granulats,
- La résistance à la compression dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense plus sa résistance est grande,
- Le retrait est variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1.2mm/m.

Enfin, l'étude des bétons de polystyrène dans laquelle on a mis en évidence l'utilisation des granulats de polystyrène dans la fabrication des matrices cimentaire et sableuse a montré certain, avantage, par rapport aux bétons classiques, et qui sont poids léger, forte étanchéité ainsi que la faible absorption d'eau.

Introduction

Dans le but de valoriser les matériaux locaux en établissant une formulation adéquate afin d'obtenir un matériau rentable, nous avons utilisé dans cette étude des matériaux localement produits avec des billes de polystyrène.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont :

- Le ciment ;
- Le sable calcaire;
- Les billes de polystyrène expansé.

Ils sont destinés à être utilisés comme des matériaux de construction isolants, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice constituée de ciment seul ou mortier de ciment et l'isolation par les billes de polystyrène.

La majorité des essais d'identification sont réalisés au laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. Chaque résultat représente la moyenne d'au moins trois essais.

I. Caractéristiques des matériaux premiers

I.1. Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé CPJ45 fabriqué par la compagnie ACC « Algerian Cement Company ».

Des essais ont été effectués pour déterminer quelques propriétés physiques, chimiques et mécaniques du ciment employé.

I.1.1. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les résultats de l'analyse chimique sont résumés dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Analyse chimique du ciment utilisé [38].

Elément	Al ₂ O ₃	Cl	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
(%)	4,52	0,02	1,79	0,49	0,25	2,27	3,49	19,70	62,15

Nous remarquons que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables de chaux et de silice.

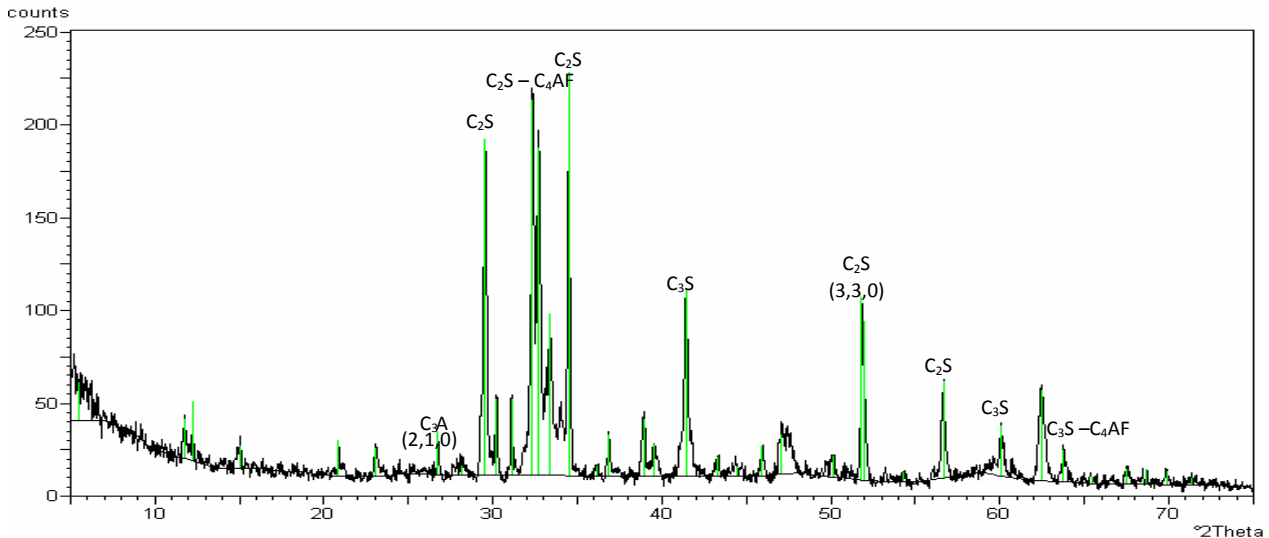


Figure II.1: Diffractogramme du ciment CPJ 45 [38]

D'après le diffractogramme du ciment on peut confirmer l'existence des silicates tricalciques C_3S , des silicates bicalciques C_2S , des Ferro-aluminates tétra calciques C_4AF qui sont généralement les composants de base des ciments CPJ. L'analyse a aussi révélé l'existence des aluminates tricalcique C_3A et des ferrites tricalcique C_2F .

I.1.2. Masse volumique absolue [39]

a) Principe de la mesure

Il consiste à mesurer le déplacement du niveau de liquide contenu dans un récipient à col étroit, lorsqu'on introduit la poudre dont on cherche la masse volumique absolue.

b) Équipement nécessaire

- Un densimètre de chatelier d'une contenance minimale de 50cm^3 .
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment, le benzène.
- Une balance. La précision de la balance devra être adaptée à la masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre, précis à $0,1\text{ }^\circ\text{C}$, permettant de connaître la température du laboratoire.
- Papiers filtres.

c) Conduite de l'essai

- Remplir l'appareil de benzène jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1.
- Éviter de mouiller les parois lors du remplissage. Immerger le densimètre dans un récipient contenant de l'eau à $20\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$.
- Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de ciment de 60 g à 0,1 g près.
- Repérer exactement le niveau atteint N_0 . correspond au volume initial sur le densimètre V_0 .

- Verser le ciment très lentement (en ¼ d’heure environ) dans l’appareil en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.
- Déplacer le densimètre contenant le ciment, de récipient et le poser sur la table.
- Boucher le densimètre, l’incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l’air.
- Replacer l’appareil dans le bain et lire le niveau N₁ du liquide correspond au volume final sur le densimètre V₁ après équilibrage de température.
- A l’aide d’un papier filtre récupérer le benzène.
- A l’aide d’une solution lavante nettoyer le densimètre de dépôt du ciment.

La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_c}{V_1 - V_0} \dots\dots\dots \text{(II.1)}$$

M_c : étant la masse du ciment introduite .

V₁ : volume final lu sur le densimètre

V₀ : volume initial pris comme référence (V=0).

La masse volumique absolue du ciment utilisé est 3050 kg/m³ .

I.1.3. Masse volumique apparente [39]

C’est la masse de l’unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_{app} et donnée par :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots \text{(II.2)}$$

Où M : masse du ciment.

V : volume du ciment.

La détermination de la masse volumique apparente peut se faire en utilisant un récipient standard (de volume connu).

Il s’agit de remplir un volume de 1l (1dm³) et on pèse la masse totale M_T, la masse de l’échantillon M sera:

$$M = M_T - M_R \text{ (} M_R \text{ est la masse du récipient).}$$

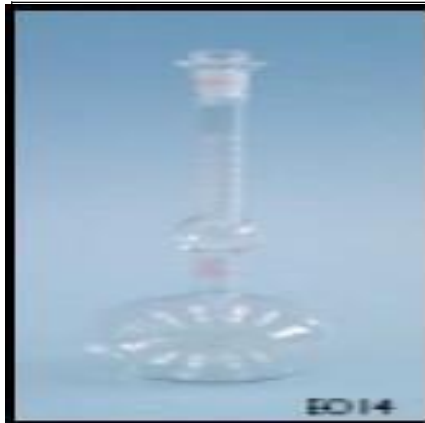


Figure II.2 :LeChatelier



Figure II.3: Réceptif standard.

Alors la masse volumique apparente du ciment est 1120 kg/m^3 .

I.1.4. Compacité et Porosité [39]

La porosité est une caractéristique très importante, elle influe sur les caractéristiques physico mécaniques des bétons. Plus la porosité est faible, plus le béton est dense et plus sa résistance est grande par contre son pouvoir isolant est médiocre.

On définit la compacité d'un matériau comme le rapport du volume solide sur le volume total et la porosité comme le rapport du volume des vides sur le volume total.

La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %.

La somme des deux est alors égale à 100% : $P+C=1$.

Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} \dots \dots \dots (II.3).$$

$$P = 1 - C \dots \dots \dots (II.4).$$

***Compacité**

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} = 0.36 \implies C = 36\%$$

***Porosité**

$$P = 1 - C = 1 - 0.36 = 0.64 \implies P = 64\%$$

I.1.5. Prise

Cet essai constitue une indication indispensable pour la prise d'un ciment qui est en fonction de :

- Sa nature (à prise lente ou rapide).
- Sa finesse.
- La température de milieu de conservation.
- La teneur et la nature des adjuvants (retardateurs ou accélérateurs de prise).
- Le rapport E/C.

Les temps de début et de fin de prise, sont mesurés à l'aide d'un appareil analogue à l'aiguille de VICAT (utilisée pour les ciments), muni d'un cône à son extrémité. L'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans une pâte de ciment, le début de prise est définie comme étant le temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance $d \geq 2,5$ cm du fond du moule. La fin de prise correspond au temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte de ciment.

A une température de 20 °C les temps du début de prise d et de la fin de prise f des plâtres de construction gros PGC sont montrés dans le tableau suivant :

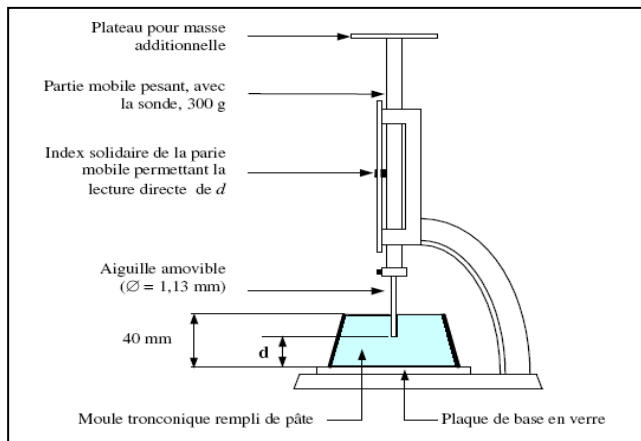


Figure II.4: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.

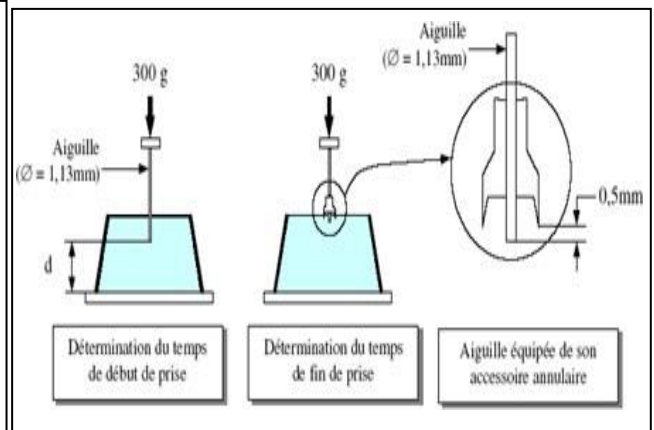


Figure II.5: Détermination du début et fin de prise.

Tableau II.2 : Temps du début de prise et de la fin de prise de ciment

	Température ambiante	Etuve
Début de prise	2h 30 min	40 min
Fin de prise	5h 05 min	1h 41 min

I.2. Sablecalcaire

Le sable utilisé est un sable calcaire de granulométrie 0/4 provenant des déchets de concassage des roches massives issus des calcaires dolomitiques du turonien. La source de ce sable est la carrière de Ouazane située à la limite septentrionale du djebel Makrane au voisinage du pont de l'oued M'Zi dans la commune deLaghouat



Figure II.6 Echantillons du sable calcaire utilisé

I.2.1. Masse volumique absolue

a) Méthode de l'éprouvette graduée

➤ Principe de l'essai

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Conduite de l'essai

Remplir l'éprouvette graduée avec un volume V_0 d'eau.

Peser un échantillon sec M de sable calcaire et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.

La liquide monte dans l'éprouvette.

Lire le nouveau volume V_1 .

Le volume absolue est $V_s = V_1 - V_0$

La masse volumique est alors :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_s} \dots\dots\dots(\text{II.5}).$$

La masse volumique absolue du sable calcaire est 2668 kg/m³.

I.2.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente du sable calcaire est 1528 kg/m³ ± 12

I.2.3. Compacité et Porosité [39]

***Compacité**

$$C = 57 \%$$

***Porosité**

$$P = 43 \%$$

I.2.4. Analyse granulométrique par tamisage [40]

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables pour la détermination de la composition du béton, l'essai est réalisé selon la norme Française NFP18-560. Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Pour avoir les meilleurs mélanges, les granulats doivent répondre à des fuseaux granulaires. Notons qu'à partir de la courbe granulométrique, nous pouvons déterminer un certain nombre de paramètres utiles à la connaissance de nos granulats.



Figure II.7 : Appareillage pour l'analyse granulométrique par tamisage.

Le tableau II-3 présente les résultats de l'analyse granulométrique du sable utilisé

Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable calcaire

Masse du sable calcaire 1 kg				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	1,7	1,7	0,17	99,83
3,15	22	23,7	2,37	97,63
2,5	68,8	92,5	9,25	90,75
1,25	310,8	403,3	40,33	59,67
0,63	214,1	617,4	61,74	38,26
0,315	107,8	725,2	72,52	27,48
0,16	104,7	829,9	82,99	17,01
0,08	50,8	880,7	88,07	11,93
Fond	116,4	997,1	99,71	0,29

D'après le tableau, on a tracé la courbe granulométrique représenté sur la figure II.13.

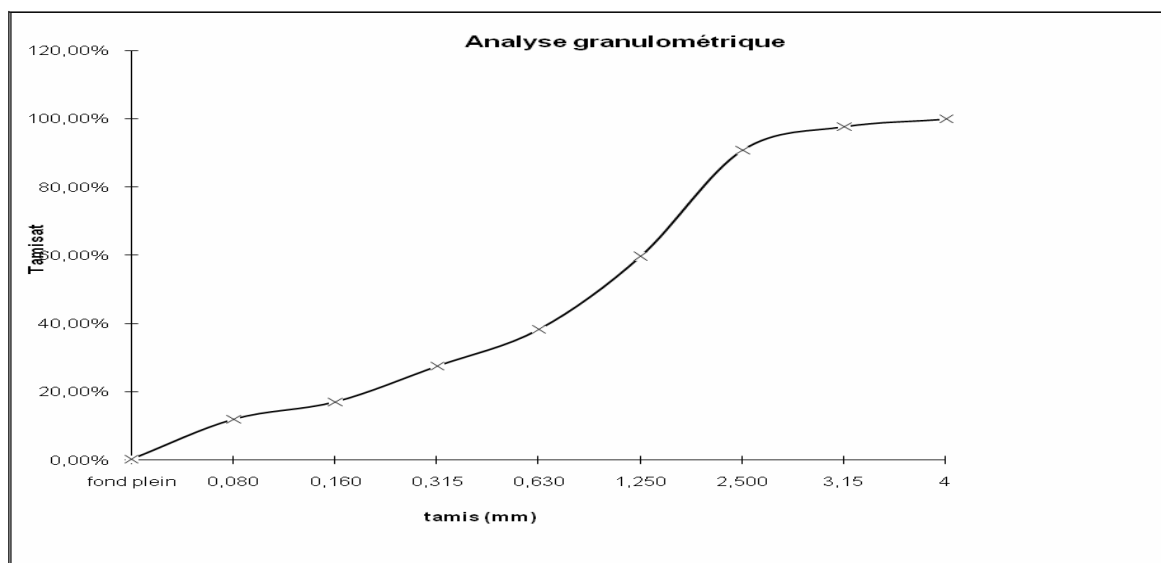


Figure II.8 : Courbes granulométriques de sable calcaire.

L'analyse granulométrique a montré que ce sable est un sable fin présentant une granulométrie étalée. Le diamètre maximal des grains de sable est de 4 mm et le taux de fines est de 15%.

○ **Module de finesse**

Le module de finesse M_f du sable est défini comme suit :

$$M_f = \sum \frac{R_c}{100} \dots\dots\dots \text{(II.6)}$$

Avec :

R_c: Refus cumulé en % sur les tamis de modules 38, 36, 35, 34, 33, 32, 30, 28, 26, 25, 22.

Pour notre cas:

$$M_f = (9,25 + 40,33 + 61,74 + 72,52 + 82,99) / 100 = \mathbf{2.67}$$

I.2.5. Equivalent de sable [41]

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée.

Ces hauteurs sont déterminées sur une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution capable de faire flocculer les éléments fins.

L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés).

$$E_{sv} = \frac{H_2}{H_1} \times 100(\%) \dots\dots\dots \text{(II.7)}$$

$$E_{sp} = \frac{H_2^*}{H_1} \times 100(\%) \dots\dots\dots \text{(II.8)}$$

$$\frac{ES_v}{ES_p} \times 100 (\%) \dots\dots\dots \text{(II.9)}$$

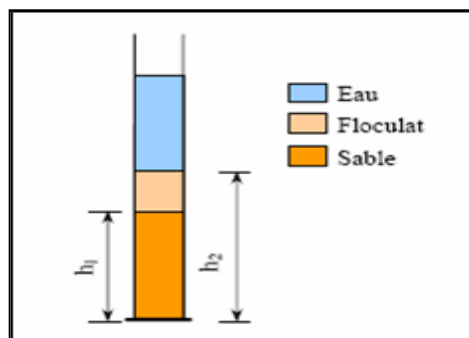


Figure II.9 : Détermination de l'équivalent de sable

Les résultats de l'équivalent de sable sont représentés sur le tableau II.4

Tableau II.4 : Résultats de l'essai de L'équivalent de sable calcaire

N ^o d'essai	H ₁ (cm)	H ₂ (cm)	H ₂ [*] (cm)	E _{SV} (%)	E _{SP} (%)
1	10.4	8.0	7.3	76.92	70.19
2	12.1	9.1	8.6	75.21	71.07
3	10.1	7.4	7.1	73.26	70.29
			Moyenne	75.13	70.51

Les valeurs de l'équivalent de sable visuelles ou par piston montrent que le sable exploité est un sable propre et sans trop d'impuretés. Son emploi comme sable de béton peut conférer à ce dernier les performances mécaniques requises. Le taux d'absorption du sable calcaire est relativement élevé par rapport au sable siliceux (80 à 85 %), ceci doit être pris en considération dans l'optimisation de la quantité d'eau dégâchage.

I.3. Granulats des billes de polystyrène

Un seul type de granulats légers est utilisés pour l'élaboration des bétons légers, objet de cette étude. Les billes de polystyrènes expansés utilisés ont été ramenées de la société Algérienne de polystyrène (Fabrication de panneaux, plaques et emballage en polystyrène) zone industrielle AïnOussara wilaya de Djelfa.

Ce 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.

Afin d'étudier l'influence de la grosseur des granulats sur les caractéristiques physico- mécaniques des bétons ; deux classes granulaires sont utilisées dans l'élaboration des bétons légers aux granulats de polystyrène. Il s'agit des classes granulaires 1/2.5 et 3.15/4.



Figure II.10 Echantillons des billes de polystyrène expansés

I.3.1 Masse volumique absolue [39]

Il s'agit de déterminer la masse volumique du polystyrène expansé qui se présente sous forme de perles de diamètre environ 0.2mm.

Elle est déterminée à l'aide du densimètre de Chatelier. Ce dernier est rempli d'eau jusqu'au trait correspondant au zéro de l'échelle de volume. Puis on introduit une masse de 3g de polystyrène, et on lit sur l'échelle des volumes la valeur du volume déplacé.

La masse volumique sera égale au rapport de la masse du polystyrène introduite sur le volume mesuré.

♦ Méthode de la mesure au pycnomètre

On détermine avec précision la masse M_1 du pycnomètre rempli d'eau. Puis on détermine avec précision la masse M_2 d'un échantillon de matériau sec (environ 3 g), et introduire la totalité du matériau dans le pycnomètre, rempli d'eau, et on ferme le bouchon et remplir le volume restant du pycnomètre de l'eau. Dans tous les cas on vérifie que le pycnomètre ne contient aucune bulle d'air, puis on a pesé alors le pycnomètre, soit M_3 .

On peut alors écrire la relation entre les différents poids mesurés :

$$M_3 = M_1 + M_2 - (M_2 / \rho_s) * \rho_w \dots \dots \dots (II.10)$$

On en déduit la masse volumique ρ_s du matériau, connaissant la masse volumique de l'eau ρ_w qui est égale a $1g/cm^3$ ou $1000 kg/m^3$.



Figure II.11 : Pycnomètre rempli d'eau + échantillon.



Figure II.12 : Equipement nécessaire pour l'essai de la masse volumique de polystyrène expansé

L'ensemble des caractéristiques physiques des granulats polystyrène expansé sont rassemblées dans le tableau II.5

Tableau II.5 : Caractéristiques physiques des granulats polystyrène expansé

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
21	29

I.3.2 Analyse granulométrique des billes de polystyrène par tamisage

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

Les valeurs granulométrique des billes de polystyrène expansé sont présentées sur les tableaux.II.6 et 7

Tableau II.6 : Analyse granulométrique des granulats de polystyrène de diamètre 1/2.5

Module AFNOR	Dimension tamis (mm)	Masse de refus partielle (gr)	Masse de refus cumulées (gr)	% Refus cumulée	% Tamisât (passant)
35	2.5	0	0	0	100
34	2.0	15	15	38.46	61.54
33	1.6	11	26	66.67	33.33
32	1.25	06	32	82.05	17.95
31	1.0	05	37	94.80	05.20
-	< 1.0	02	39	100	0

Tableau II.7 : Analyse granulométrique des granulats de polystyrène de diamètre 3.15/4

Module AFNOR	Dimension tamis (mm)	Masse de refus partielle (gr)	Masse de refus cumulées (gr)	% Refus cumulée	% Tamisât (passant)
37	4.0	0	0	0	100
36	3.15	26	26	91.23	8.77
-	< 3.15	2.5	28.5	100	0

Selon les valeurs des tableaux ci-dessus, on remarque que la répartition des diamètres de grain de polystyrène 1/2.5 englobe toutes les valeurs (1.0/ 1.25/ 1.6/ 2.0/ 2.5) d'une manière régulière par contre, celle de diamètre 3.15/4 ne représente que les diamètres 3.15 et 4. Cela est dû à l'industrialisation préalable du diamètre de ce matériau.

I.4 Caractérisation de l'eau de gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire.

L'eau qui est utilisée pour la confection de notre béton doit vérifier deux fonctions principales. D'une part, une fonction physique qui permet de conférer au béton les propriétés de fluidification et d'autre part une fonction chimique qui contribue à la réaction d'hydratation. Cette eau doit être propre.

Le tableau ci-dessous présente l'analyse chimique de l'eau de gâchage

Tableau II.8: Composition chimique de l'eau de gâchage [42]

Nature du point d'eau		Robinet		
Ca ⁺² en mg/l	104	Balance cations m. éq/l		5.20
Mg ⁺² en mg/l	97			8
Na ⁺ en mg/l	102.3			4.45
K ⁺ en mg/l	646			0.14
Cl ⁻ en mg/l	148	Balance Anions m. éq /l		4.17
SO ₄ ⁻² en mg/l	520			10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/l	94			/
NO ₃ ⁻ en mg/l	12.4			0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/l	PH 7.70	Conductivité en 1/10 mm à 25°C 16.77		dureté totale 43.25
Test chlore (ml d'eau de Javel à 15°/m ³) 0.96 ml/l		T.A.C 7.8°F	S.A.F 75°F	I.S 62.3°F
MINERALISATION 1010.60	M.O milieu Acide en O ₂ 8.53	SiO ₂ 4.45 mg/l		Somme des ions 1084 mg/l
Cations	Ca ⁺² = 15%	Mg ⁺² = 23.2%	Na ⁺ + K ⁺ = 13.4%	
Anions	HCO ₃ ⁻ = 4.5%	SO ₄ ⁻² = 53.8%	Cl ⁻ + NO ₃ ⁻ = 12.6%	

Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5. Si le choix a été porté sur cette eau c'est sa pureté et l'absence des excès des teneurs de sels, de sulfates et d'acides et ceux-ci on se basant sur le rapport fourni par le laboratoire ADE de Laghouat (Algérienne des eaux de Laghouat ex EPDEMIA).

II. Caractérisation du béton frais

II.1 Essai de consistance

Le but des essais de consistance est de quantifier la maniabilité et l'ouvrabilité, qui sont des qualités qui définissent la facilité de mise en œuvre du béton dans le coffrage, cette maniabilité classe les bétons suivant une échelle de fluidité croissante : ferme - plastique – très plastique – fluide.

➤ Essai d'écoulement (Essai au maniabilimètre B)

Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre B (figure II.13), conformément à la norme NF P18-452. Cette grandeur est caractérisée par la mesure d'écoulement qui est autant plus grande que la consistance du mortier est épaisse.



Figure II.13. Maniabilimètre B

III. Caractérisation du béton durci

III.1 Masse volumique apparente des bétons

La masse volumique apparente sèche p_{app} est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent V_t .

Les éprouvettes 4x4x16cm des bétons sont pesées régulièrement au cours du temps et pour les deux environnements (en salle et dans l'eau) et cela à l'aide d'une balance électronique de 5 kg avec précision de 0.1 gr

III.2 Résistance à la compression

Les essais sont réalisés selon la norme EN 196-1, en utilisant un appareil d'essais mécanique de marque "CONTROLS" de charge maximale de 100 kN (figure II.14). La valeur de la charge de rupture est lue directement sur le fichier résultat.



Figure II.14 : Machine utilisée pour la mesure des résistances mécaniques

Les prismes ont été soumis à compression au moyen d'une presse suivant le dispositif schématisé sur la figure II.15 .

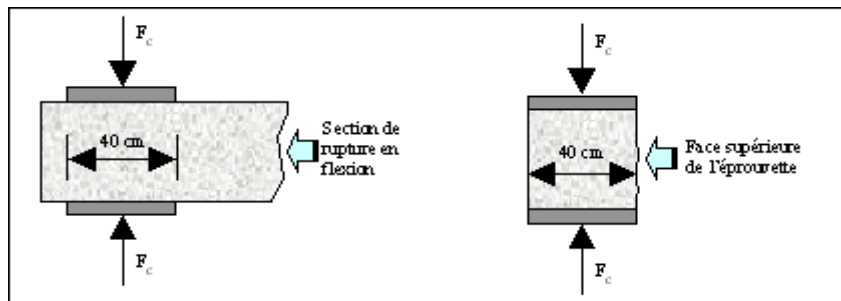


Figure II.15 : Dispositif pour l'essai de résistance à la compression

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

Où F_c est la charge de rupture en (N) ; b est la largeur de la section comprimée (= 40mm).

III.3 Variation dimensionnelles (mesure de retrait et degonflement)

L'équipement nécessaire, tel que celui schématisé sur la figure II.16, équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0,005 mm. Une tige de 160 mm de longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre.

L'essai, décrit par la norme [43], exige que la conservation des échantillons soit dans une salle où la température est maintenue à $(20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C})$ et l'humidité relative à $(50 \pm 5 \%)$. Cet essai consiste à comparer à différents temps (t), la variation de longueur d'une éprouvette (4 x 4 x 16 cm), par rapport au temps (to) pris comme origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24 heures après la confection des éprouvettes.

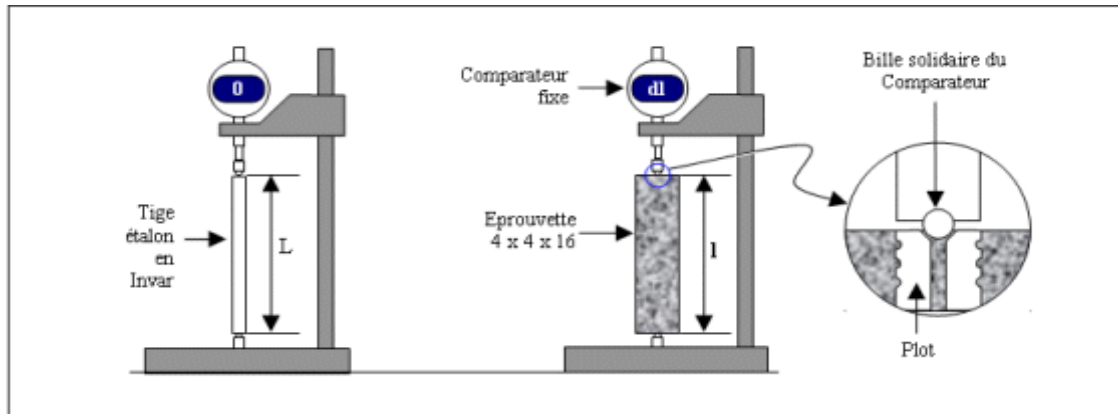


Figure II.16: l'appareille pour la mesure du retrait

III.4 Essai d'absorption d'eau

III.4.1 Essai de l'absorption capillaire[44]

Les essais d'absorptivité déterminent le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette de béton posée sur de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

Il existe une relation de la forme :

$$i = S t^{0.5} \dots\dots\dots(II.11).$$

Où :

- i : l'augmentation de la masse en g/mm^2 ;
- t : temps écoulé (en minute) au moment où la masse est mesurée en s ;
- S : absorptivité en $mm/min^{0.5}$;

La base de l'éprouvette prismatique $(4 \times 4) \text{ cm}^2$ est mise en contact avec une nappe d'eau. On suit l'évolution de la masse de cette éprouvette au cours du temps.

La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein. Les faces latérales sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique qui force l'eau à adopter un cheminement uniaxial et éviter l'évaporation par ces mêmes faces. La masse d'eau absorbée est déterminée par des

pesées successives des échantillons. La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à l'aide d'un papier absorbant.

Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $\text{HR} = 45 \pm 10\%$).

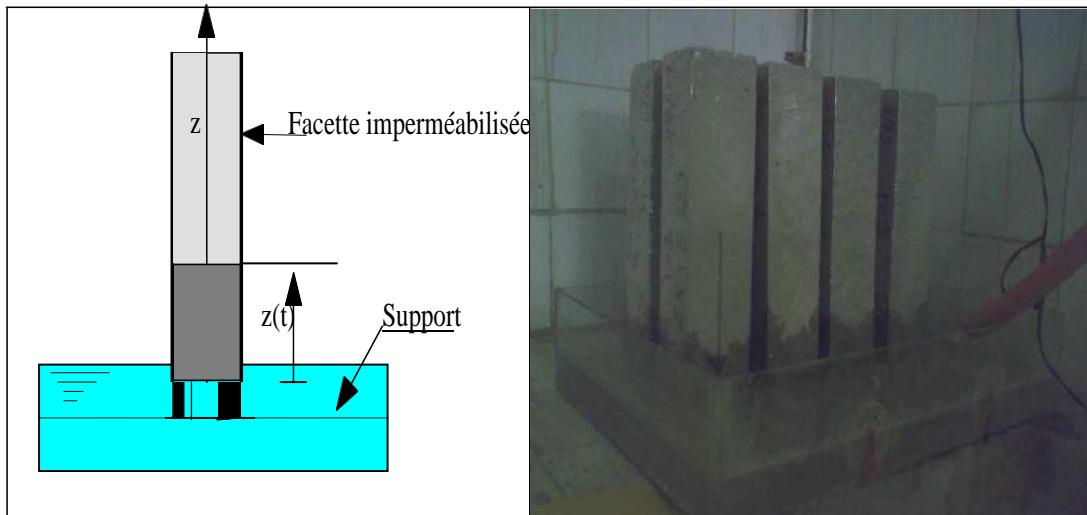


Figure II.17.: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire

III.5. Caractéristiques thermiques

Le transfert de chaleur est un phénomène d'échange d'énergie qui intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'il existe entre eux une différence de température. Le transfert de chaleur se fait en réalité selon trois modes particuliers : conduction, rayonnement et convection.

La connaissance des propriétés thermophysiques d'un matériau permet de comprendre ou de prévoir son comportement lorsqu'il est soumis à des variations de température. Les propriétés thermophysiques qui doivent être généralement connues sont : la diffusivité thermique, la conductivité thermique, la chaleur massique et l'enthalpie de transformation.

III.5.1 Méthodes de mesure des paramètres thermiques

De nombreuses méthodes de mesure de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermiques des matériaux s'appuient sur la détermination d'un champ de température dans des échantillons de géométrie connue, en imposant des conditions aux limites constantes ou variables avec le temps.

Parmi ces méthodes, citons deux méthodes les plus utilisées, il s'agit de la technique de la sonde mono tige à faible inertie thermique, et la méthode de la sonde plane **TPS** (Transient Plane Source). Pour nos mesures on a utilisé la technique de la sonde plane **TPS**, en raison de sa capacité de

détermination de la conductivité et la capacité thermique des matériaux contrairement à la méthode de la sonde mono tige qui ne permet de déterminer que la conductivité thermique. De plus les erreurs liées à la résistance de contact sont minimales dans la **TPS** que dans la sonde monotige.

III.5.2 Dispositif expérimental

L'essai consiste à placer en sandwich la sonde TPS (figure II.20) et la relier à un circuit électrique. La variation de la résistance au borne du pont de Whestone, ΔU permet d'accéder à la différence de potentielle $\Delta E(t)$ aux bornes de l'élément TPS. Une relation entre $\Delta E(t)$ et la variation de température dans l'élément **TPS** peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique a et de conductivité thermique λ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à λ a et ensuite.

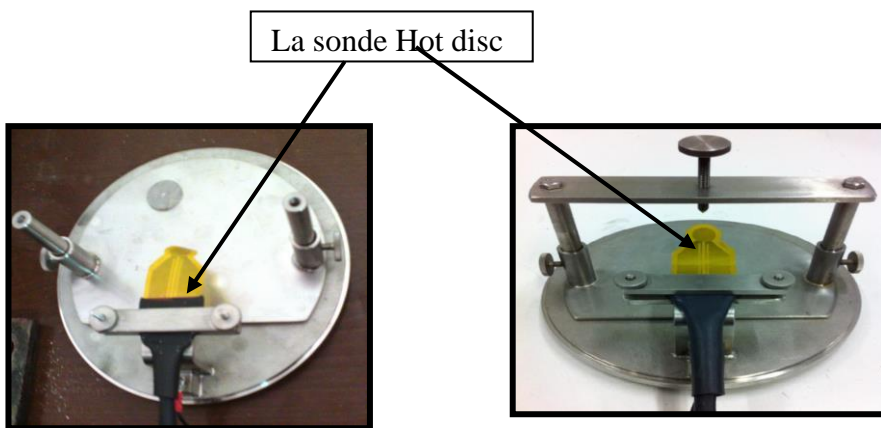


Figure II.18 : Schéma de la sonde TPS.

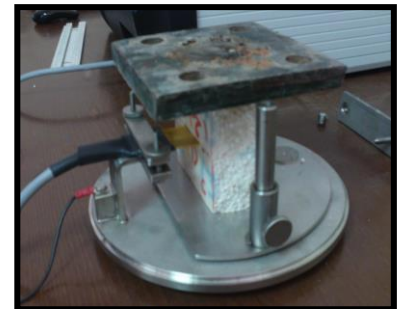


Figure II.19 : Dispositif de serrage, sonde, éprouvette.

III.5.3 Avantages de la méthode TPS

Les principaux avantages de la technique TPS (Transient Plane Source ou Hot Disk) sont :

- Elle ne demande pas un matériel sophistiqué;
- Elle permet de faire la mesure de plusieurs paramètres thermiques à la fois;
- Elle peut être utilisée pour la mesure d'une large gamme de propriétés et dans différentes conditions (liquides, hautes et basses températures, plaques...);
- L'utilisation de capteurs avec une grande surface permet de couvrir une grande surface à l'échelle du volume élémentaire représentatif;
- La différence entre l'évolution de la température entre la couche d'isolation et le milieu étudié, permet d'étudier des matériaux avec des conductivités thermiques différentes (couches minces);
- Les mesures peuvent être faites sur des échantillons de diverses formes et de différentes tailles, à condition de posséder au moins une surface plane;

- Elle est utilisable pour la mesure des propriétés thermo-physiques des matériaux anisotropes;
- Estimation extrêmement précise des paramètres : 3 à 5% sur la conductivité thermique;
- Appareil polyvalent et modulable : champ d'application très vaste mesures sur solides, liquides, poudres et pâtes ;
- Diversité des environnements de mesure : des températures cryogéniques (-200°C) aux hautes températures (+1000°C);
- Différents modules et options : facilite la réalisation de vosmesures.

III.5.4 Conception de l'élément TPS

L'élément TPS qui doit être utilisé dans cette méthode doit être constitué d'un élément résistif jouant, à la fois, le rôle de résistance chauffante et de capteur de température. Il peut, en principe, avoir plusieurs formes (rectangulaire, disque, etc.) et plusieurs tailles suivant la configuration géométrique de l'échantillon et le type de matériau utilisé. Pour des raisons de commodité, tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, deux configurations ont été retenues pour le modèle résistif TPS, la forme rectangulaire et la forme disque (figure II.20). Cependant il existe plusieurs tailles du capteur afin de pouvoir effectuer des mesures sur des échantillons de différentes dimensions.

Dans ce travail, l'élément TPS utilisé est en forme de disque, dont le capteur TPS est constitué d'une feuille métallique en Nickel en forme de spirales bifilaires insérées entre deux couches isolantes en Kapton, Teflon ou Mica pour des températures inférieures à 200°C. Les épaisseurs de la feuille et de la couche de Kapton sont respectivement de 10 et 25 μm . Les diamètres effectifs des spirales bifilaires sont de 20 et 30 mm et ceux de la couche de Kapton de 25 et 40 mm, Déclinable en plusieurs disques de rayon de 0.5 à 30mm.

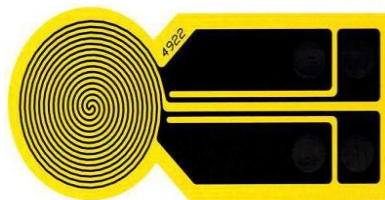


Figure II. 20 : Vue d'une sonde Hot disc.

III.5.5 Conductivité thermique de polystyrèneutilisé

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 $0.037 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux.

La Figure II.21 montre le dispositif utilisé pour la détermination des caractéristiques thermo-physique du polystyrène

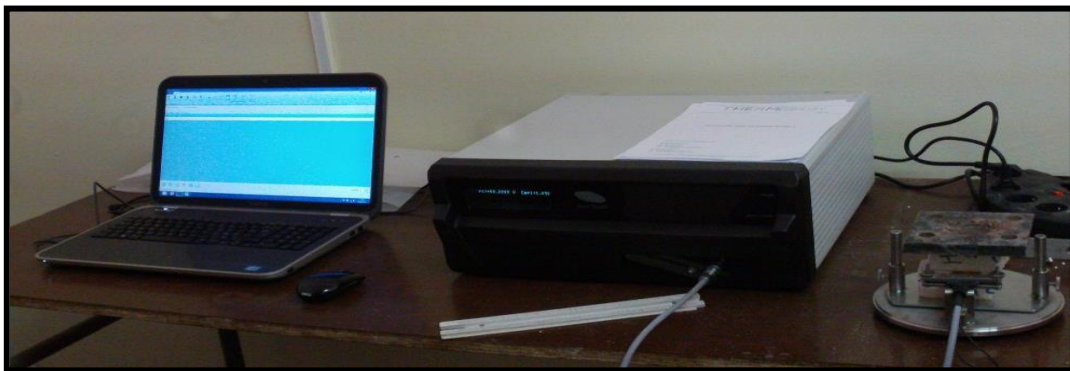


Figure II.21 : Dispositif expérimental pour la mesure de la caractéristique thermique (méthode TPS).

La Figure II.22 montre la sonde TPS pour mesurer les caractéristiques thermiques du polystyrène expansé.



Figure II.22 : Schéma de la sonde TPS (mesure caractéristiques thermiques du polystyrène).

Le résultat des caractéristiques thermiques du polystyrène sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.9.: Caractéristiques thermiques du polystyrène.

Conductivité thermique	Diffusivité thermique	Chaleur spécifique
λ (W. m ⁻¹ .K ⁻¹)	a (mm ² /s)	c (MJ. m ⁻³ .K ⁻¹)
0.028	1.23	0.022

D'après le tableau II.11, nos résultats sont en accord avec la littérature [45]0.028W.m⁻¹.K⁻¹ est incluse dans l'intervalle 0.027 à 0.037 W.m⁻¹.K⁻¹).

III.6 Microscope Optique LEICA DMLM

Le DM LM Leica est un microscope moderne avec une conception modulaire qui le rend approprié pour une large gamme d'applications d'examen de routine simples en science des matériaux en matière et travaux de recherche. Il possède de nombreuses fonctionnalités qui rendent le quotidien de l'utilisateur plus léger et la charge de travail plus pratique. La performance clé des caractéristiques de la DM LM Leica sont sa modularité, son potentiel d'application universel, de stabilité, ergonomie et une excellente optique. Il possède une optique binoculaire avec acquisition photo par caméra numérique assistée par ordinateur et un grossissement optique x1000.



Figure II.23: Microscope Optique LEICA

IV. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des essais de caractérisation des matériaux étudiés et du matériel associé. D'après les différents essais de caractérisation des matériaux, on peut conclure que le sable exploité est un sable fin, propre et sans trop d'impuretés. Son emploi comme sable de béton peut conférer à ce dernier les performances mécaniques requises.

La caractérisation des billes de polystyrène utilisé a révélé une masse volumique absolue de 29 kg/m^3 et masse volumique apparente de 21 kg/m^3 . Ces billes sont des granulats organiques artificiels, se présentant sous forme de billes parfaitement sphériques. Elles sont hydrophobes et imputrescible.

L'étude de la composition des bétons à matrice cimentaire et sableuse avec polystyrène et les résultats des essais physico-mécaniques et thermiques des bétons de polystyrène élaborés, sont étudiés dans le chapitre suivant.

Introduction

La plupart des bétons légers, notamment les bétons légers de structure sont formulés de la même manière que les bétons classiques. Les critères recherchés dans les méthodes de formulation sont généralement la résistance et la maniabilité [16, 32]. Par contre, pour les bétons légers de construction et d'isolation, un compromis entre la résistance et les performances physiques et thermiques doit être pris en compte lors de la formulation, c'est le cas des bétons de polystyrène élaborés dans notre travail.

On désigne par :

- **MCLP** : Matrice ciment léger de polystyrène;
- **MSLP** : Matrice ciment + sable calcaire léger depolystyrène

En plus, l'incorporation des billes de polystyrène expansées dans le béton est réalisée afin d'améliorer son pouvoir isolant et son poids, compte tenu de l'effet des paramètres liés aux billes, tel que le dosage et la granulométrie, sur le comportement physico-mécanique des deux matrices (ciment et ciment + sable). Nous allons examiner dans ce chapitre, l'influence du pourcentage et le diamètre des billes de polystyrène sur les propriétés physique et mécaniques telles que la masse volumique, la résistance à la compression ainsi que les variations dimensionnelles et les propriétés thermiques des matériaux élaborés.

I. Formulation de la matrice cimentaire

Pour déterminer le dosage en ciment, on a procédé à la confection d'une série d'éprouvettes 4x4x16 cm en faisant varier le rapport E/C d'une valeur minimale de 0.26 à une valeur maximale de 0.32.

Après 03 jours, on soumet ces différents échantillons à l'essai d'écrasement par compression. Le pourcentage d'eau optimum est celui qui fournit la résistance à la compression maximale.

Les résultats des résistances en compression de la patte de ciment pour les différents dosages en eau sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Valeurs de la résistance en compression en fonction du rapport E/C

Dosage en eau (E/C)	0.26	0.28	0.30	0.32
Résistance à la Compression (MPa)	40.85 ± 5.8	48.06 ± 6.1	55.55 ± 6.4	35.73 ± 5.2

La variation de la résistance à la compression à trois jours en fonction du rapport E/C est représentée sur la figure III.1.

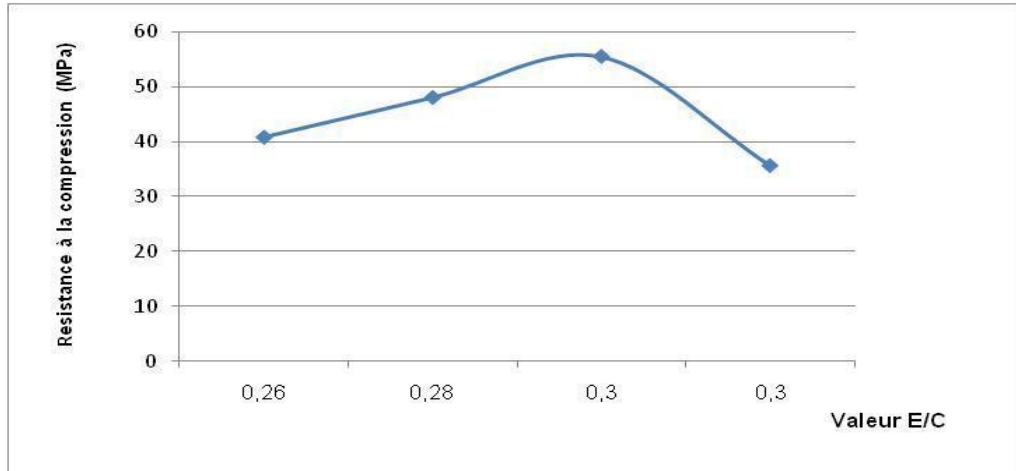


Figure III.1: Variation de la résistance à la compression de la pâte de ciment en fonction du rapport E/C

D'après les résultats obtenus, on voit que l'optimum des résistances correspond à un rapport E/C=0.3. Ceci est en accord avec les travaux antérieurs [32].

Ce rapport est maintenu constant pour déterminer la quantité de l'eau de gâchage des bétons élaborés à laquelle on doit ajouter des granulats tableau ci-dessous.

Tableau III.2: Compositions pondérales de MCLP

Pourcentage de polystyrène (%)	Masse de Polystyrène (g)	Masse de ciment (g)	E/C	Masse de l'Eau (g)
0	0	1720,32	0.3	516,10
20	8,91	1376,26	0.3	412,88
40	17,82	1032,19	0.3	309,66
60	26,73	688,13	0.3	206,44

II. Formulation de la matrice ciment +sable

Pour la recherche d'une matrice de bonne mise en œuvre [32], on procède comme suite:

- Tout d'abord on fixe un rapport E/C = 0.6 égal aux taux de gâchage;
- Pour le sable, on prend un rapport C/S = 0.3 en poids;
- le pourcentage de polystyrène utilisés et de 0 à 60 % avec un pas de 20%.

La formulation des bétons de polystyrène est élaborée en substituant le volume des billes de polystyrène ajoutées par un même volume de sable.

Les compositions de la formulation du béton à matrice calcaire à base des billes de polystyrène sont illustrées sur le tableau ci-dessous :

Pourcentage de polystyrène (%)	Masse de Polystyrène (g)	Masse de Sable (g)	C/S	Masse de ciment (g)	E/C	Masse de l'Eau (g)
0	0	2347,01	1/3	782,34	0,6	469,40
20	8,91	1877,61	1/3	625,87	0,6	375,52
40	17,82	1408,20	1/3	469,40	0,6	281,64
60	26,73	938,80	1/3	312,93	0,6	187,76

Tableau III.3: Compositions pondérales de MSLP

Lors de la substitution du sable par le polystyrène, on remarque que l'ouvrabilité diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de polystyrène et la maniabilité devient difficile au-delà de 60% de polystyrène. Les tableaux III.2 et III.3 illustrent les quantités de différentes composantes du mélange calculées à partir d'un volume total égal à 1536cm^3 qui représente le volume d'un échantillon de trois éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ et cela dans deux modes de cures.

III. Préparation des éprouvettes

Nous avons adoptées pour les bétons de sable un malaxage normalisé selon la norme européenne **EN 196-1** [41] et nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage, le mélange soit le plus homogène possible. Le mélange est effectué au moyen d'un malaxeur de 5 litres de capacité (photo III.2), il comporte une palette permettant un mouvement planétaire susceptible de fonctionner à deux vitesses (dites lente et rapide) : 140 et 285 tr/mn.

Des moules normalisés ont été utilisés. Ces moules servent au moulage de 3 éprouvettes prismatiques de béton de dimension $4 \times 4 \times 16\text{cm}^3$.



Figure III.2. Malaxeur utilisé pour la confection des éprouvettes

III.1. Mode de malaxage de béton de polystyrène

Afin d'éviter le problème de ségrégation en raison de la légèreté des granulats, l'ordre d'introduction des différents constituants du béton dans le malaxeur était le suivant [28]:

- Introduction des billes de polystyrène + la moitié de l'eau;
- Malaxer l'ensemble à vitesse lente pendant 30 s;
- Introduction du ciment pendant 30 s;
- Introduction du sable calcaire pendant 30 s;
- Compléter l'eau restante pendant 15 s;
- Malaxer l'ensemble pendant 1 min 30 s à vitesse rapide;
- Arrêter la machine et traclage de la paroi de la cuve pendant 15 s;
- Remettre la machine en route à vitesse rapide pour une durée de 2 min.

III.2. Mise en moule

La mise en moule du béton de sable est effectuée en introduisant celui-ci en deux couches avec application de 25 coups pour chaque couche. Le surplus du béton dans les moules est arasé à l'aide d'une truelle. Après finitions, les moules sont recouverts d'une toile en plastique afin d'éviter la dessiccation rapide du béton et sont conservés dans les conditions de laboratoire ($T=24\pm 5^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $60\pm 5\%$) durant 24h.

Les moules utilisés pour les essais mécaniques et l'essai de variation dimensionnelle sont représentés sur les figures ci-dessous :



Figure III.3 : Moules utilisés pour l'essai mécanique



Figure III.4 : Moules utilisés pour l'essai de variation dimensionnelle.

III.3. Mode de conservation

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées pendant quatre jours dans un bac complètement rempli d'eau potable (HR=100% et $T=20^{\circ}\text{C} \pm 1$). Les éprouvettes sont retirées du bac d'eau et conservées à l'air libre du laboratoire ($T=24\pm 5^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=60\pm 5\%$) jusqu'à l'âge de 28j. Avant d'effectuer les différents essais physicomécaniques, les éprouvettes sont séchées en étuve à $T=105^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.

Afin d'étudier l'apport de l'environnement de cure sur les caractéristiques physicomécaniques des éprouvettes ainsi élaborées, ces derniers sont conservés dans deux environnements :

- Les conditions ambiantes du laboratoire qu'on désigne par milieu de conservation 1 (Milieu1).
- Une cure par immersion dans l'eau qu'on désigne par milieu de conservation 2 (Milieu2).

IV. Caractérisation des bétons frais

IV.1. Consistance et maniabilité

Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité du béton léger.

Les deux paramètres les plus intéressants sont :

- La variation de la quantité d'eau initialement absorbée par les granulats légers
- La quantité d'eau de gâchage.

La maniabilité des bétons de sable calcaire sans billes de polystyrène a été également étudiée dans des travaux précédents [32]. Elle dépend du dosage de tous les constituants et essentiellement du dosage en eau. Elle s'améliore, comme pour tous les bétons, avec l'augmentation du rapport E/C.

Toutefois, l'augmentation de la quantité d'eau de gâchage améliore la maniabilité mais diminue la résistance. D'après plusieurs études [32] et [36], les bétons de polystyrène ont des maniabilités très faibles et les essais au cône d'Abrams ont donné des affaissements presque nuls. On a utilisé le consistomètre Vébé pour évaluer la maniabilité des bétons de sable calcaire; les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.4.

Tableau III.4 : Valeur du temps Vébé en fonction du dosage en granulats

Série d'échantillons	Série 0	Série 1	Série 2	Série 3
	0(%)	20(%)	40(%)	60(%)
Béton de polystyrène	4 s	11 s	23 s	37 s

D'après les valeurs du temps de l'essai de consistance Vébé, qui sont toutes supérieures à 10

secondes, on voit bien que le béton a une faible maniabilité qui est causée par la forme des grains et par le dosage élevé en granulats. D'autre part, on a remarqué pendant le malaxage que les granulats se chargent de ciment toutautour.

IV.2. Etude de la masse volumique du béton frais

Les figures III.5 et III.6 illustrent la variation de la masse volumique de la matrice ciment et la matrice ciment + sable calcaire en fonction du dosage en granulats de polystyrène.

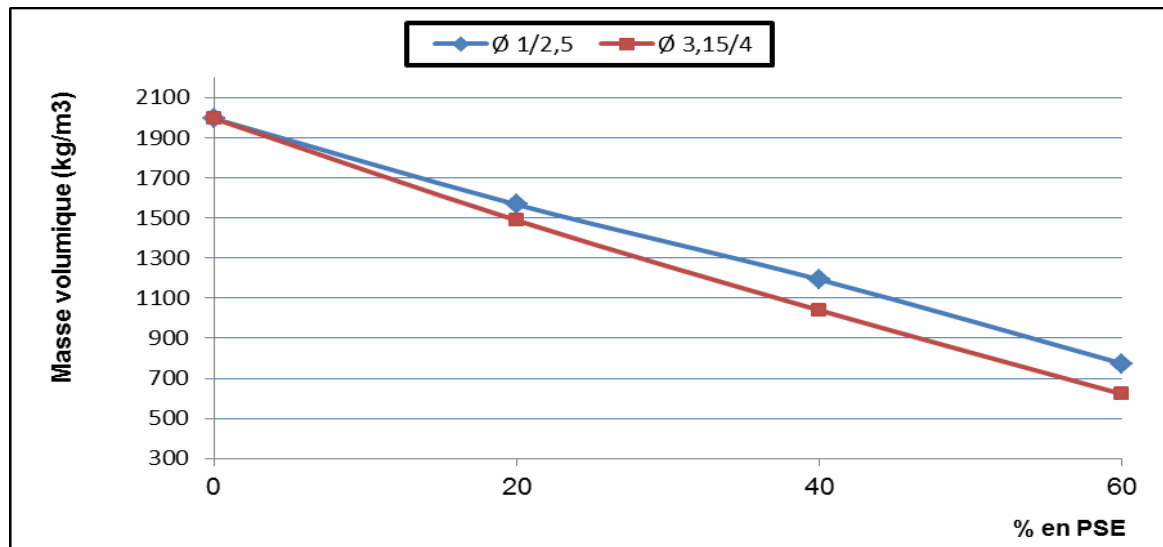


Figure III.5: Variation de la masse volumique de la matrice ciment en fonction du dosage en granulats de polystyrène

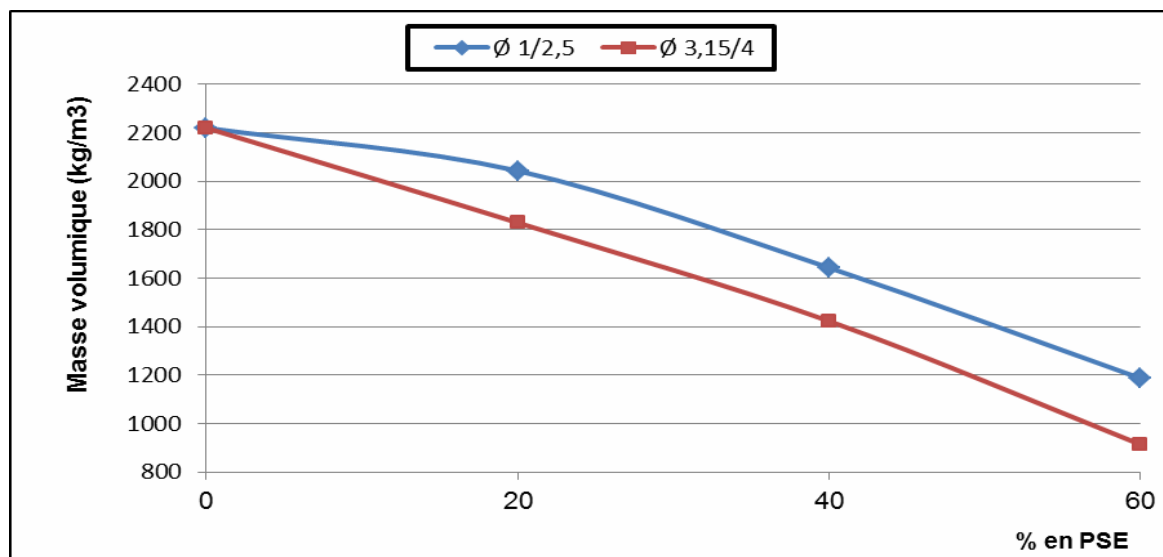


Figure III.6 : Variation de la masse volumique de la matrice ciment + sable en fonction du dosage en granulats de polystyrène

D'après les figures III.5 et III.6 nous remarquons que l'évolution de la masse volumique des deux matrices (ciment et ciment + sable) à l'état frais est décroissante en fonction du pourcentage du bille

de polystyrène. Ceci paraît logique puisque la masse volumique des billes de polystyrène est très faible par rapport aux autres constituants. Ces constatations sont en accord avec les travaux [36].

La masse volumique du béton sable calcaire témoin est à l'ordre de 2220 kg/m^3 , et après ajout des billes de polystyrène, elle a diminué graduellement jusqu'à 2043 pour la classe granulaire 1/2.5 et 1829 pour la classe granulaire 3.15/4. Ceci paraît logique parce qu'on substitue les grains de sable par les grains de polystyrène.

La masse volumique du béton du sable calcaire est supérieure à celle de la matrice cimentaire puisque le sable a une masse volumique supérieure à celle du ciment.

V. Caractéristiques des bétons durcis

Les éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, des deux types de bétons, sont pesées régulièrement au cours du temps aux âges de 1, 3, 5, 7, 14, 21 et 28 jours et cela à l'aide d'une balance de précision de 0.1 g .

V.1: Variation de la masse volumique apparente en fonction du dosage en granulats de polystyrène

- MCLP, $D = 1/2.5 \text{ mm}$

Les résultats des masses volumiques des ciments légers de polystyrène ($D = 1/2.5 \text{ mm}$) pour les différents modes de cures sont illustrés sur la figure III.7 .

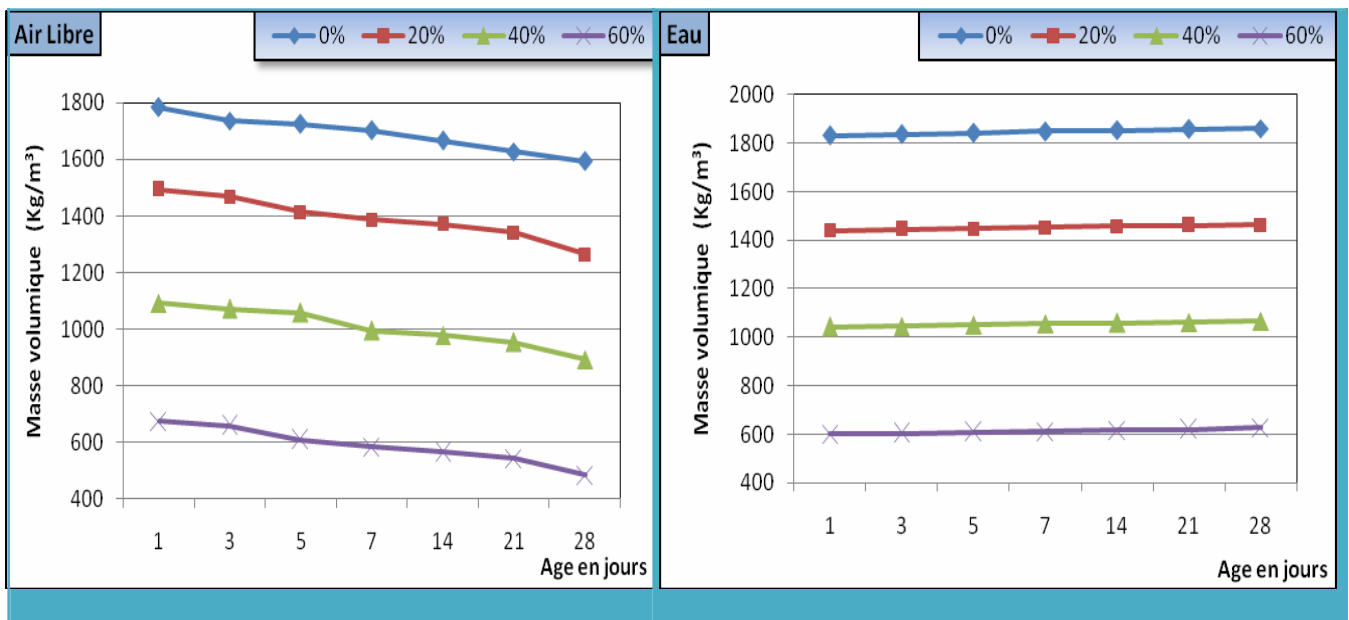


Figure III.7 : Variation de la masse volumique du MCLP, $D = 1/2.5 \text{ mm}$ en fonction de l'âge pour les différents modes de cures

D'après la figure III.7, les résultats des masses volumiques du MCLP à l'air libre montrent que la masse volumique décroît en fonction du pourcentage des granulats, cela est dû à la substitution d'une partie de la matrice par son équivalent en matériaux moins denses.

La masse volumique décroît aussi en fonction de l'âge des éprouvettes dans le premier mode de cure qui correspond à l'air libre. Les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec les études de [36]. Par contre dans le mode de saturation, on voit que la masse volumique augmente très légèrement quel que soit le pourcentage des billes de polystyrène et l'âge de l'échantillon. Cela est dû à l'augmentation de la masse de l'eau absorbée par l'éprouvette durant les mesures.

- **MCLP, D = 3.15/4mm**

Les résultats des masses volumiques des bétons légers ciment polystyrène (D = 3.15/4 mm) pour les différents modes de cures sont illustrés sur la figure III.8.

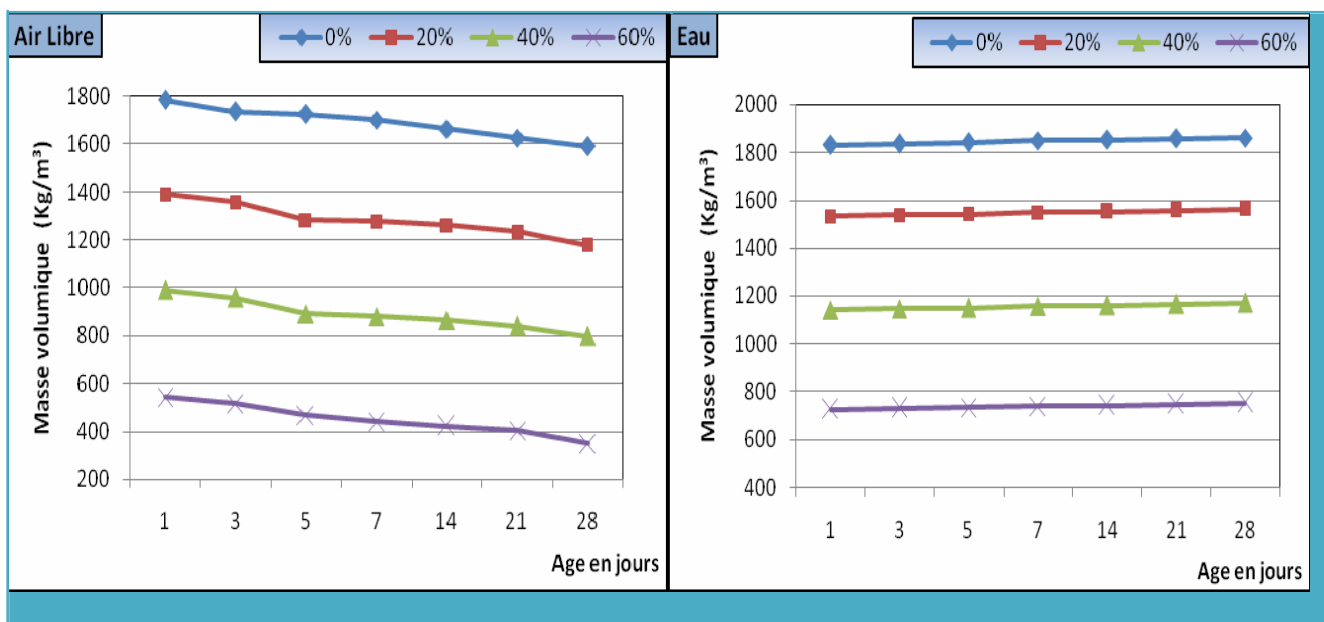


Figure III.8 : Variation de la masse volumique du MCLP, D = 3.15/4 mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cures

D'après la figure III.8 on trouve les mêmes remarques que la figure III.7. De plus, la granulométrie de polystyrène n'a pas une influence significative sur la masse volumique vu qu'il s'agit du même pourcentage massique.

- **MSLP, D = 1/2.5 mm**

Les résultats des masses volumiques des bétons légers ciment + ciment sable polystyrène (D=1÷2.5mm) pour les différents modes de cures sont illustrés sur la figure III.9.

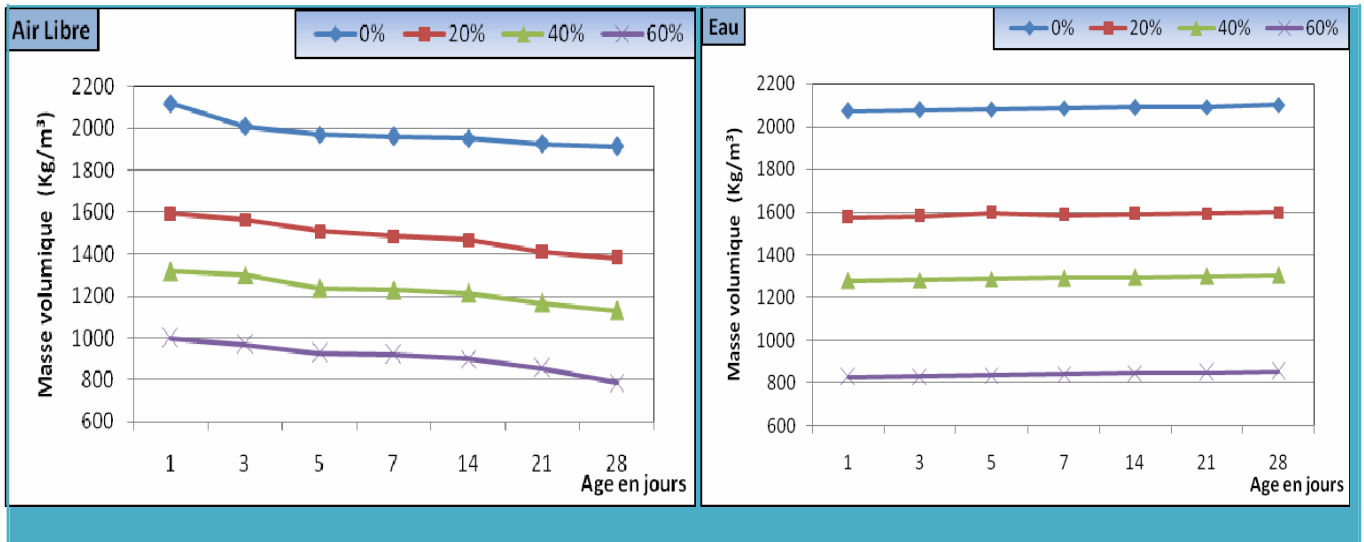


Figure III.9 : Variation de la masse volumique du MSLP, D = 1/2.5 mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cures

Pour les matrices ciment + sable calcaire de polystyrène, la figure III.9 montre que la masse volumique décroît en fonction du pourcentage des granulats 1/2.5 de la même manière que les matrices ciment polystyrène, on signale que les masses volumiques des matrices MSLP sont plus élevées que les masses volumiques de MCLP.

La masse volumique décroît aussi en fonction de l'âge des éprouvettes dans le premier mode de cure, par contre dans le mode de saturation on voit que la masse volumique augmente très légèrement quel que soit le pourcentage des billes de polystyrène et l'âge de l'échantillon.

- **MSLP, D = 3.15/4 mm**

Les résultats des masses volumiques des bétons légers ciment + ciment sable polystyrène (D=3.15/4mm) pour les différents modes de cures sont illustrés sur la figure III.10.

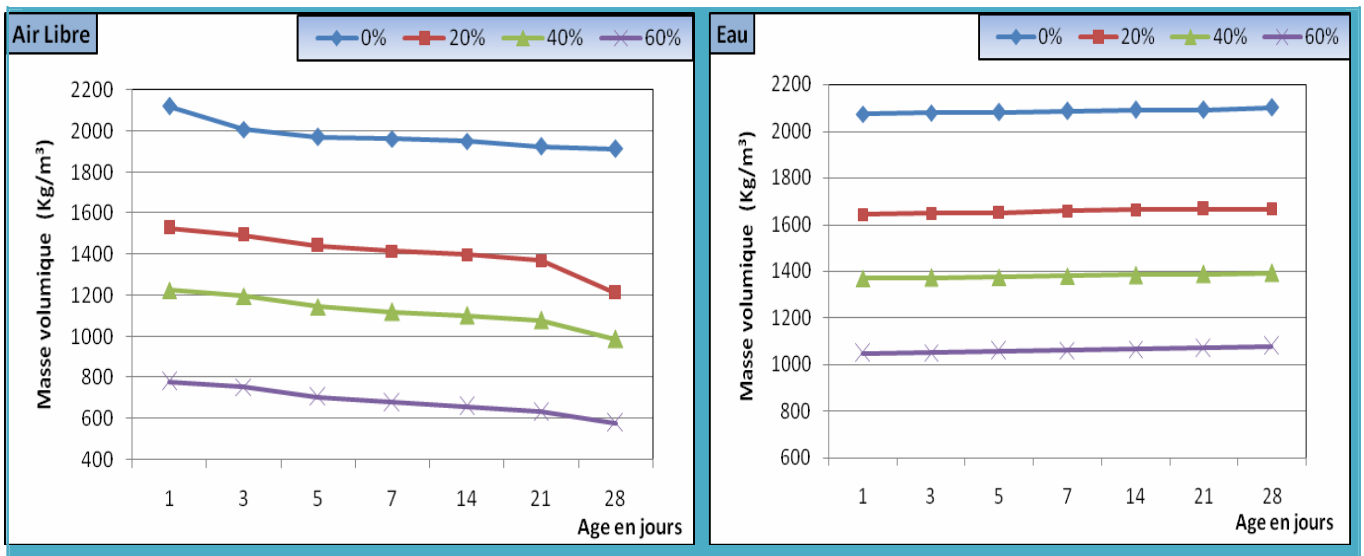


Figure III.10 : Variation de la masse volumique du MSLP, D = 3.15/4 mm en fonction de l'âge pour les différents modes de cures

Pour les matrices ciment + ciment sable polystyrène la figure III.10 montre que la masse volumique décroît en fonction du pourcentage des granulats 3.15/4 même que les matrices ciment polystyrène. On signale que les masses volumiques des matrices MSLP sont plus élevées que les masses volumiques de MCLP. Ces constatations sont en accord avec les travaux [36].

La masse volumique décroît aussi en fonction de l'âge des éprouvettes dans le premier mode de cure, par contre dans le mode de saturation on voit que la masse volumique augmente très légèrement quel que soit le pourcentage des billes de polystyrène et l'âge de l'échantillon.

D'après les figures III.7 à III.10 et pour le premier mode (air libre) la masse volumique apparente des matrices élaborées (MCLP, MSLP) diminue rapidement aux trois premiers jours à cause de l'évaporation de l'eau, puis elle commence à se stabiliser à partir de l'âge de 21 jours.

En augmentant le dosage en granulats de polystyrène, la masse volumique décroît car la petite valeur de la masse volumique est obtenue pour 60 % de granulats de polystyrène et la grande valeur de la masse volumique correspond à 0 % de granulats de polystyrène.

La masse volumique des éprouvettes conservées dans l'ambiance du laboratoire diminue avec l'âge. Ce phénomène est dû à l'évaporation en excès de l'eau de gâchage.

La masse volumique des éprouvettes conservées dans l'eau augmente légèrement avec l'âge de l'éprouvette, jusqu'à saturation de cette éprouvette, ou elle atteint sa plus grande valeur, ceci est dû à l'absorption d'eau par les éprouvettes.

V.2. Variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en granulats de polystyrène

On classe généralement les bétons selon leurs résistances mécaniques à 28 jours. Plusieurs facteurs influent sur cette résistance, comme par exemple le rapport E/C, le rapport G/S, la classe de ciment et même les propriétés des granulats (densité, état de surface...).

L'essai consiste à comprimer jusqu'à écrasement l'éprouvette sur un bâti de compression avec une vitesse de mise en charge de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$. L'augmentation de la charge d'écrasement se fait automatiquement et la force de rupture est affichée sur l'écran de l'appareil où l'on effectue la lecture en kN pour chaque essai, on a testé six éprouvettes.

- MCLP

Les résultats de la variation de résistance à la compression du MCLP, sont illustrés sur la figure ci-dessous.

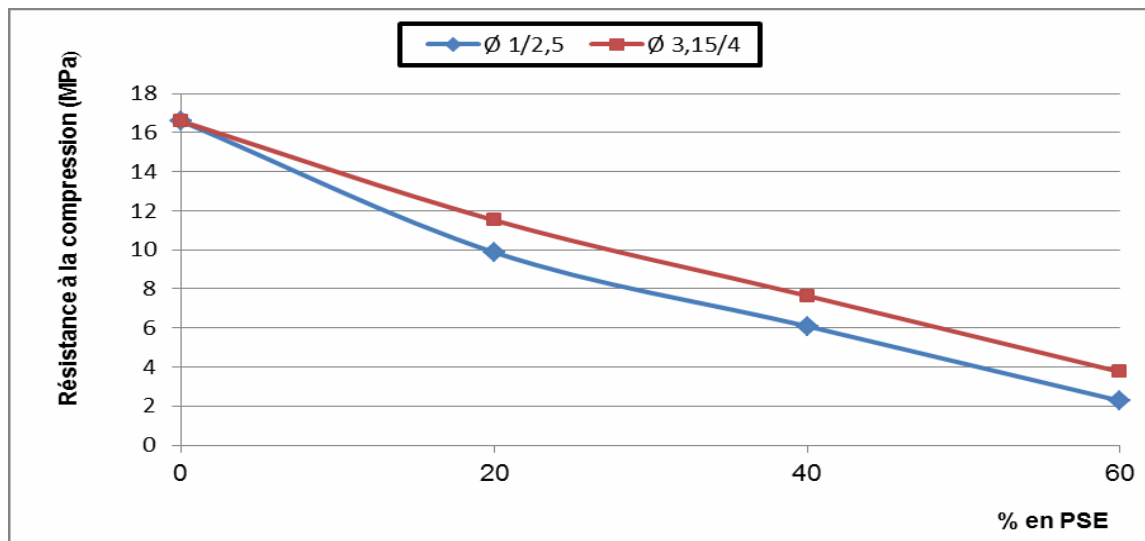


Figure III.11 : Variation de la résistance à la compression de MCLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'air libre

Nous constatons, d'après la figure III.11 ci-dessus, que la résistance en compression diminue avec l'ajout des billes de polystyrène, ceci est tout à fait logique car la résistance à la compression est, comme pour les bétons classiques, une fonction croissante de la masse volumique et que les efforts de compression sont repris par la matrice.

Nous constatant aussi que les valeurs des résistances pour les petits diamètres des billes de polystyrène sont plus grandes que les valeurs des résistances pour les grands diamètres.

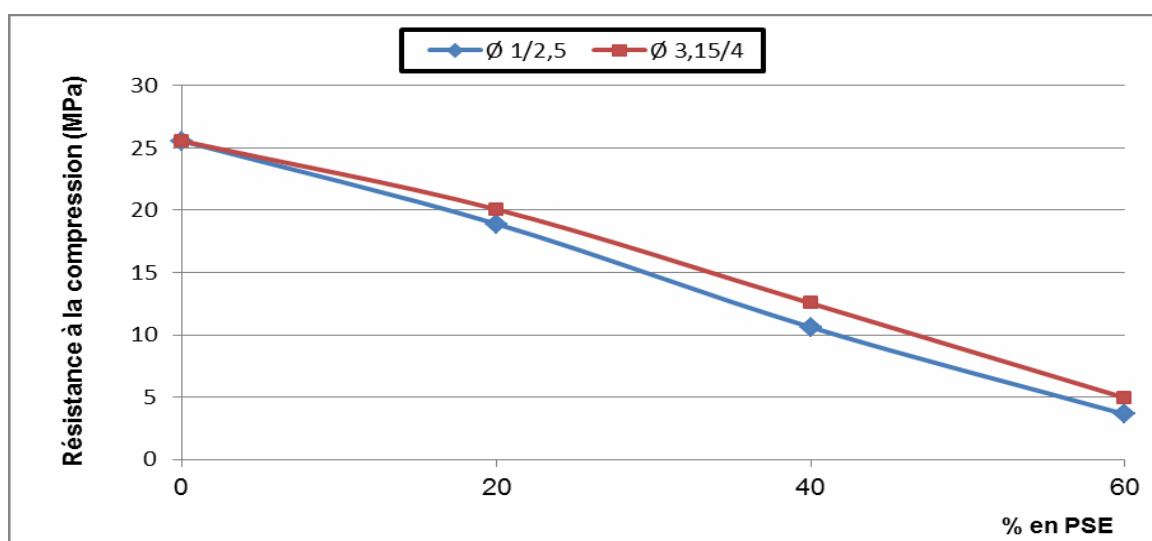


Figure III.12 : Variation de la résistance à la compression de MCLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'eau

Les résultats que nous avons obtenus sont en accord avec les études [1].sur l'effet de taille de bille de polystyrène sur la résistance à la compression des bétons légers.

Par contre les valeurs des résistances pour les grands diamètres des billes de polystyrène sont plus grandes que les valeurs des résistances pour les petits diamètres dans ce mode de cure.

- MSLP

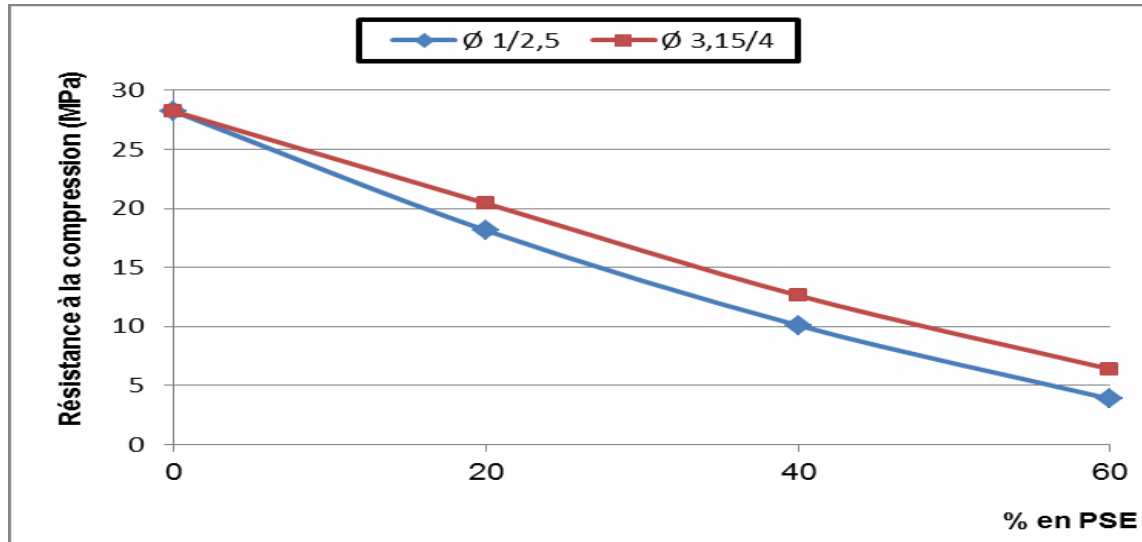


Figure III.13 : Variation de la résistance à la compression de MSLP, en fonction du pourcentage du polystyrène à l'air libre

Dans le cas des matrices de MSLP nous constatons d'après la figure III.12 que la résistance en compression diminue avec l'ajout des billes de polystyrène. Nous remarquons que les valeurs des résistances pour les petits diamètres des billes de polystyrène sont plus grandes que les valeurs des résistances pour les grands diamètres dans ce mode de cure.

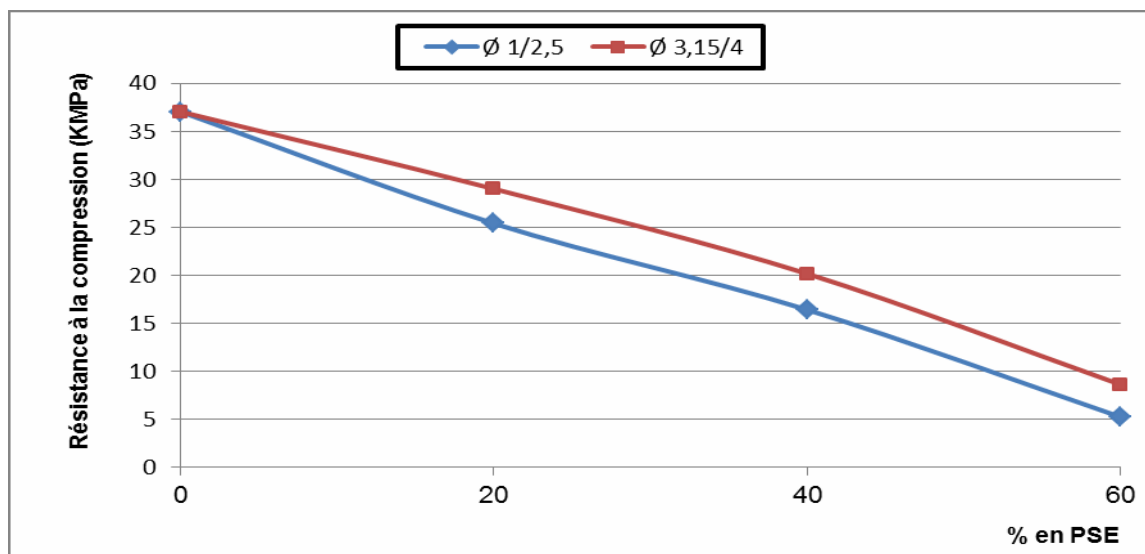


Figure III.14 : Variation de la résistance à la compression de MSLP en fonction du pourcentage du polystyrène à l'eau

Dans le cas des matrices de MSLP nous constatons d'après la figure III.13 que la résistance en compression diminue avec l'ajout des billes de polystyrène. Contrairement au cas précédant on remarque que les valeurs des résistances pour les grands diamètres des billes de polystyrène sont plus grandes que les valeurs des résistances pour les petits diamètres dans ce mode de cure.

On remarque clairement que la résistance à la compression des matrices ciment + sable polystyrène est supérieure à celles du matrices ciment polystyrène dans les deux modes de cures (Air libre –Eau).

D'après les résultats des essais mécaniques effectués sur les deux matrices élaborées (MCLP,MSLP) on remarque que la résistance de compression diminue avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène , ce qui est comparable avec les études de [1]et[36].

V. 3. Variation dimensionnelle

Elle consiste à mesurer la variation dimensionnelle longitudinale relative par rapport à la longueur initiale de l'éprouvette après 24 heures de démoulage ($L_0 = 16\text{cm}$). L'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. On prend la moyenne des trois mesures sur trois éprouvettes.

L'appareil de l'essai doit être étalonné avant chaque série de mesures avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

Le retrait étant exprimé par :

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_f - L_i}{16} \right| \dots\dots\dots\text{(III.1)}.$$

L_f : La longueur finale;

L_i : La longueur initiale;

L_0 : La longueur initiale après 24 heures de démoulage. ($L_0 = 16\text{ cm}$)

V.3.1. Variation de retrait de MCLP

- MCLP, $D = 1/2.5\text{mm}$

Variation de retrait des MCLP en fonction de l'âge de l'éprouvette.

Les résultats de la variation de retrait du MCLP, $D = 1/2.5\text{ mm}$ sont illustrés sur la figure ci-dessous.

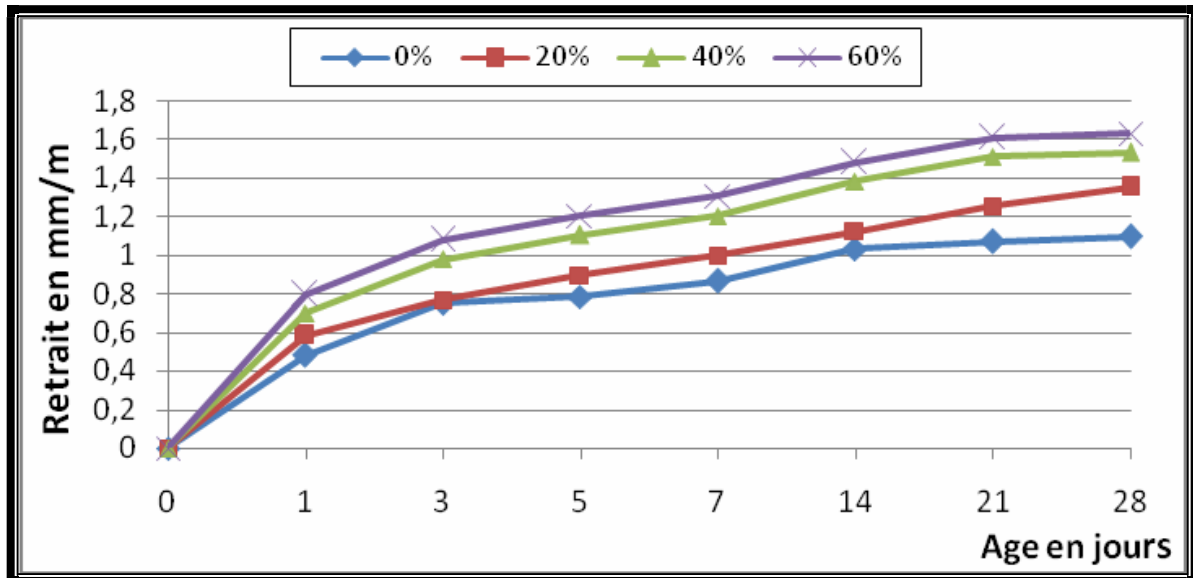


Figure III.15 : Variation de retrait de MCLP, $D = 1/2.5\text{ mm}$ en fonction de l'âge de l'éprouvette

- MCLP, $D = 3,15/4\text{mm}$

2. Variation de retrait des MCLP en fonction de l'âge de l'éprouvette.

Les résultats de la variation de retrait du MCLP, $D = 3,15/4\text{mm}$ sont illustrés sur figure ci-dessous.

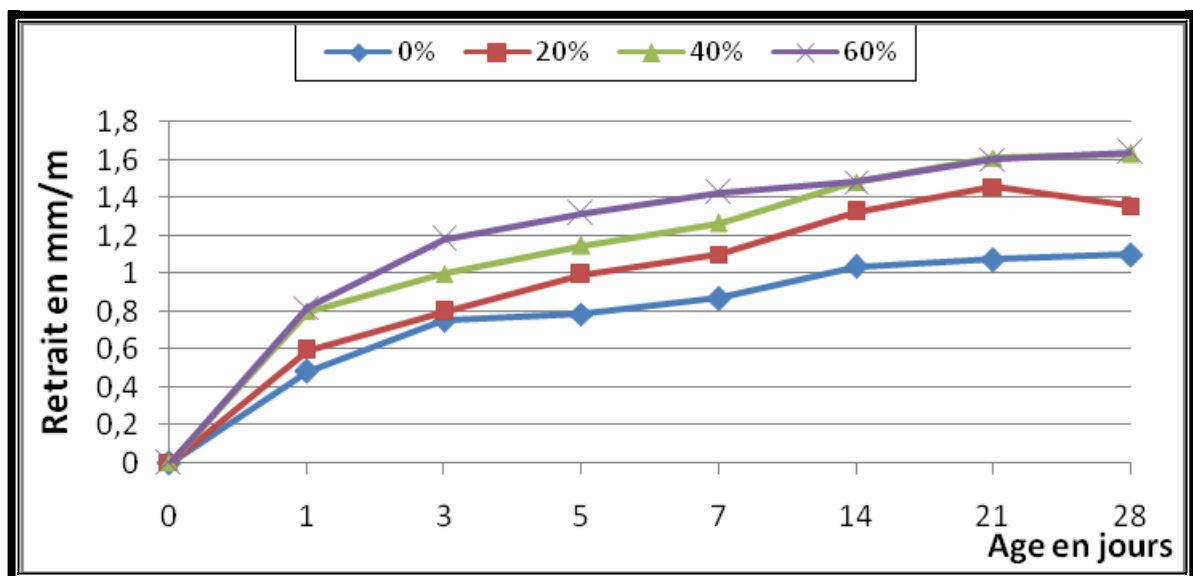


Figure III.16: Variation de retrait de MCLP, $D = 3,15/4\text{ mm}$ en fonction de l'âge de l'éprouvette

On constate que le retrait évolue rapidement pendant les premiers jours, mais, au-delà du dixième jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation après le 14^{ème} jour. On remarque

que quel que soit le pourcentage du polystyrène, le retrait est supérieur à celui du béton témoin. Car la décompression des billes (le retour à leur état initial après compression) diminue le retrait du béton, ce qui confirme les résultats faibles du retrait par rapport au béton témoin (sans polystyrène). Ces constatations son en accord avec les études de [45].

V.3.2. Variation de retrait deMSLP

- MCLP, D = 1/2.5mm

1. Variation de retrait des MSLP en fonction de l'âge del'éprouvette

Les résultats de la variation de retrait du MSLP, D =1 /2.5 mm sont illustrés sur la figure ci-dessous.

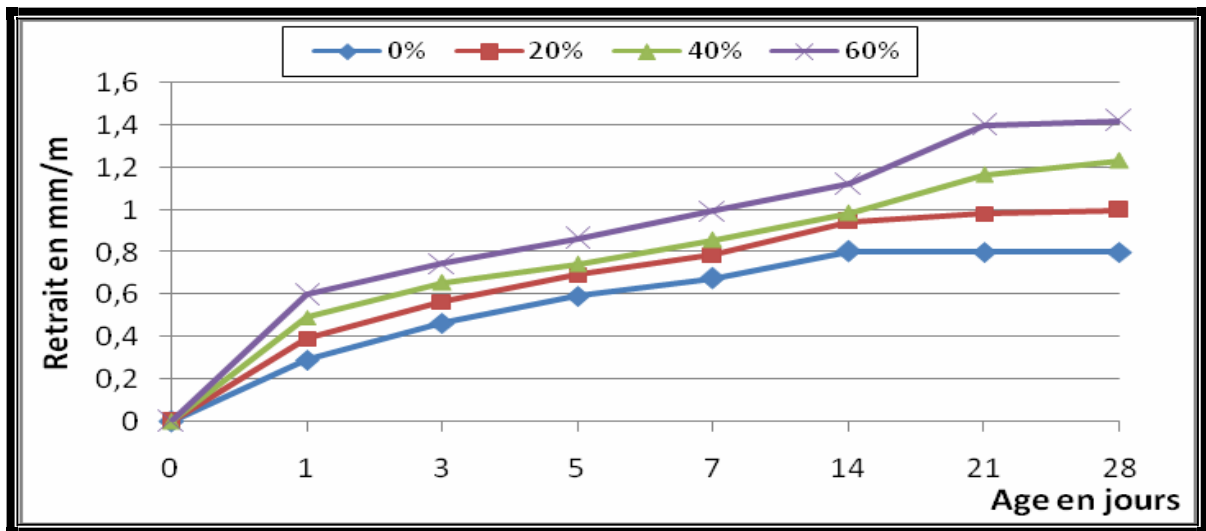


Figure III.17: Variation de retrait de MSLP, D =1 /2.5 mm en fonction de l'âge de l'éprouvette

- MSLP, D =3,15/4mm

1. Variation de retrait des MSLP en fonction de l'âge de l'éprouvette.

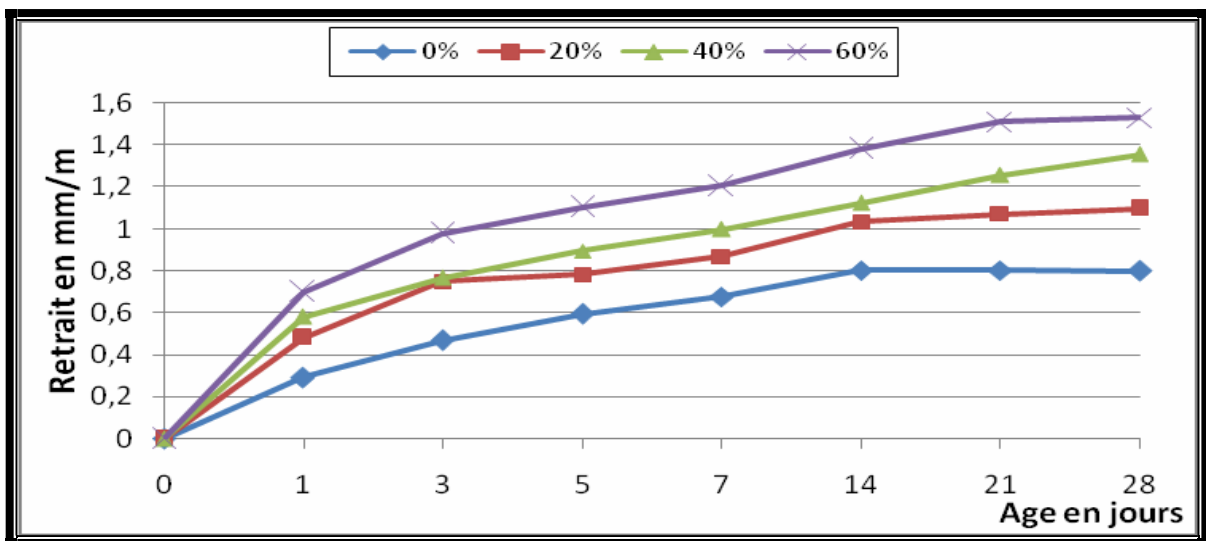


Figure III.18 : Variation de retrait de MSLP, D =3,15/4mm en fonction de l'âge de l'éprouvette

Pour la variation de retrait de MSLP et pour les différents diamètres utilisés, on constate les mêmes remarques et cela toujours, que quel que soit le pourcentage du polystyrène.

V.3. 3. Variation de gonflement de MCLP

- MCLP, D = 1/2.5mm

Variation de gonflement des MCLP en fonction de l'âge de l'éprouvette.

Les résultats de la variation de gonflement du MCLP, D = 1 /2.5 mm sont illustrés sur la figure ci-dessous

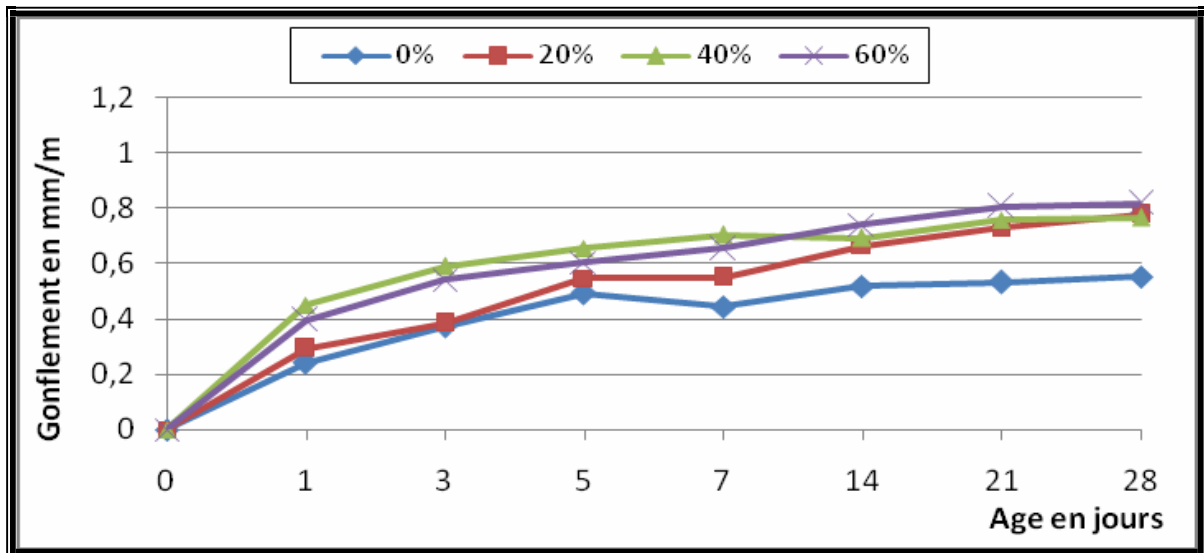


Figure III.19 : Variation de gonflement de MCLP, D = 1 /2.5 mm en fonction de l'âge de l'éprouvette

- MCLP, D = 3,15/4mm

1. Variation de gonflement des MCLP en fonction de l'âge de l'éprouvette.

Les résultats de la variation de gonflement du MCLP, D = 3,15/4mm sont illustrés sur la figure ci-dessous

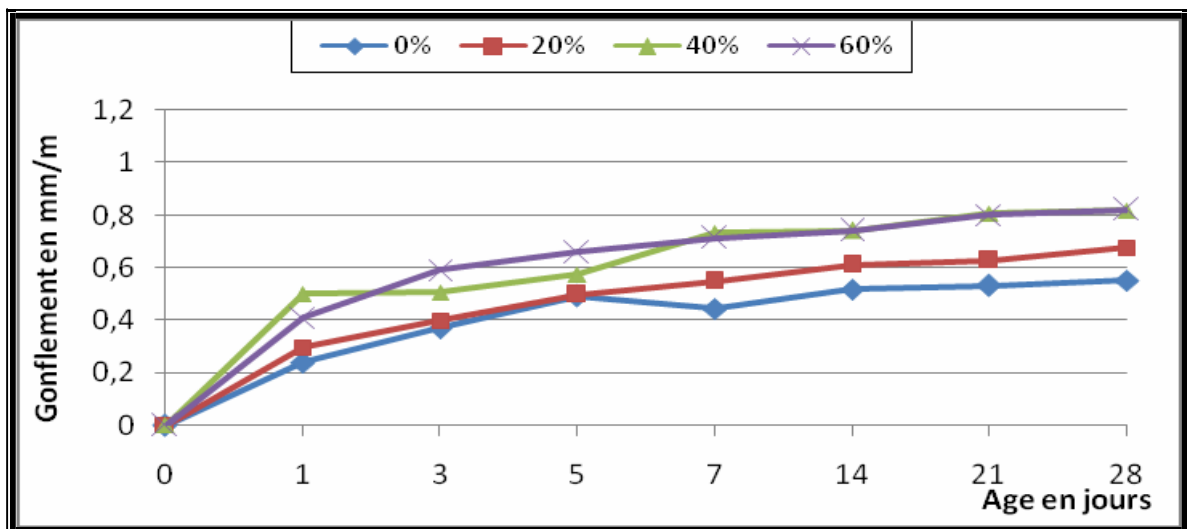


Figure III.20 : Variation de gonflement de MCLP, D = 3,15/4 mm en fonction de l'âge de l'éprouvette

V.3.4. Variation de gonflement de MSLP

- MSLP, D =1/2.5mm

1. Variation de gonflement des MSLP en fonction de l'âge del'éprouvette

Les résultats de la variation de gonflement du MSLP, D =1 /2.5 mm sont illustrés sur la figure ci-dessous

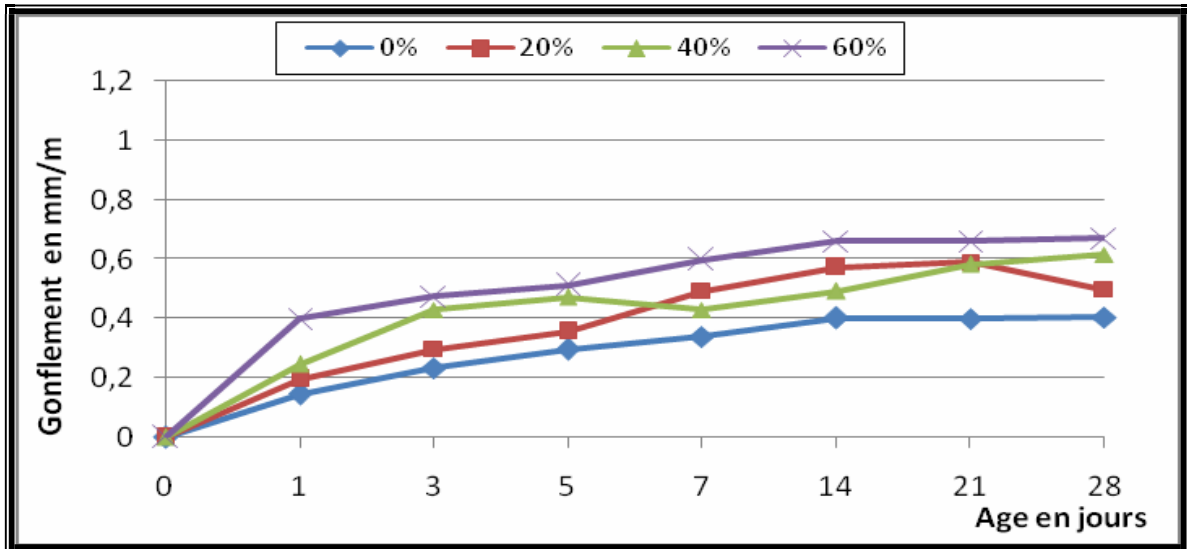


Figure III.21 : Variation de gonflement de MSLP, D =1 /2.5 mm en fonction de l'âge de l'éprouvette

- MSLP, D =3,15/4mm

2. Variation de gonflement des MSLP en fonction de l'âge del'éprouvette.

Les résultats de la variation de gonflement du MSLP, D =3,15/4mm sont illustrés sur la figure III.22.

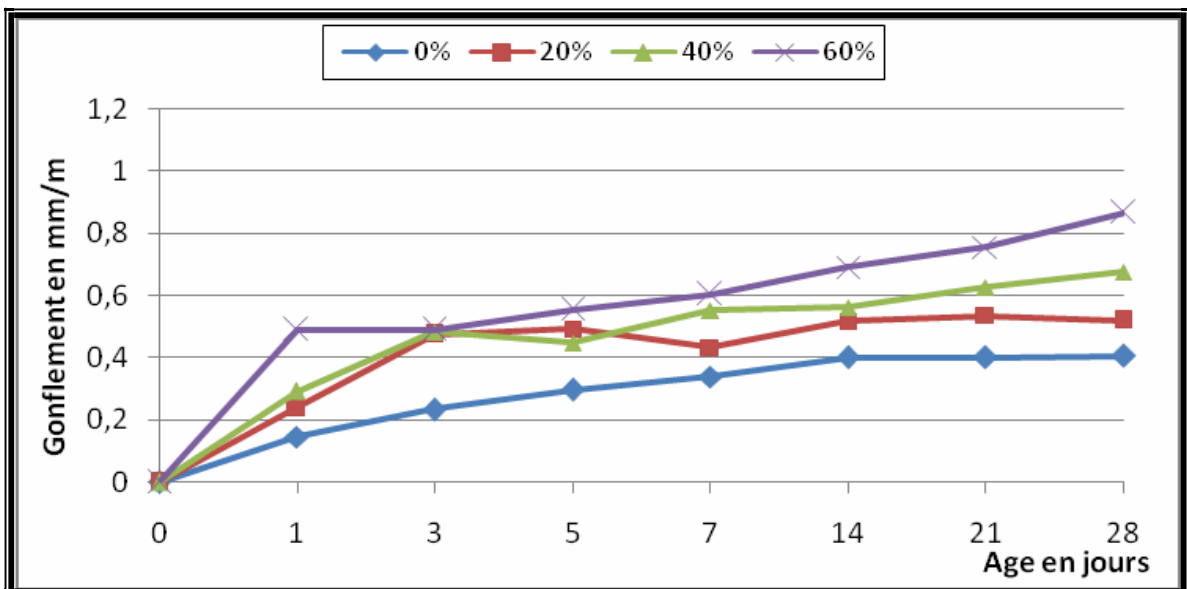


Figure III.22 : Variation de gonflement de MSLP, D =3,15/4mm en fonction de l'âge de l'éprouvette

Pour les deux matrices, le béton témoin et les différentes matrices conservées dans l'eau pendant 28 jours peuvent subir des augmentations de volumes (gonflement). Il est clair que le gonflement est proportionnel à l'ajout du pourcentage de billes de polystyrène. Cette relation est due à la forte capacité d'absorption d'eau des éprouvettes contenant des pourcentages importants en granulats de polystyrène. Donc le gonflement du béton témoin reste faible par rapport au béton de polystyrène.

VI. Essai d'Absorption d'eau par capillarité des bétons légers de polystyrène

L'essai d'absorption d'eau par capillarité a été effectué sur des éprouvettes (4x4x16) cm³ sur une période de trois heures. Les échantillons testés sont les matrices (ciment-sable) avec granulats de polystyrène 1/2,5 et 3,15/4 et matrice témoin qui est conservées dans les environnements (air libre – Eau) pendant 28 jours.

Les figures (III.23., III.24) montrent l'évolution de l'absorption capillaire en fonction de la racine carrée du temps dans les deux milieux de conservation

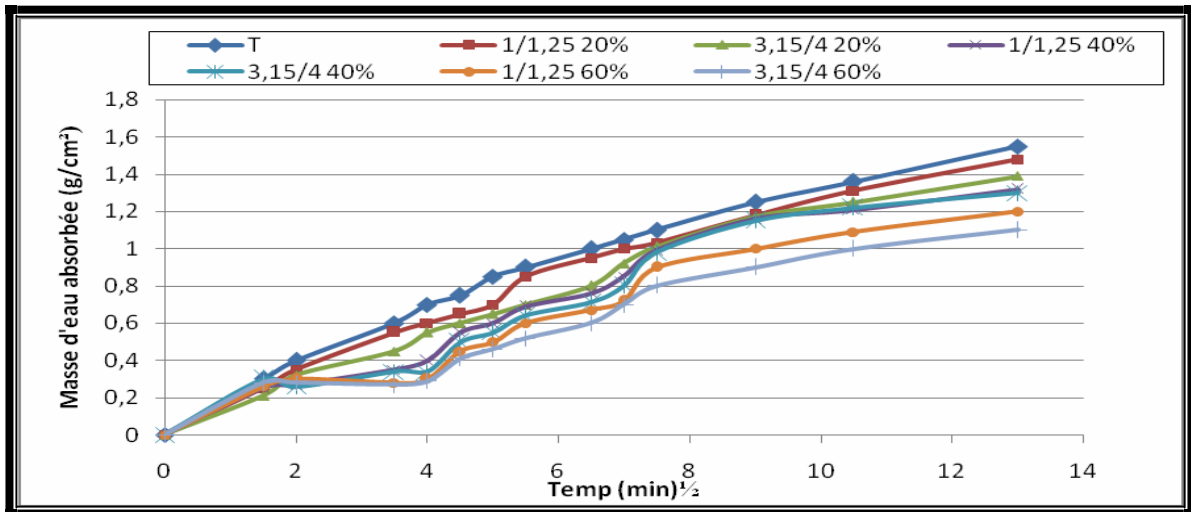


Figure III.23 : Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour MSLP
Milieux de conservation : Air libre

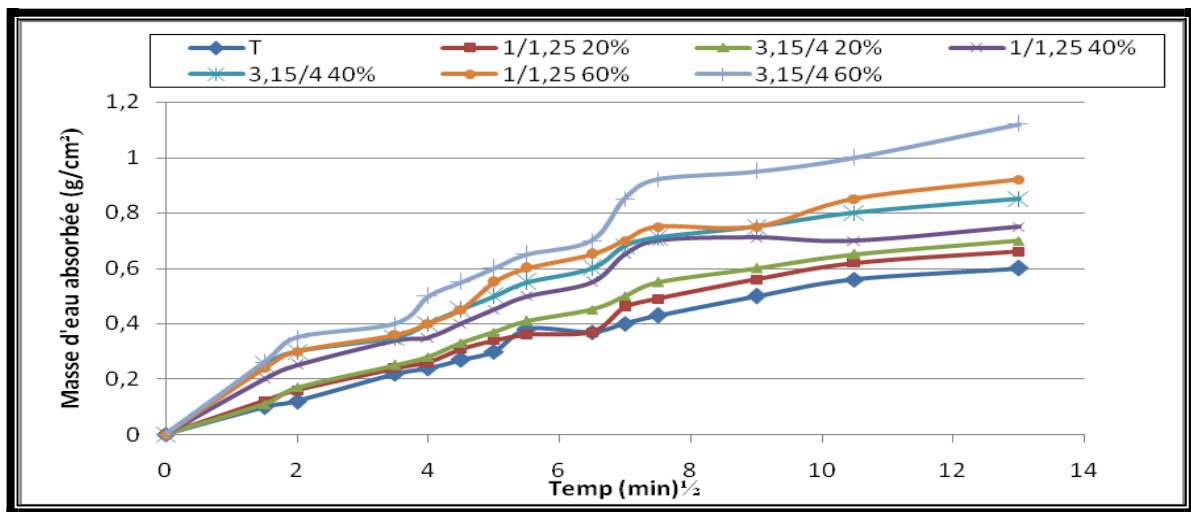


Figure III.24: Absorption d'eau en fonction de la racine carrée du temps pour MSLP
Milieux de conservation : Eau

D'après les résultats obtenus on remarque que :

L'augmentation des dosages des granulats de polystyrène, pour chaque type des matrices, matrice légère à base de granulats de polystyrène classe 1/2,5 ou classe 3,15/4 entraîne une augmentation d'absorption d'eau, le coefficient d'absorption d'eau de la matrice confectionnée avec un pourcentage de 60% est plus grand que celui du pourcentage de 40% et 20%.

$$C_a(60\%) > C_a(40\%) > C_a(20\%).$$

La matrice témoin conservée à l'air libre a la plus grande absorption d'eau contrairement à la matrice témoin conservée à l'eau.

Les matrices légères avec granulats 1/2,5 (MSLP 1/2,5 – 60% ; MSLP 1/2,5 – 40% ; MSLP 1/2,5 – 20%) absorbent une quantité d'eau plus grande que celle absorbée par les matrices légères avec granulats 3,15/4 (MSLP 3,15/4 - 60% ; MSLP 3,15/4 – 40% ; MSLP 3,15/4 – 20%) , chaque fois que la matrice est composée de particules fines elle absorbe beaucoup plus.

L'absorption d'eau de matrices conservées à l'eau est faible que ceux conservés à l'air libre.

VII. Caractéristiques thermiques

La conductivité thermique est la caractéristique la plus importante des bétons légers allégés par des granulats de polystyrène expansé.

Les compositions étudiées peuvent être utilisées comme des matériaux de construction étanches, dont la tenue mécanique est assurée par la matrice, constituée de bétons de sable calcaire, et l'étanchéité est assurée par la faible conductivité thermique des granulats de polystyrène expansé.

L'essai thermique a été réalisé pour les différents bétons étudiés à l'état sec et à l'état saturé.

VII.1. Variation des caractéristiques thermiques en fonction de la masse volumique

Les résultats de la mesure de la conductivité thermique (λ) de la matrice légère de polystyrène MCLP 1/2,5 et MCLP 3,15/4 et la matrice sable calcaire léger de polystyrène MSLP 1/2,5 et MSLP 3,15/4 sont représentés dans les figures ci-dessous.

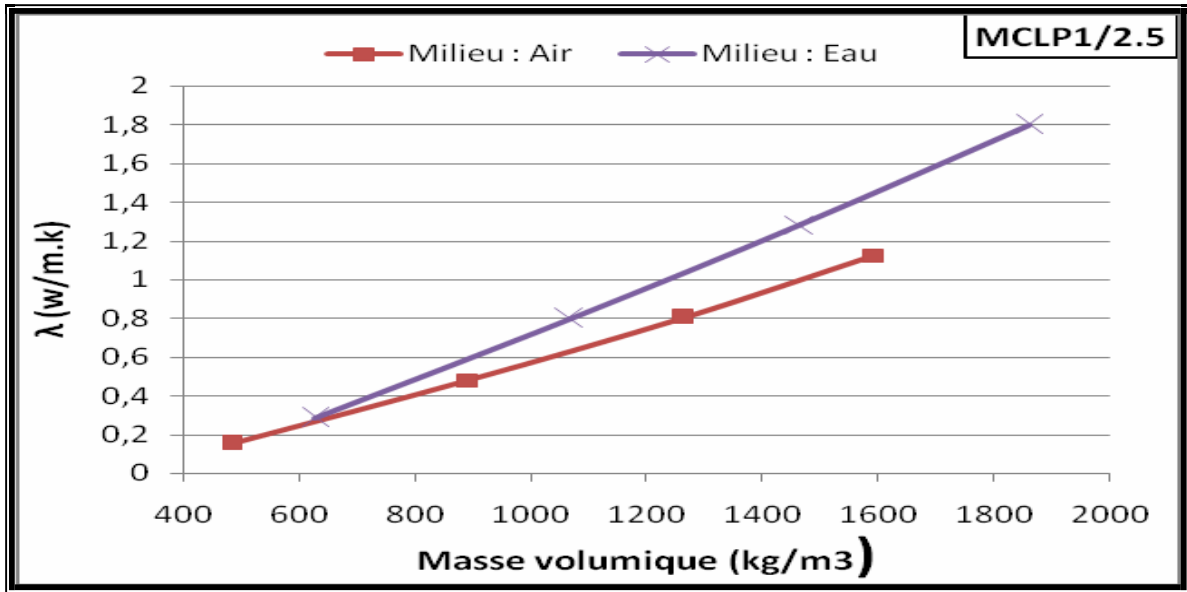


Figure III.25 : Variation de conductivité thermique de MCLP, D =1 /2.5 mm en fonction de masse volumique

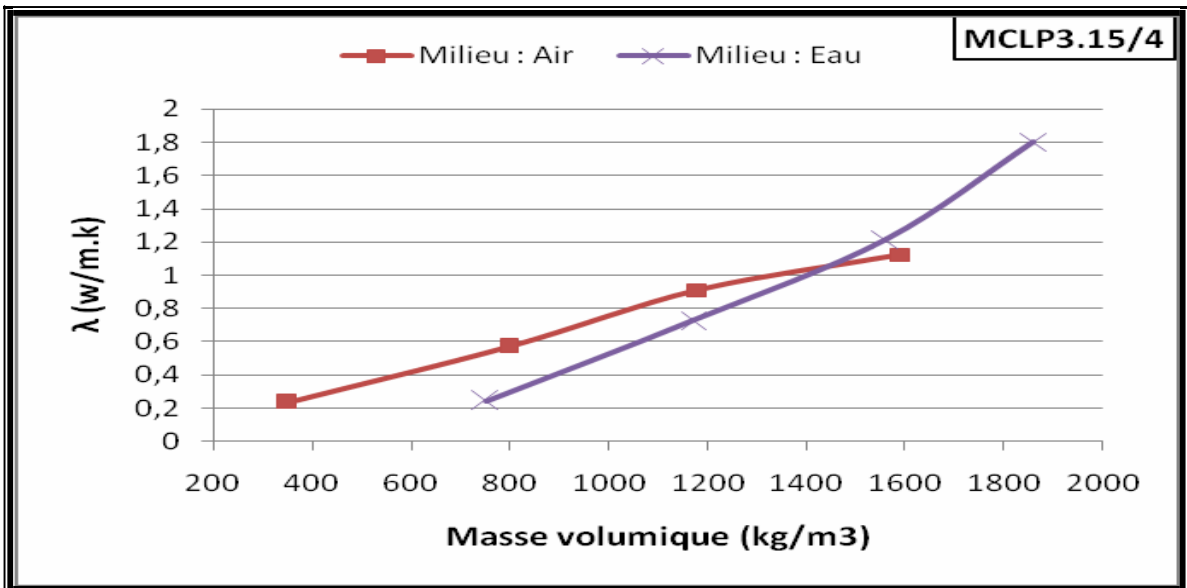


Figure III.26 : Variation de conductivité thermique de MCLP, D =3.15 /4 mm en fonction de masse volumique

D’après la figure III.25 et III.26 ci-dessus on remarque que la conductivité thermique des matrices ciment de polystyrène MCLP 1/2,5 et MCLP 3,15/4 augmente avec l’augmentation de la masse volumique apparente.

On observe que l’humidité à une influence remarquable sur la conductivité thermique des matrices élaborées; plus le matériau est humide, plus son pouvoir d’isolation est faible.

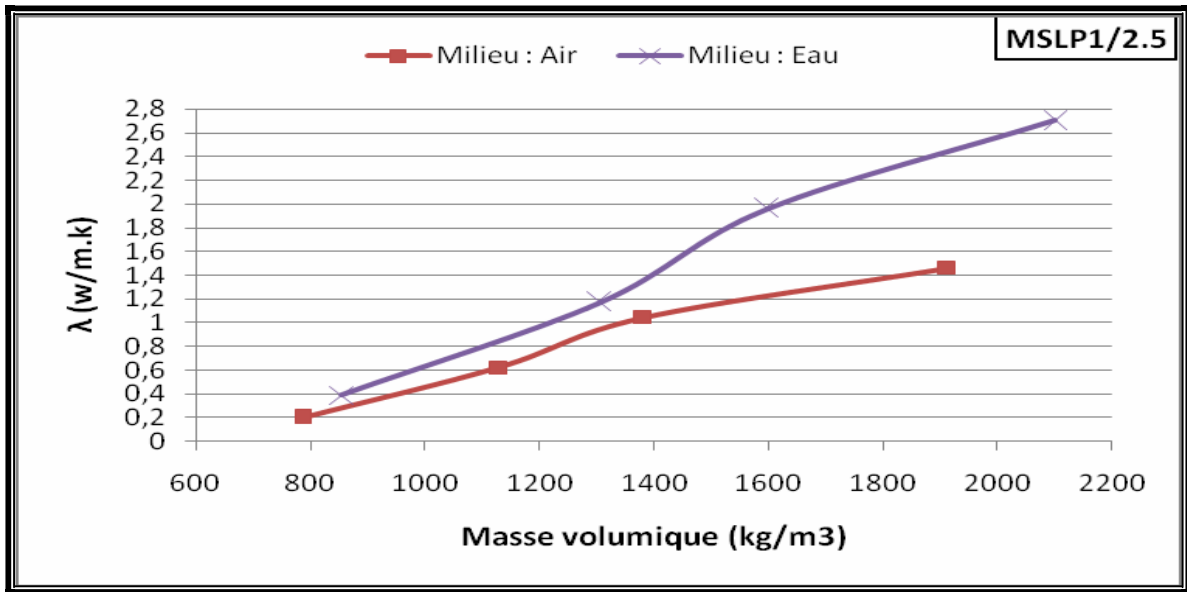


Figure III.27 : Variation de conductivité thermique de MSLP, D =1 /2.5 mm en fonction de masse volumique

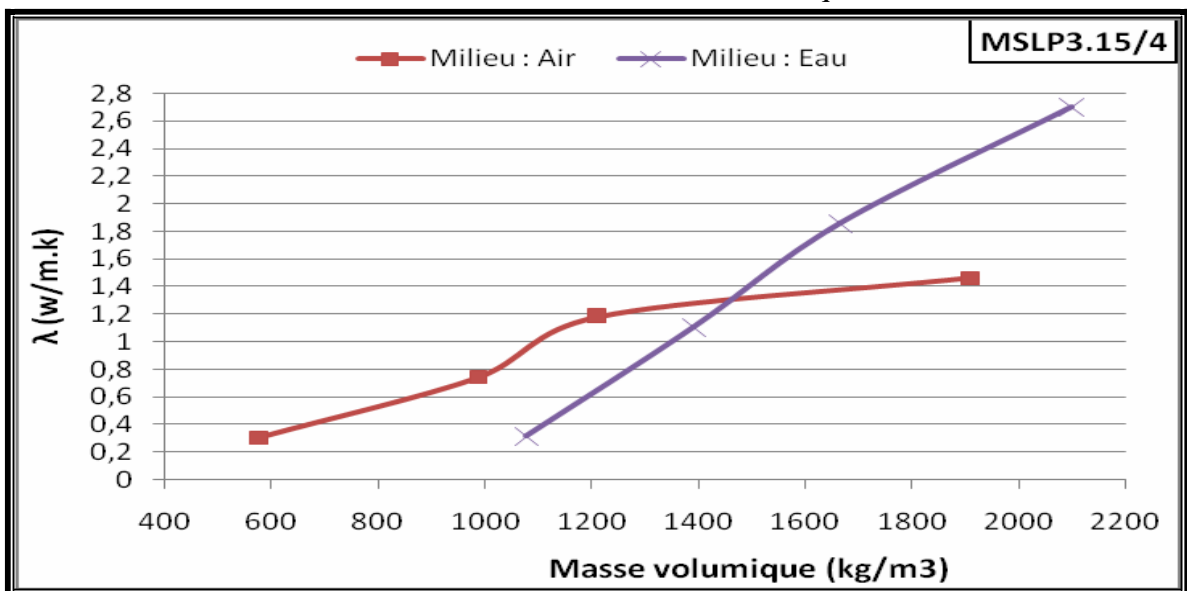


Figure III.28 : Variation de conductivité thermique de MSLP, D =3.15 /4 mm en fonction de masse volumique

D'après la figure III.27 et III.28 ci-dessus on remarque la même allure des courbes que celle des matrices cimentaire léger de polystyrène ce qui implique que la conductivité thermique des MSLP 1/2,5 et MSLP 3,15/4 augmente avec l'augmentation de la masse volumique apparente et l'humidité influe sur cette dernière. Les résultats que nous avons obtenus sont en d'accord avec d'autres études [36].

Les valeurs de la conductivité thermique des matrices agranulométrie 3,15/4 sont supérieures à celle des matrices a granulométrie 1/2,5 à l'état sec. Par contre dans l'état saturé, en raison du pouvoir d'absorption d'eau des bétons de granulats de polystyrène, les conductivités thermiques sont plus

importantes. Ceci s'explique par le fait que l'eau est un excellent conducteur qui induit une diminution de la conductivité thermique du béton en se substituant à l'air qui est un excellent isolant. On voit, aussi, que l'augmentation, du pourcentage du polystyrène dans les deux matrices cimentaire et sableuse, produit dans le matériau une porosité importante ; ce qui influe sur la conductivité thermique. On remarque clairement que la conductivité thermique des MSLP est supérieure à celles du MCLP dans les deux modes de cures (Air libre – Eau) et l'utilisation de sable calcaire pour l'élaboration du béton diminue l'isolation thermique.

Enfin, les conductivités thermiques des deux matrices sont corrélatives avec la masse volumique apparent et représente le 1/4 et le 1/5^{ème} à celle du béton témoin.

VII.2. Variation des caractéristiques thermiques en fonction de résistance à la compression

Les figures ci-dessous illustrent la variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression.

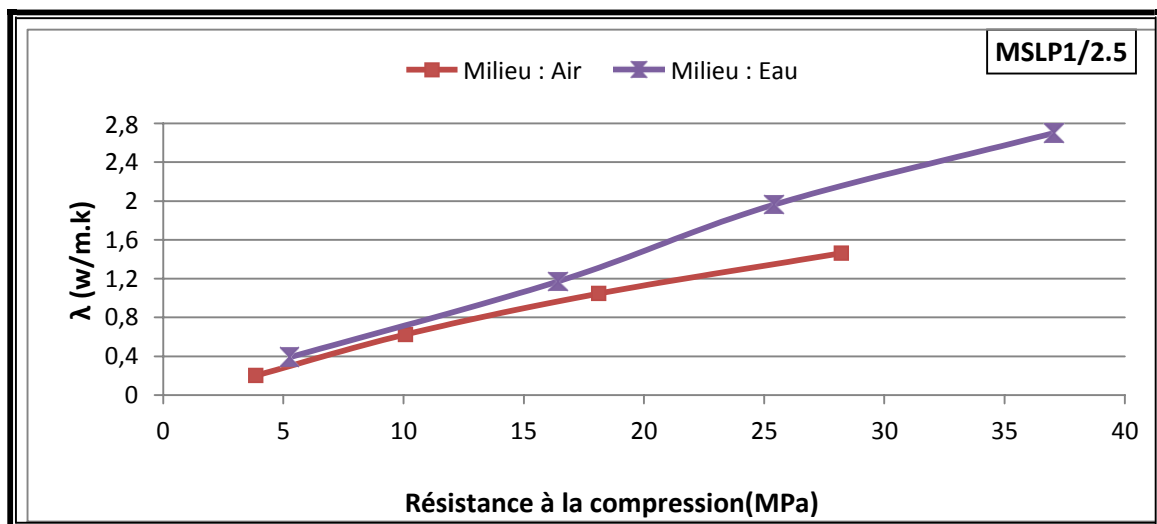


Figure III.29 : Variation de conductivité thermique de MSLP, D =1 /2.5 mm en fonction de la résistance à la compression

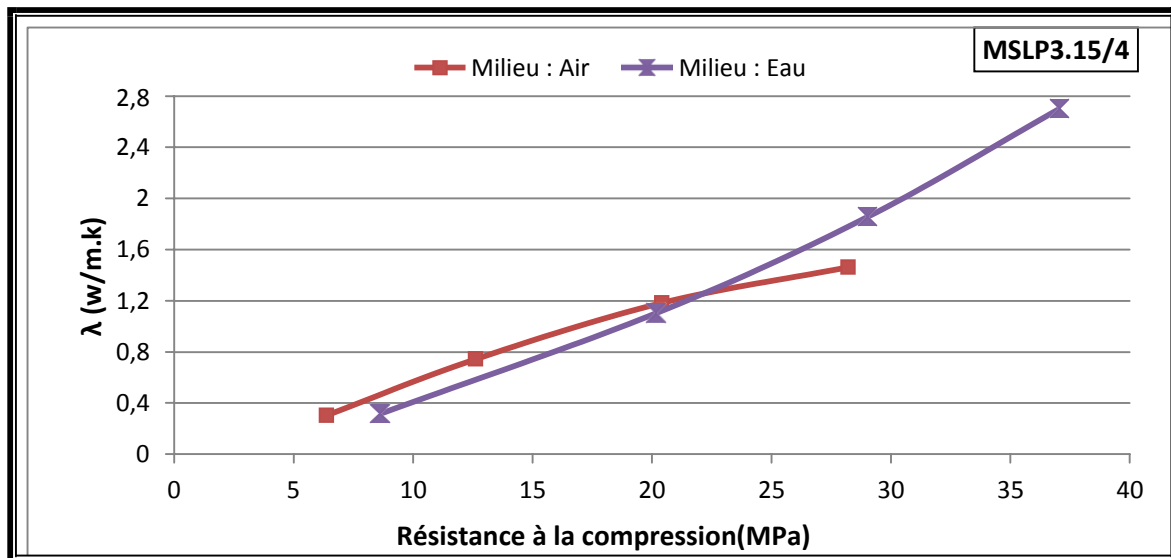


Figure III.30 : Variation de conductivité thermique de MSLP, D =3.15 /4 mm en fonction de la résistance à la compression

Il se montre que la conductivité thermique augmente au fur et à mesure avec l'augmentation de la résistance à la compression. Ce qui est en accord avec les travaux de [36].

Cette constatation doit être considérée comme un critère de choix de ces matériaux pour qu'ils soient utilisés comme des isolants ou des isolants porteurs et qui détermine les classes des bétons pour les deux milieux air et eau (tableaux ci-dessous).

Tableau III. 5 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression pour différents classes et pourcentages de polystyrène en milieu sec

	Ø	0%	20%	40%	60%
Résistance à la compression	1/2,5	28.22	18.13	10.09	3.86
	3,15/4	28.22	20.42	12.62	6.38
conductivité thermique	1/2,5	1.463	1.047	0.625	0.200
	3,15/4	1.463	1.184	0.744	0.304
Classe du Béton	-	I(béton de construction)	I(béton de construction)	I(béton de construction)	II(béton de construction et isolation)

Tableau III. 6 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la résistance à la compression pour différents classes et pourcentages de polystyrène en milieu sec

	Ø	0%	20%	40%	60%
Résistance à la compression	1/2,5	37.06	25.42	16.43	5.26
	3,15/4	37.06	29.02	20.18	8.63
conductivité thermique	1/2,5	2.702	1.963	1.172	0.389
	3,15/4	2.702	1.856	1.104	0.317
Classe du Béton	-	I(béton de construction)	I(béton de construction)	I (béton de construction)	II (béton de construction et isolation)

VII.3. Variation des caractéristiques physiques en fonction de résistance à la compression

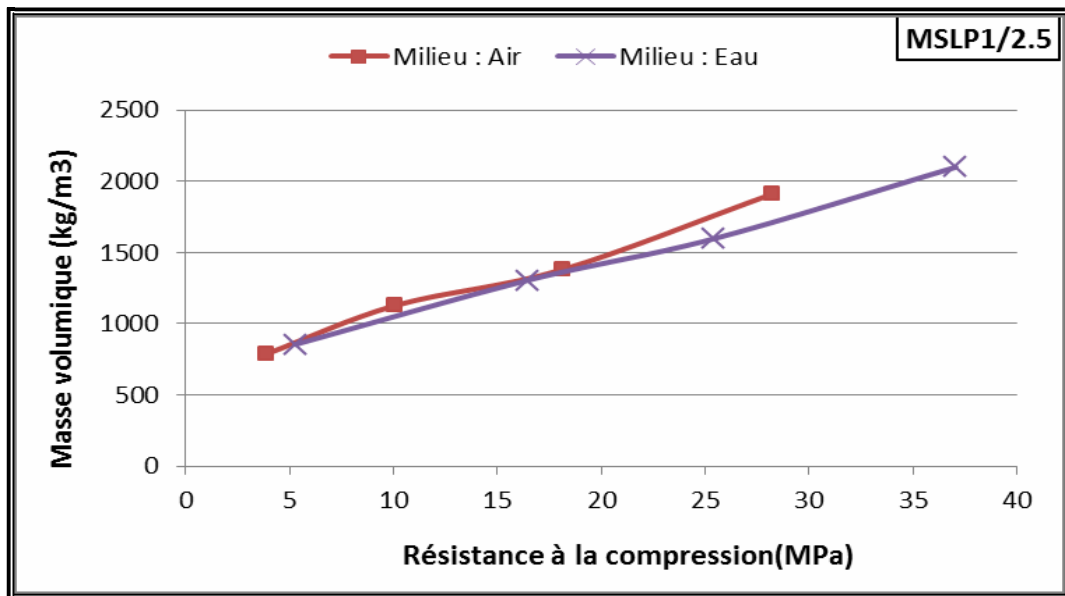


Figure III.31 : Variation de la masse volumique de MSLP, D =1 /2.5 mm en fonction de la résistance à la compression

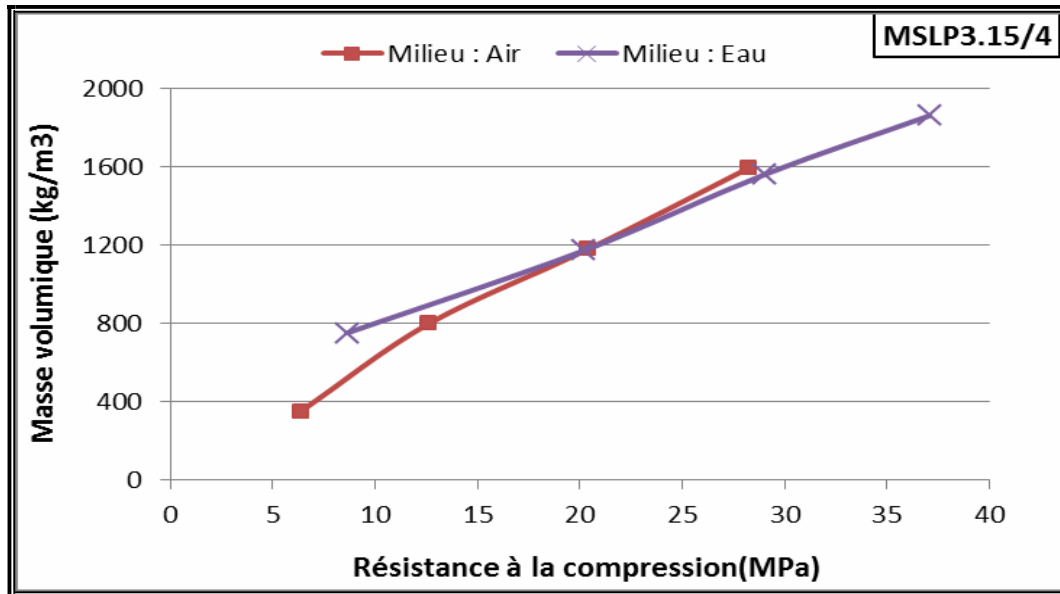


Figure III.32 : Variation de de la masse volumique de MSLP, D =3.15 /4 mm en fonction de la résistance à la compression

D'après les figures III.31 et III.32 représentent la variation de la masse volumique des MSLP, en fonction de la résistance à la compression, Nous pouvons remarquer que quel que soit l'état des bétons étudiés secs ou saturés, la masse volumique s'accroît dans le même sens que la résistance à la compression. Ce qui est en accord avec les travaux de [36].

VIII. Etude de modélisation des bétons légers depolystyrène

Nous essayons, dans cette partie, de faire une tentative d'application d'un modèle théorique permettant la prédiction des caractéristiques thermiques des matériaux. Puisque l'objectif de ce travail est la formulation est la caractérisation des bétons de polystyrène et vue le temps limité,seules les conductivités thermiques sont prises en compte.

Le transfert de chaleur est particulièrement complexe et dépend de plusieurs paramètres tels que la taille moyenne, la forme, la distribution spatiale des pores ou des particules, la qualité du contact entre les pores ou les particules voisines, la continuité (matériaux granulaires), etc...[46 ; 11]. Plusieurs matériaux ont fait l'objet d'une étude de modélisation [47 ; 46]. Toutefois, il convient de noter que très peu d'entre eux peuvent fournir des prévisions précises pour tous les matériaux considérés [49].

VIII.1. Modèle d'homogénéisationAuto-Cohérente

La modélisation par homogénéisation auto-cohérente permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance de la conductivité de chaque constituant et de leurs proportions. Cette méthode, initialement développée pour la caractérisation mécanique (élasticité et

élastoplasticité) de milieux hétérogènes, a été utilisée par [50] sur du chanvre en vrac, des bétons de chanvre et des laines de chanvre.

Le milieu hétérogène pourra être constitué de deux composants. Dans le cas d'un matériau hétérogène constitué de deux composants (modèle biphasique), on étudie le matériau homogène équivalent dont la conductivité thermique effective (λ_{eff}). Le matériau est supposé constitué : d'une sphère de rayon r_1 représentant le constituant (1) de conductivité thermique (λ_1), elle-même entourée d'une coquille concentrique de rayon externe r_2 représentant le constituant (2) de conductivité thermique (λ_2) (Fig. III.33.) ci-dessous.

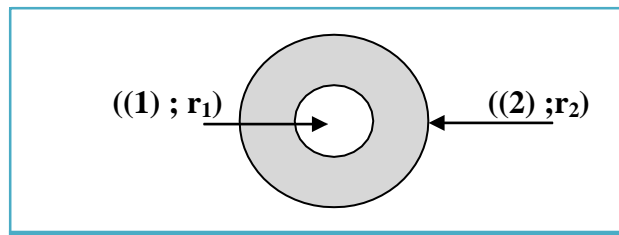


Figure III.33 : Schéma représentatif du modèle d'homogénéisation auto cohérente dans le cas d'un matériau (Bi-phasique)

Soit ω la proportion volumique de la phase interne (1) par rapport à la sphère complète (1+2) définie par $\omega = (r_1/r_2)^3$.

Pour l'estimation de la conductivité thermique, le modèle propose la relation suivante :

$$\lambda_{eq} = \lambda_2 \left[1 + \frac{\omega}{\left(\frac{1-\omega}{3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right)} \right] \dots\dots\dots(\text{II.2}).$$

VIII.2. Modèle A'ssaad

C'est un modèle similaire au modèle de la moyenne géométrique, semblable à celui utilisé par [11].

La relation donnant la conductivité thermique effective est de la forme :

$$\lambda_{eff} = \lambda_s^{(1-m)} \lambda_f^m \dots\dots\dots(\text{II.3}).$$

où

$m = c\varepsilon$ et ε est la porosité totale,

c : est un coefficient de correction proche de 1, et peut être obtenu par régression linéaire sur les valeurs expérimentales.

Ce modèle a été appliqué pour estimer les conductivités thermiques des deux composites étudiés, à l'état sec et l'état saturé et pour différentes proportions de billes de polystyrène. Les valeurs obtenues ont été comparées à celles obtenues expérimentalement

Les figures III.34 et III.35 permettent d'établir une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus avec ces modèles.

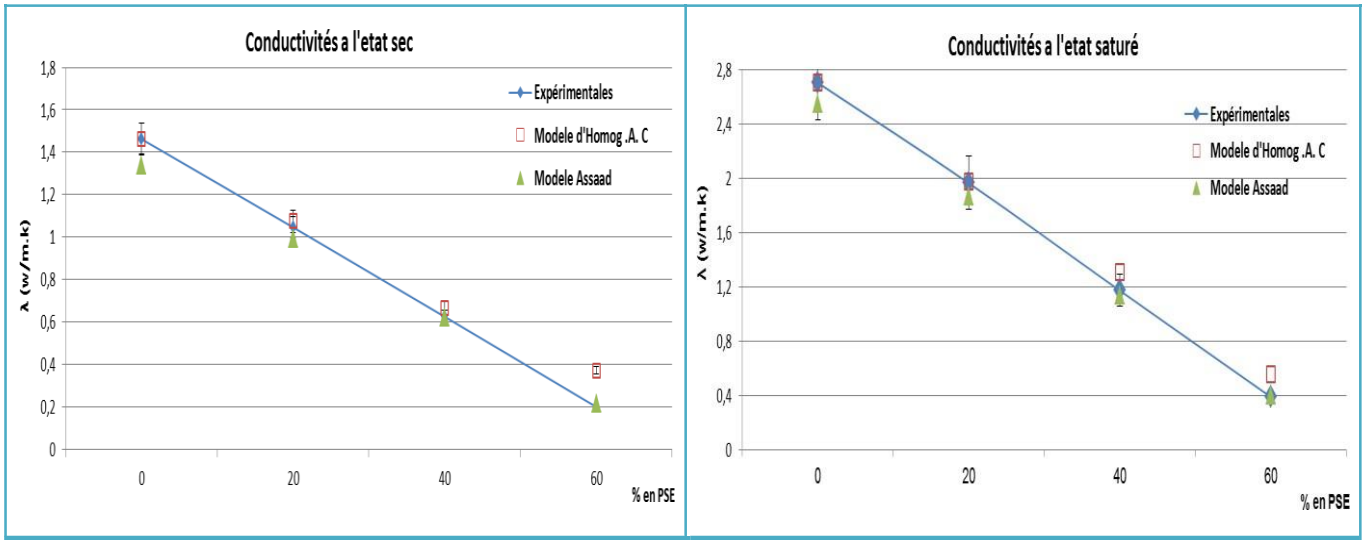


Figure III.34: Comparaison des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente et le modèle d'Assaad (MSLP 1/2,5 à l'état sec et saturé).

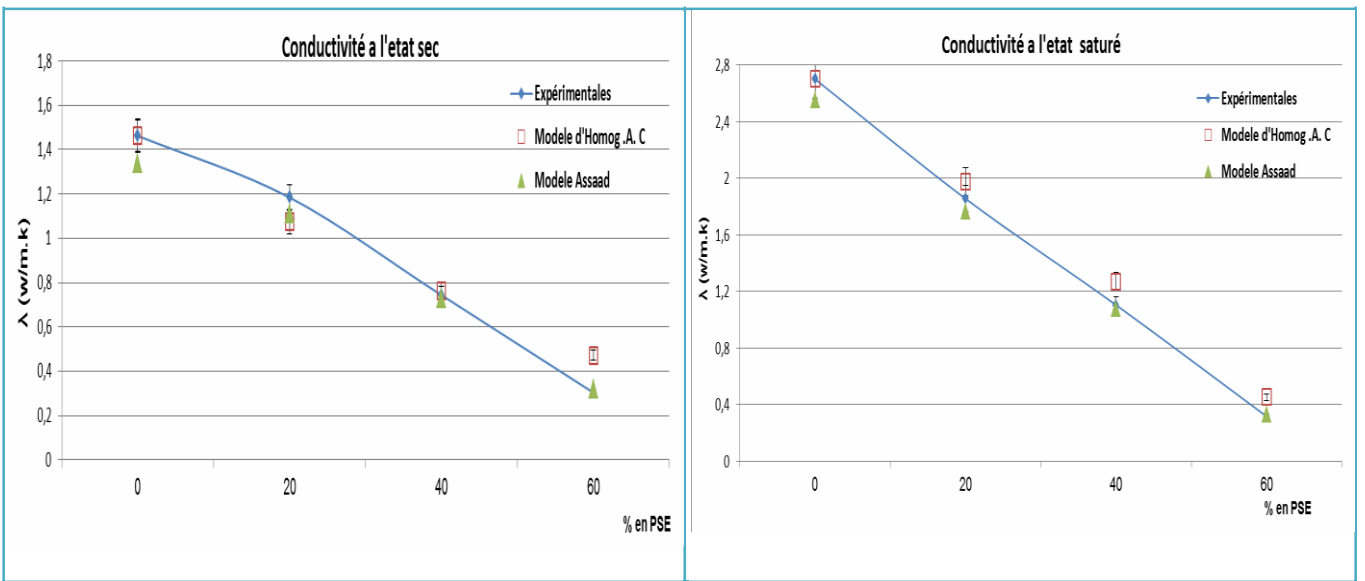


Figure III.35: Comparaison des conductivités thermiques mesurées aux conductivités thermiques estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente et le modèle d'Assaad (MSLP 3.15 /4 à l'état sec et saturé).

On remarque que les valeurs obtenues expérimentalement coïncident bien avec les valeurs obtenues avec le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour les MSLP 1/2,5 et MSLP 3,15/4 à faibles pourcentages du polystyrène. Par contre, plus le pourcentage de polystyrène augmente, les valeurs expérimentales s'éloignent du modèle à cause de la présence d'une autre phase induite par le fort pourcentage en polystyrène incorporé et qui n'est pas prise en compte.

Contrairement aux modèle président les valeurs obtenue par le modèle d'Assaad ; coïncide avec les valeurs expérimentaux aux furs et à mesure que le pourcentage du polystyrène augmente.

IX. Microstructure des bétons légers depolystyrène

IX.1. Apparencevisuelle

Dans le but d'éprouver la distribution de granulats de polystyrène dans les deux types de matrices, des coupes d'échantillon de différentes matrices allégées par le polystyrène ont été photographiées et représentées dans la figure III.36.

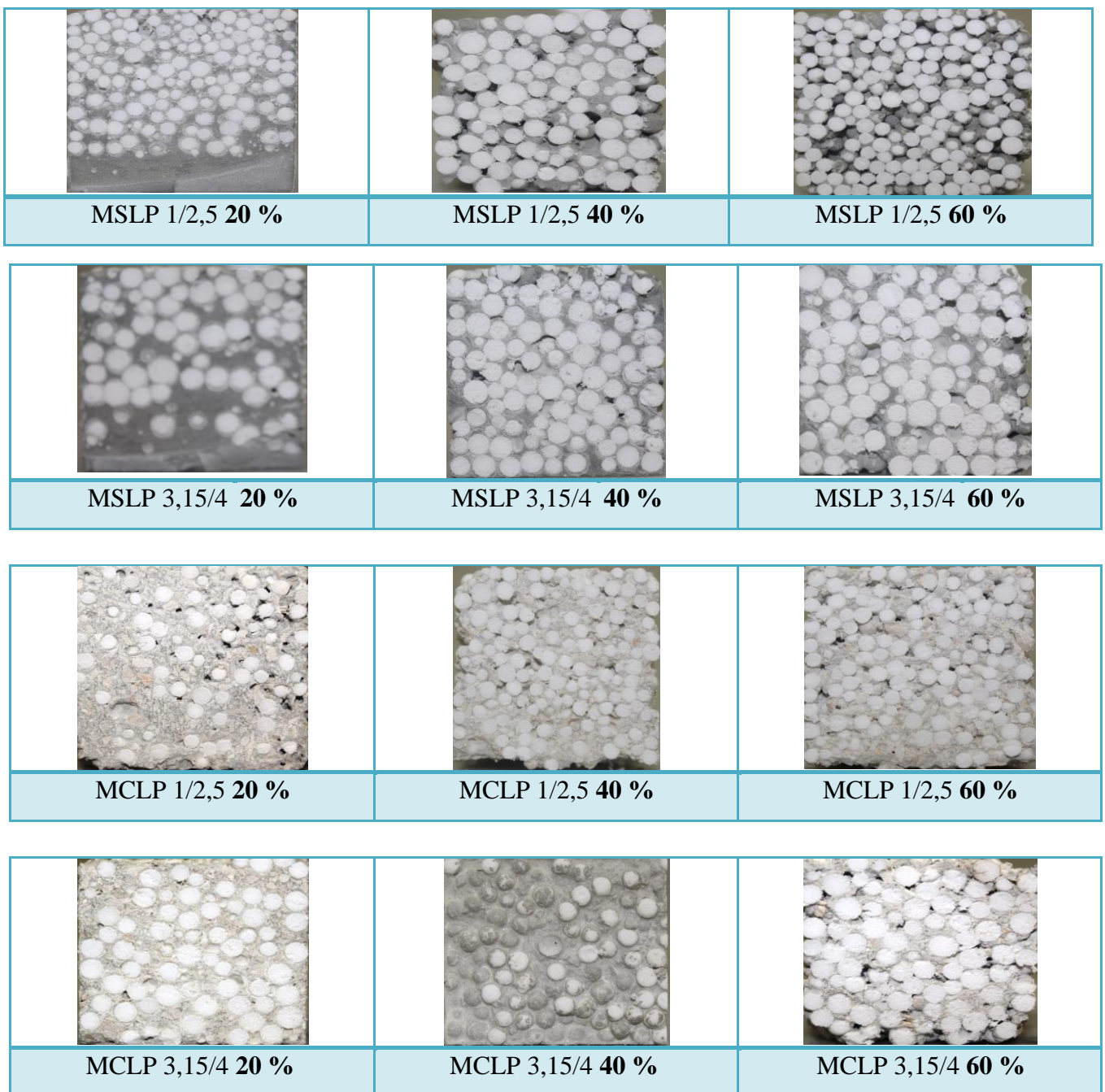


Figure III.36: Photos visuelle des coupes d'échantillons de MCLP et MSLP

A partir des photos de coupes d'échantillons, on remarque une distribution logique des granulats dans la matrice. On remarque, pour les matrices à pourcentage de 60%, la présence des grains est très remarquable. On voit que pour un taux élevé de billes de polystyrène dans la matrice la distribution des grains de polystyrène est parfaite.

IX.2. Apparencemicroscopique

Pour bien comprendre la répartition de granulats dans la matrice, des échantillons ont été visualisés par microscope optique LEICA caractérisé et représentés dans la figure III.37.

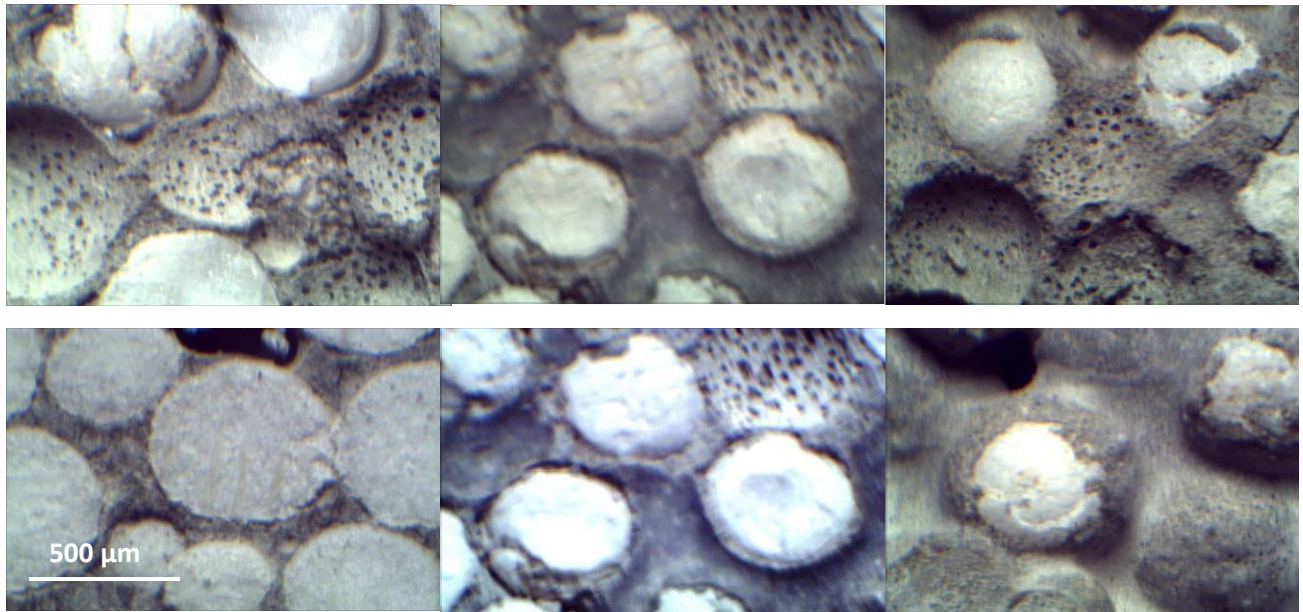


Figure III.37: Photos microscopique des coupes d'échantillons de MCLP et MSLP

En observant les images des coupes de quelques échantillons de MCLP et MSLP à petite échelle microscopique, on remarque une meilleure adhérence entre matrice/billes de polystyrène ainsi qu'un bon enrobage et que l'interface billes de polystyrène-matrice est excellente pour tous les types de béton de polystyrène.

X. Conclusions

Afin d'atteindre les critères de résistance et de maniabilité, une formulation de béton léger avec des matrices (de ciment - polystyrène) et (ciment-sable calcaire-polystyrène) à différents dosages de polystyrène a été traitée dans ce chapitre. Ces résultats nous ont conduits à conclure que :

- Pour la matrice cimentaire on voit que l'optimum des résistances à la compression correspond à un rapport $E/C = 0.3$
- Pour la matrice ciment + sable l'optimum des résistances à la compression correspond à un rapport $E/C = 0.6$

- la masse volumique apparente à l'état frais des compositions diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats des billes de polystyrène expansé.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacré à l'expérimentation et l'interprétation des résultats de l'essai physico-mécanique, ainsi qu'aux les caractéristiques thermiques des bétons légers de polystyrène. Ce chapitre nous a permis de prendre connaissance des classes des matrices légères en fonction de leurs densités et les valeurs limites des résistances mécaniques et retrait.

Les différents résultats obtenus ont permis de conclure que :

- La masse volumique apparente à l'état durci des compositions diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats de billes de polystyrène expansé à l'air libre contrairement dans l'eau.
- L'augmentation du pourcentage de billes de polystyrène expansé est inversement proportionnelle aux résistances mécaniques (compression).
- L'allègement du béton calcaire par l'ajout de polystyrène diminue considérablement la conductivité thermique, c'est-à-dire améliore l'isolation thermique.
- La conductivité thermique du béton élaboré varie dans le même sens que la masse volumique apparente et de sens contraire avec la porosité.

Les matrices légères avec granulats 1/2,5 absorbent une quantité d'eau plus grande que celle absorbés par les matrices légères avec granulats 3,15/4. L'absorption d'eau de matrices conservées à l'eau plus faible que celles conservés à l'air libre et on peut en visage l'utilisation de ces matériaux pour l'étanchéité.

La modélisation par homogénéisation auto-cohérente permettant d'estimer la conductivité thermique d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance de la conductivité de chaque constituant a permis de corréliser les valeurs obtenues expérimentalement et à montrer que plus le pourcentage de polystyrène augmente, les valeurs expérimentales s'éloignent du modèle à cause de la présence d'une autre phase induite par le fort pourcentage en polystyrène incorporé. Ce qui est contraire aux constatations observées avec le modèle théorique d'Assaad.

Conclusion générale et recommandations

Ce travail s'inscrit dans le cadre de valorisation des matériaux locaux pour le domaine de la construction et la réutilisation des déchets d'origine divers pour l'environnement (industriels, minéraux, agricoles etc.

L'objectif de ce travail est une contribution à la valorisation des déchets de l'industrie de carrière de concassage et des billes de polystyrène connue par leur légèreté.

Ces constituants sont utilisés pour l'élaboration des bétons légers possédant des performances thermiques et physiques remarquables répondants aux aspects de développement durable.

Dans un intérêt économique et environnemental, le matériau valorisé est le sable calcaire qui se trouve avec des quantités importantes dans les différentes stations de concassage aux environs de la région de Laghouat, ainsi que l'utilisation des billes de polystyrène expansé.

En vue de cette valorisation, l'incorporation de ces matériaux locaux dans la matrice cimentaire nous a permis d'obtenir un composite thermiquement isolant. Cette démarche contribue à l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments et apporte ainsi une alternative intéressante sur le plan économique et environnemental.

La synthèse bibliographique nous a permis, d'une part, de bien connaître les bétons de sable calcaire à base de billes de polystyrène et leurs domaines d'application. Il faut noter que ce matériau présente des avantages techniques et thermiques qui le qualifient pour l'étanchéité.

D'autre part, les bétons légers, qui couvrent un champ très large, nécessitent des matériaux et des procédures appropriés. Leur masse volumique peuvent varier de 300 à 1800 kg/m³ et leur résistances peuvent aller, parfois, jusqu'à 90 MPa dans le cas des bétons légers à hautes performances.

Enfin, cette synthèse nous a permis d'étudier les bétons de polystyrène dans laquelle on a mis en évidence l'utilisation des granulats de polystyrène dans la fabrication des matrices cimentaires et sableuses.

L'étude de l'effet de la granulométrie de billes de polystyrène expansé sur les caractéristiques

Conclusion générale et recommandations

physico- mécaniques et thermiques des bétons sont étudiés par deux classes granulaires 1/2.5 et 3.15/4 mm.

Les différents résultats obtenus de la réalisation de ce travail ont permis de conclure que :

- La masse volumique apparente à l'état frais des compositions diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats de billes de polystyrène expansé.
- La masse volumique apparente à l'état durci des compositions diminue avec l'augmentation du pourcentage des granulats de billes de polystyrène expansé à l'air libre, contrairement dans l'eau.
- L'augmentation du pourcentage de billes de polystyrène expansé varie inversement avec les résistances mécaniques (compression).
- Le béton léger à base de granulats de polystyrène expansé 1/2.5 mm est plus résistant que celui à base de granulats 3.15/4mm.
- Le béton de sable calcaire permet de réduire la conductivité thermique de 18 % par rapport au béton plein ($\lambda = 1.75 \text{ W/m.k}$).
- L'allègement du béton calcaire par l'ajout de polystyrène diminue considérablement la conductivité thermique c'est-à-dire améliore l'isolation thermique.
- A l'état sec, les bétons allégés avec les granulats de polystyrène expansé 1/2.5 sont les plus isolants contrairement à l'état saturé.
- Le retrait semble être varié dans le même sens avec l'ajout de polystyrène et cela probablement due au pouvoir des granulats d'absorber l'humidité de l'environnement.
- Le gonflement de M S L P 1/2.5 est plus important que M S L P 3.15/4 mm. Ceci est due à l'aptitude hygroscopique des granulats de polystyrène expansé 3.15/4.
- L'absorption d'eau est très élevée pour les compositions élaborées.

Conclusion générale et recommandations

Les matrices légères avec granulats 1/2,5 absorbent une quantité d'eau plus grande que celle absorbés par les matrices légères avec granulats 3,15/4. L'absorption d'eau de matrices conservées à l'eau est faible que ceux sont conservés à l'air libre.

- La conductivité thermique du béton élaboré varié dans le même sens avec la masse volumique apparente et contrairement avec la porosité.
- La modélisation par homogénéisation auto-cohérente permettant d'estimer la conductivité thermique d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance de la conductivité de chaque constituant a permis de corréler les valeurs obtenues expérimentalement et a montré que plus le pourcentage de polystyrène augmente, les valeurs expérimentales s'éloignent du modèle à cause de la présence d'une autre phase induite par le fort pourcentage en polystyrène incorporé ; ce qui est contraire au modèle théorique d'Assaad.

En vertu de ce travail, nous recommandons de poursuivre d'autres travaux de recherche avec:

- Utilisation des granulats de polystyrène expansé avec des différents calibres et différents pourcentage;
- Utilisation des traitements par le ciment et la chaux ;
- Etude de l'effet de l'attaque des différents milieux agressifs sur les propriétés des bétons.
- Amélioration de la résistance des bétons légers à base de granulats de polystyrène par l'utilisation des adjuvants;
- Réalisation des essais de la durabilité du matériau composite ;
- Renforcer le béton léger allégé avec le polystyrène par l'ajout de fibres synthétiques et l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance afin de l'utiliser comme un béton de structure;
- Utilisation autre liant hydraulique.

Références bibliographiques

- [1] **MILED K (2005)** : Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé.
Thèse de doctorat; Ecole nationale des ponts et chaussées de paris.
- [2] **DREUX.G et FESTA.J(2007)**: « Nouveau guide du béton et ses constitutions » huitième édition, Paris,1998 troisième tirage 2007.pp-131-132-162-332 à 346-364.
- [3] **ADAM. NEVILLE, (2000)** : propriétés des bétons, traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris.,p 470.
- [4] **D.T.R C 3-2** ; Document technique réglementaire, Alger**1997**
- [5] **NF EN 13055-1**;Granulatslégers, Partie1: Granulats légers pourbétons et mortiers,2002.
- [6] **ARNOUD, M. VIRLOGEUX M.** (1986) : Granulats et bétons légers, Presse
- [7] **LEDHEM A** (1997): « Construction à l'étude d'un béton de bois, mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois», Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon.de l'EcoleNationale des Ponts et Chaussées.
- [8] **MOHELLEBI S** (2011) : Caractéristiques et modélisation des paramètres physico- hygro-mécanique d'un béton léger à base de granulats composite ; thèse de doctorant u. tiziouzou
- [9] **FERHAT, A** (2002): « Caractérisation physicomécanique à court terme d'un béton léger élaboré à partir d'agrégat pouzzolanique», Mémoire de Magister de l'université d'Oran.
- [10] **ZHANG .M-H &GJORV .O-E**(1990): Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete, ACI Materials Journal; 88(2):150-158.
- [11] **BEDERINA M,** (2007) : Caractéristiques mécaniques et physiques des béton de sable a base de déchets de bois -Thèse de doctorat ENPAlger.
- [12] **CORMON.P** : «Bétons légers d'aujourd'hui » ; Edition EYROLLES, Paris,1973.

Références bibliographiques

- [13] **CEREZO V** (2005) : Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique ; thèse de l'INSA de Lyon.
- [14] **BETON ARME** (1991): Règles BAEL, Bétons de granulats légers artificiels, par Jean PERCHAT ;EditionEyrolles.
- [15] **RILEM** (1970): Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13.PP60-69.
- [16] **NEVILLE; A**(2000): Propriétés des bétons, Sherbrooke-Lava. EditionEyrolles, Septembre
- [17] **CHAO-LUNG HWANG, MENG-FENG HUNG**, (2005): Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete, Construction and Building Materials. 19 (2005) 619-626.
- [18] **MEZIDI O** (2008): « Etude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudre de caoutchouc. ». Magister ENP, p21-22-24.
- [19] **HABBOUCHE, A**(2002): « Propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage » Mémoire de magistère, Département de Génie Civil, Université de Blida, Algérie.
- [20] **BOUZOUALEGH M**, (2009) : « Élaboration et caractérisation d'un béton à base de sable de concassage ». Mémoire de magister, ENP.
- [21] **SKENDER. Z** (2004): « Durabilité du béton à base de sable de concassage », Mémoire de magister, ENP2009.
- [22] **CHANVILLARD et BASUYAUX, O**(1996) : « Une méthode de formulation des bétons de sable et résistance fixées ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. Vol205.49-63.
- [23] **BENNA, Y**, (1999):« Valorisation des sables de concassage », colloque Maghrébin de génie civil, Centre Universitaire de Biskra, novembre 1999.

Références bibliographiques

- [24] **SADHOUARI, N. GOUFI, A.GUEZZOULI**(2009):« valorisation de l'utilisation desables concassés par analyse des propriétés des mortiers et bétons»1stInternational Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran(Algeria) - October 12-14.
- [25]**RAMIREZ, J.L., BARCENA, J.M., URRETA, J.I**(1987): « Sables calcaires à fines calcaires et argileuses: influence et nocivité dans les mortiers de ciment » Matériaux et construction, 20, pp202-213
- [26] **KENAI, S, BENNA, Y, et MENNADI, B** (1999): « The effect of stone in crushed calcareous sand on properties of mortar and concrete» International conference on infrastructure regeneration and rehabilitation, Sheffield, Editor R.N Swamy, pp253-261
- [27] **BONAVETTI, V. L, IRASSAR, E,** (1994) : « The effect of stone dust content in sand » Cement and concrete Research, Vol 24, N°3,pp580-590.
- [28] **BELMECHRI O,** (2012) : Etude d'un composite à base de sable de dune ciment et granulats en billes de polystyrène expansé .Mémoire de magister, Université deLaghouat.
- [29] **ERNER, A., HENRY, J.F., BILLON, N.** (2004): Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as measured by infrared thermography; ESAFORM'2004 Conf. Proc., Trondheim, Norway.
- [30] **YAMURA, K., YAMAUCHI, M** (1982): Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete; Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan pp. 295-29.
- [31] **YVRARD J.P** (1998): Expérimentation et modélisation du comportement Mécanique du polystyrène expansé. Thèse de doctorat de l'université deLille.
- [32] **ZIREGUE A** (2005) : Valorisation de coproduits industriels influence de différents facteurs d'allégement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment., Thèse de Magister, l'UAT d Laghouat.
-

Références bibliographiques

- [33] **CHAFI, N** (2005) : Matrice cimentaire renforcée de fibres ; thèse de magistère, Université Constantine.
- [34] **GANESH K. BABU, D. SARADHI BABU** (2004): Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, *Cement and Concrete Composites* 26 (2004), pp.605- 611.
- [35] **CHEN BING et JUANYU LIU** (2004): Propreties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and ConcreteResearch*34, pp.1259-1263.
- [36] **NASSIMA S** (2010): Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation Thèse de doctorat ; Université de Constantine
- [37] **GANESH K BABU, D. SARADHI BABU** (2003): Behaviour of lightweight expanded polystyrene concret econtaining silica fume, *Cement andConcreteResearch*33,pp.755-762.
- [38] **LAFARGE**, Fiche technique du ciment
- [39] **NF P 18-555** (decembre1990) : mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau.
- [40] **NF P 18- 560**, (Sept. 1990) : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage
- [41] **NF P 18 -598**, (Oct. 1991) : Granulats – Equivalent de sable.
- [42] **A – D – E** algérienne des eaux unité de la wilaya de Laghouat ; Fiche technique2012
- [43] **NF P 15-433** Méthodes d'essais des ciments, détermination du retrait et du gonflement. février1994.
- [44] **NF P 10-502**, 1989: Bétons – essai d'absorption capillaire. Indice de classement: P 10-502
- [45] **KISMI M., MOUNANGA P** (2011) Comparaison performantielle à court et à long termes de mortiers légers à base de déchets de Mousse de Polyuréthane Rigide et de billes de Polystyrène Expansé ; LUNAM Université, Université de Nantes.

Références bibliographiques

- [46] **GORI F, CORASANITI S**, (2003): Theoretical prediction of the thermal conductivity and temperature variation inside mars soil analogues, Planetary and space Science, International Journal of Thermophysics , vol.24 (5), pp.1339-1353,2003.
- [47] **HAMDAMI N., MONTEAU J.Y., LE BAIL A** (2003): Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures, Int. J. of Refrigeration, Vol. 26, Issue 7, pp. 809-816.
- [48] **CHAIX J.M ; G. LAVIALES, D. QUENARD** (1989) : structure et propriétés d'un matériau polyphasique modèle : le Béton légers isolant thermique, compte rendu de fin d'étude, CSTB Grenoble.
- [49] **CARSONA J.K. LOVATTAS.J., TANNER B.D.J. CLELANDA.C.**,(2003):An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations, International Journal of Refrigeration, Vol.26, pp. 873–880.
- [50] **ARNAUD L, MONNET H, CORDIER C, SALLET F** (2000) : «Modélisation par homogénéisation auto-cohérente de la conductivité thermique de béton et laine de chanvre »,congrès français de thermique SFT 2000, Lyon 15- 17 mai 2000