

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en Génie Civil

Option : **Matériaux de construction**

Présenté par

Ziregue Belkacem et Abah Khaled

THEME

**Effet du type de liant sur les propriétés
physico-mécaniques et thermiques d'un béton
allégé par les billes de polystyrène (Polys-béto)**

Soutenu le 30/05/2017

Devant le jury

Mr BOUZIANI TAYEB

Mme GOTTEICHA MESSAOUDA

Mme DAMENE ZINEB

Mme BELMECHRI O HABIBA

MCA à L'UATL

MAA à L'UATL

MAA à L'UATL

MAA à L'UATL

Président

Examinatrice

Encadreur

Co-Encadreur

Promotion 2017

REMERCEMENTS

Nous remercions DIEU qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous voudrions saisir cette occasion pour remercier chaleureusement, en lui exprimant notre profond respect, notre encadreur madame Zineb Damene Goual . Maître assistante à l'université de Laghouat, d'avoir assuré la direction de notre thèse et pour sa participation, ses conseils, sa disponibilité. Ses qualités humaines formidables.

Nous remercions notre co-encadreur Mme **Belmechri Oum habiba**. Maître assistant à l'université de Laghouat pour son aide scientifique et technique, et sa documentation.

Nous remercions vivement monsieur **Ziregue Ahmed**, autant qu'enseignant et autant que père pour ses conseils enrichissants, son appui et sa documentation utile et intéressante qu'il nous a fourni

Nous avons eu le grand plaisir de travailler avec eux et nous tenons absolument à leur exprimer notre gratitude et notre reconnaissance pour leur accueil et leur aide, en matière de documentation et leurs précieux conseils durant tout le long de l'élaboration de ce travail.

Nous sommes très reconnaissants à Monsieur **Kroba Benharzallah** de par sa compétence qui a bien voulu nous faire profiter, de son expérience pour les différents essais et Monsieur **Ferhat Ahmida** pour son appui pendant la réalisation des essais thermiques.

Nous remercions vivement Monsieur **Bouziani Tayeb**. Enseignant au Département de génie civil à l'université de Laghouat pour l'honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de thèse.

Nos remerciements son dédiés aussi à **Mme Gotteicha Messaouda**, enseignante au Département de génie civil, nous la remercions profondément, d'avoir fait partie du jury d'examinations et pour avoir acceptée de juger avec toute l'attention voulue, notre travail.

Nous remercions aussi tout le personnel du laboratoire de génie civil pour son aide, et en particulier l'ingénieur de laboratoire **Mr Mokdad Bachir** .

Un spécial remerciement à tous les enseignants de Génie Civil qui ont contribué à notre formation et je cite en particulier monsieur **Guedouda Kamel**.

إهداء

أهدي ثمرة جهدي المتواضع الى والدي الكريمين. بذلا الجهد ونحتا الصخر واحترافا كالشمعة لتضيء لنا الطريق الطويلة ونحيا الحياة الكريمة. فجازاهما الله بأفضل ما يجازي به عباده الصالحين.

إلى الشريفة الطاهرة التي رحلت عن عيني ولم ترحل عن قلبي التي برحيلها فقدت اعظم مثال للمحبة والنصح "الحاجة حليلة رحمها الله ". الى ملهمي الجد الغالي الحاج محمود اطلال الله في عمره الى الجدة الحنونة الحاجة فاطمة الزهرة.

الى من تنفست معه وقاسمني الدرب اخوتي الا عزاء الى من يعجز القاموس عن وصف مكانتهم صفوان و خليل. الى رمز الابتسامة الصادقة اختي العزيزة .

الى من قاسموني الحلوة والمرارة اخوتي الاعزاء (محمد - عبدو - مداني - حمي - شنافي - معمر - محمود) الى كل العائلة صغير وكبير.

الى قدوتي ومثالي الأعلى يوسف رحماني.

الى البراعم الندية (اسماء - عمر - اسحاق - ادريس - خليل - عبد المالك) الى كل أبناء وبنات العمومة والاقوال.

الى من ظلوا المثل الصادق للرجولة وسندي في الحياة (الاعمام والاقوال الى الخالة الكريمة والعمات كل واحدة باسمها) الى من قاسموني عناء الحياة الجامعية (موسى - ناصر - ميسوم - شفيق - ميلود - أسامة الى رفيق الدرب خالد).

الى من أكن لهم معزة خاصة في قلبي أصدقائي واخوتي في الحي (اسامة- الحاج عيسى - أيوب بلي - أيوب بن بوعبد الله - محمد قاسمي - محمد محروق الراس - لمين غزلان - لمين بكار - عبدو - حسين- سعد - ايمن - نور الدين - عطاء الله - شمس الدين- بشير- صادق- علال- هشام و إسماعيل) الى طلبة الدكتوراه وطلبة العبور الذين رافقونا في المخبر.

الى استاذتي الكريمة المشرفة و المرشدة و التي كانت بمثابة الام ضامن زينب و الى كل اساتذة قسم الهندسة المدنية بجامعة الاغواط ... الى كل من احبهم قلبي وتناساهم قلبي. ولم تسعهم صفحتي هذه . الى كل هؤلاء اهدي ثمرة جهدي المتواضع.

زيرق بلقاسم

إهداء

إلى كل من علمني حرفا في مسيرتي التعليمية.
إلى روح أبي الطاهرة.
إلى روح أمي العزيزة الغالية.
إلى أستاذتي الغالية الضامن زينب.
إلى أستاذي الغالي زيرق أحمد .
إلى الأسرة التعليمية في قسم الهندسة المدنية.
إلى جميع إخوتي (محمد ,فؤاد,مصطفى ,حسين ,يحيى وعبد الولي).
إلى أصدقائي في مسيرتي التعليمية (ميلود ,ميسوم,أسامة,حسنا,أحلام ,منال,موسى ,شفيق,سعاد,صفية,عبدالناصرورفيق دربي قاسم).
إلى رفقاء غربتي أخوتي (محمد ,هاشم, نذير, عزو ,صالح ,هلال ,حازم ,أحمد, شاكر, حسين ,عصام ,إلياس ,علاء, عدنان).
إلى من لم أذكر وكان له أثر في حياتي.
إلى كل هؤلاء وهؤلاء أهدي هذى العمل المتواضع سائل المولى عز وجل أن يجعله نبراسا لكل طالب علم.

عبد خالـد

ملخص

الهدف من هذا العمل، تّثمين مواد محلية والمخلفات الصناعية في منظور التنمية المستدامة لمواد البناء والعزل حراريا. المواد المحلية هي رمل الصحراء و الجبس والمخلفات الصناعية المستعملة هي البوليسترين المعالج لتحضير او ايجاد مادة بناء جديدة بميزات جيدة ميكانيكيا و حراريا، وتستجيب لحاجة الحفاظ على الطاقة و التنمية المستدامة.

الطريقة تكون بانقاص الكتلة الحجمية للمنتجات النهائية التي تعوض كمية من الاسمنت بكمية من الجير. و من جانب اخر تعويض 1% من كمية الرمل بواسطة البوليسترين المعالج. الدراسة اعتمدت على كيفية اعداد المركب والخصائص الفيزيوميكانيكية والحرارية للمركب. النتائج المعطاة تكشف فائدة و نفع البارز لخاصية تخفيف الوزن بكرات البوليسترين المعالج. فهي تحسن من خاصية العزل الحراري للخرسانة المعدة. في حين نسجل انخفاض المقاومة الميكانيكية بزيادة نسبة الجير و البوليسترين المعالج.

Résumé

Ce travail a pour objectif, la valorisation des matériaux locaux et déchets industriels dans la perspective de développement de matériaux de construction thermiquement isolants. Les matériaux locaux sont le sable de dune et la chaux, les déchets industriels sont le polys-béto, l'objectif est d'élaborer un nouveau matériau de construction mécaniquement et thermiquement performant, et répondant aux exigences d'économie d'énergie et de développement durable. La voie envisagée est la réduction de la masse volumique du produit fini par la substitution d'une part du ciment par la chaux. Et d'une autre part d'une proportion en poids de 1% de la masse du sable par le polys-béto. L'étude est axée sur la formulation et la caractérisation physicomécanique et thermique du composite. Les résultats obtenus révèlent l'intérêt remarquable du caractère d'allègement des billes de polystyrène. Notamment, dans l'amélioration des performances thermiques des bétons élaborés. Par contre, on enregistre une chute considérable de la résistance mécanique en fonction du pourcentage d'incorporation de la chaux et du polys-béto.

Abstract

This work's objective, is the valorisation of local materials and industrial waste in view of the development of thermally insulating building materials. The local materials are sand dune and lime, the industrial waste is the polys-béto in order to develop a new material of construction mechanically and thermally performing, and meeting the requirements of energy saving and sustainable development. The route envisaged is the reduction of the density of the finished product by the substitution of cement for one part by lime. And on the other hand a proportion by weight of 1% of the mass of the sand by the polys-beto. The study focuses on the physicommechanical and thermal formulation and characterization of the composite. The results obtained reveal the remarkable interest of the lightening character of the polystyrene beads. In particular in improving the thermal performance of elaborated concrete. whereas, a considerable drop in mechanical strength is recorded as a function of the percentage of incorporation of the lime and the polys-beto.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des symboles

Introduction générale1

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1 Généralités sur le béton de sable.....	3
I.2 Généralités sur les bétons légers	3
I.2.1 Définitions des bétons légers	4
I.2.2 Classification des bétons légers	5
I.2.3 Différence entre bétons classiques et bétons légers	6
I.2.4 Domaine d'utilisation des bétons légers	6
I.2.4.1 Béton de structure	6
I.2.4.2 Isolants porteur	6
I.2.4.3 Isolants.....	6
I.2.5 Types de bétons légers	6
I.2.5.1/ Le béton cellulaire « A».....	7
I.2.5.2/ Le béton caverneux « B»	7
I.2.5.3/ Le béton de granulats légers « C».....	7
I.3 Les bétons de granulats légers	8
I.3.1 Classification des granulats légers	8
I.3.2 Propriétés physico mécaniques et thermiques des Granulats légers.....	9
I.3.2.1 Forme des grains et aspect de surface.....	9
I.3.2.2 Taille des granulats	9
I.3.2.3 Résistance des granulats	10
I.3.2.4 Porosité et absorption de granulats légers.....	11
I.3.2.5 Caractéristiques thermiques des granulats légers	12
I.3.3 Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques Des bétons de granulats légers.....	12
I.3.3.1 Masse volumique	12
I.3.3.2 Résistance à la compression	13
I.3.3.3 Résistance à la flexion	15
I.3.3.4 L'isolation thermique.....	16
I.3.3.5 Résistance au feu	18
I.3.3.6 Durabilité	19
I.3.3.7 Propriétés élastiques des bétons légers.....	19
I.4 Les béton de granulats de polystyrène expansé	21
I.4.1.1 Fabrication du polystyrène expansé.....	22
I.4.1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène :	23
I.4.2 Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène	24
I.4.2.1 Densité	24
I.4.2.2 Résistance à la compression.....	24

I.4.2.4 Retrait.....	24
I.4.2.5 Conductivité thermique.....	25
I.4.3 Le Polys Béto.....	25
I.4.3.1 Fabrication et contrôle des billes servant à la réalisation du Polys-Béto.....	25
I.4.3.2 – Le béton incorporant les granulats de Polys Béto.....	27
I.4.3.3– Propriétés morphologiques	27
I.4.3.4– les études menées sur le béton léger allégé par le Polys Béto en Algérie.	27
I.4.4 Différence entre le polystyrène non traité et le polystyrène traité (polys-béto).....	25
I.4.4.1 Le polystyrène normal non traité	28
I.4.4.2 Béton de polystyrène traité (polys-béto).....	29
I.5 Généralités sur les liants utilisés	31
I.5.2 La chaux.....	31
I.5.2.1 Cycle de la chaux	31
I.5.3 Les différences entre chaux et le ciment.....	32
I.5.4 Avantages du mortier de ciment et de chaux	32
I.5.4.1 Résistance d'adhérence en flexion.....	32
I.5.4.2 Résistance à la compression.....	33

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

II.1 Introduction	34
II.2 Caractérisation de la matière première	34
II.2.1 La chaux	34
II.2.1.1 Masse volumique apparente et absolue	34
II.2.1.2 Surface spécifique de Blaine	34
II.2.1.3Analyse chimique et minéralogique de la chaux	35
II.2.1.4 Préparation de la chaux éteinte.....	36
II.2.2 sable dunaire	34
II.2.2.1 Masse volumique absolue et apparente	37
II.2.2.2 L'équivalent de sable.....	38
II.2.2.3Analyse granulométrique.....	40
II.2.2.4 Caractérisation minéralogique et chimique du sable dunaire	40
II.2.3 Le ciment	41
II.2.3.1 Surface spécifique de ciment	42
II.2.3.2 Masses volumiques absolue et apparente du ciment	42
II.2.3.3 Diffractogramme de rayons X du ciment.....	42
II.2.4 Eau de gâchage	43
II.2.5 Billes de polys-béto	43
II.2.5.1 Analyse granulométrique.....	44
II.3 Essais expérimentales réalisés	44
II.3.1 Essais de maniabilité	44
II.3.2 Essais réalisés sur les bétons durcis	44
II.3.2.1 Masse volumique apparente	45
II.3.2.2 Essai de retrait	46
II.3.2.3 Essai de résistance mécanique	46
II.3.2.4 Essais d'Absorption.....	48
II.3.2.5 Essais thermiques	49
II.3.2.6 La Porosité totale	50

Chapitre III : Matériaux élaborés et discussion des résultats

III.1 Introduction	51
III.2 Formulation du béton de référence sans les billes de polystyrène	51
III.2.1 Etude de maniabilité.....	51
III.3 Élaboration du béton de polys-béto (billes de polystyrène traité).....	53
III.3.1 Formulation du béton de polys-béto.....	53
III.3.2 Mode de malaxage et préparation des éprouvettes.....	54
III.3.2.1 Malaxage	54
III.3.2.2 Préparation des éprouvettes.....	54
III.4 Étude des propriétés du béton de polys-béto élaboré	55
III.4.1 Etude du retrait	55
III.4.2 Mesure de la masse volumique apparente	56
III.4.3 Mesure de la résistance à traction	58
III.4.4 Mesure de la résistance à la compression.....	59
III.4.7 Variation de la porosité des bétons élaborés en fonction du dosage en granulats	64
III. 5 Synthèse des résultats.....	65
Conclusion.....	67
Références bibliographique.....	69

Liste de tableaux

Chapitre I : Revue bibliographique

Tableau I.1: Classe de densité.....	4
Tableau I.2: Classification des bétons légers selon le guide	5
Tableau I.3: Classification des bétons légers	5
Tableau I.4 : Choix des granulats en fonction des classes de béton.....	10
Tableau I.5 : Caractéristiques des granulats légers	12
Tableau I.6: Types de Désignation.....	14
Tableau I.7 : Valeurs de la conductivité thermique	17
Tableau I.8 : Les principales caractéristiques des bétons légers	20
Tableau I.9 : Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité.....	23
Tableau I.10: Résistances mécaniques et la densité des bétons élaborés par	24
Tableau I.11 : Conductivité thermique des bétons de polystyrène	25
Tableau I.12 : Résultats de la conductivité thermique des différents bétons BEPS	25

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

Tableau II.1 : les résultats des essais de caractérisation de la chaux	35
Tableau II.2 : Composition chimique de la chaux de Saida (sac).....	36
Tableau II.3 : les masses volumiques du sable dunaire.....	38
Tableau II.4 : La nature et qualité du sable.....	39
Tableau II.5 : Equivalent du sable du sable dunaire.....	40
Tableau II.6: Analyse chimique du sable de dune	41
Tableau II.7 : Résultats des essais de caractérisation du ciment.....	42
Tableau II.8 : Analyse chimique de l'eau utilisée.....	43
Tableau II.9 : Caractéristiques des POLYS BETO.....	44

Chapitre III : Matériaux élaborés et discussion des résultats

Tableau III.1 : Caractéristiques des bétons de sable de référence BSD (avant allègement).....	53
Tableau III.2 : Composition des bétons de polystyrène traité (polys-béto).....	54
Tableau III.3 : Taux de réduction de la masse volumique des différentes compositions.....	57
Tableau III.4 : Valeurs des résistances à la traction des BSDP et des taux de décroissance.....	58

Liste des Tableaux

Tableau III.5 : Valeurs des résistances à la compression des BSDP et des taux de décroissance..	59
Tableau III.6 : Valeurs de la sorptivité $S_w(\text{mm.mn}^{-0.5})$ des BSDP.....	61
Tableau III.7: Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité.....	61
Tableau III.8: Valeurs des caractéristiques thermiques λ W/(m.k) et a mm ² /s des BSDP.....	62
Tableau III.9 : Résultats des caractéristiques importantes des BSDP réalisés.....	65

Liste des figures

Chapitre I : Revue bibliographique

Figure I.1: Représentation schématique des différents types de bétons légers.....	7
Figure I.2 : Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme	13
Figure I.3 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents.....	14
Figure I.4 : Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction.....	16
Figure I.5 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.....	17
Figure I.6 : Résistance à la compression du béton en fonction de la température.....	18
Figure I.7 : Variation du module d'élasticité en fonction de la masse volumique apparente du béton.....	21
Figure I.8 : Courbes contrainte déformation de bétons mis à l'essai de compression à une vitesse de déformation constante.....	21
Figure I.9 : Relation contrainte déformation des bétons de granulats légers.....	21
Figure I.10: Microstructure de la perle de polystyrène.....	27

Chapitre II : Caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

Figure II.1 : Dispositif Le Chatelier.....	34
Figure II.2 : Dispositif expérimental du perméabilimètre Blaine.....	35
Figure II.3 : la poudre de la chaux après broyage.....	36
Figure II.4 : Pycnomètre pour mesure de la masse volumique absolue.....	38
Figure II. 5: Eprovette de mesure de l'équivalent de sable.....	38
Figure II. 6 : Essai d'équivalent de sable.....	38
Figure II.7 : La courbe granulométrique de sable de dune.....	40
Figure II.8 : Diffractogramme aux rayons X du sable de dune.....	41
Figure II. 9 : ciment CPJ CEM II/A 42.5.....	42
Figure II.10 : Diffractogramme du ciment.....	43
Figure II.11: Analyse granulométrie de billes de polystyrène.....	44
Figure II.12 Schémas du maniabilimètre type B.....	45
Figure II.13 : Appareillage de mesure du retrait.....	46
Figure II.14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (à 3 points).....	47

Figure II.6 : Dispositif de rupture en compression.....	48
Figure II.16: Absorption d'eau par capillarité.....	49

Chapitre III : Matériaux élaborés et discussion des résultats

Figure III.1 : Maniabilimetre type B.....	52
Figure III.2 Variation du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L.....	52
Figure III.3 Evolution du retrait en fonction de l'âge des BSDP.....	56
Figure III.4 : Variation de la masse volumique en fonction du temps (jours) des BSDP.....	57
Figure III.5 Variation de la résistance en fonction du dosage en chaux.....	58
Figure III.6 : Variation de la résistance à la compression des BSD et BSDP.....	59
Figure III.7 : Evolution de la masse absorbé par unité de surface en fonction de la racine carré du temps et sorptivité en fonction du dosage en chaux.....	60
Figure III.8 : Conductivité thermique des BSD0 et BSDP0.....	63
Figure III.9 Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en chaux.....	63
Figure III.10 Variation de la porosité totale en Fonction du dosage en chaux.....	64

Listes des symboles

$D_{\max}$: Diamètre maximal

BGL : Béton de granulats légers

EPS : Polystyrène expansé

G : Granulat

S : Sable

M_1 :Masse de (cellule+ethanol)

M_2 :Masse de (cellule+ethanol+liant)

V_1 :le volume du benzène initial

V_2 : le volume du benzène final (après l'introduction du liant)

S : Surface spécifique (cm^2/g).

k : Constante de l'appareil.

e : l'indice des vides de la couche tassée

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai (poises).

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

ρ_s : masse volumique absolue (kg.m^{-3})

C_p : compacité

i : volume d'eau absorbé par unité de surface

ESp : équivalent de sable au piston

ESp : équivalent de sable visuel

Mf : module de finesse

Rc : résistance à la compression (MPa)

Rf : résistance à la flexion (MPa)

Rt : résistance à la traction (MPa)

FC: Charge de rupture en (N)

Sw : sorptivité ($\text{g/cm}^2\text{min}^{0.5}$)

t: temps de mesure (min)

T : température ($^{\circ}\text{C}$)

H_R : l'humidité relative %

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

ρ_s : masse volumique absolue (kg.m^{-3})

a : La diffusivité thermique

λ : conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

λ_{sec} : conductivité thermique du matériau à sec

λ_{hum} : conductivité thermique du matériau à saturation

Symboles

C/S : ciment/sable

E/L: Rapport eau/Liant

BSD: Béton de sable dunaire

BSDP: Béton de sable dunaire de polystyrène

Eb : Module d'élasticité du béton.

ρ_b : Masse volumique apparente du béton en t/m^3 .

t : Temps mesuré en secondes.

C : Compacité.

P : Porosité.

SD : Sable de dune

b : Largeur de la section carrée du prisme (mm).

ρ_w : Masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm^3).

A_{ab} : Surface absorbante de l'échantillon ($4 \times 4 = 16\text{ cm}^2$).

introduction générale

Introduction générale

Un bâtiment est conçu pour protéger les usagers des effets climatiques (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités, tout en assurant une gestion efficace de l'énergie. Le secteur du bâtiment répute grand consommateur d'énergie (presque la moitié de la consommation globale) est en outre, responsable de 25% des émissions des gaz par l'effet de serre. La réduction de cette consommation est au cœur des préoccupations des bâtisseurs, qui inscrivent leur réflexion dans le cadre du développement durable, ou encore de la haute qualité environnementale. Le développement durable est devenu un véritable enjeu stratégique dans ses trois dimensions. Il touche de façon directe les matériaux de construction, que ce soit du point de vue des émissions de CO₂, de la consommation d'énergie, de la consommation des matières premières naturelles et de l'accès à leur ressource. Beaucoup de recherches sont dernièrement orientées vers la valorisation des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets de différentes natures afin de promouvoir des matériaux isolants et économiques.

De part son importance dans la composition des bétons et mortiers, le sable naturel, notamment le sable alluvionnaire a subi une surexploitation irrationnelle. Celle-ci a eu un impact environnemental considérable en causant de graves problèmes au domaine public hydraulique.

En revanche, l'Algérie possède un gisement très important et de bonne qualité de sable de dune qui couvre plus de 60% de la surface du pays, l'idée de valoriser et d'introduire ce sable dans la confection des bétons et mortiers s'avère très intéressante, non seulement d'un point de vue économique, mais également environnemental. D'autre part la chaux connue comme matériaux traditionnelle utilisée dans la formulation des mortiers cimentaire à base de chaux est un matériau très économique et possède un certain nombre de qualité lié à sa fabrication à sa légèreté et à ces pouvoirs d'isolation. L'idée de substituer partiellement le ciment par la chaux est très bénéfique dans la mesure où les résistances mécaniques restent tolérables.

Dans un autre contexte le béton classique est par excellence le matériau le plus utilisé dans le domaine de construction en raison des performances mécaniques qu'ils offrent. Par ailleurs, utilisé dans la construction des éléments porteurs et de remplissage, le béton traditionnel n'est plus le matériau idéal. En effet, sa résistance élevée dépasse de loin les sollicitations que supportent ces éléments. De plus, leur masse volumique importante comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ implique des forces d'inertie importantes lors des secousses sismiques et des charges verticales élevées. C'est pourquoi beaucoup de recherches dans le domaine de génie civil sont orientées vers les bétons de granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la

pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique.

Le polystyrène matériaux ultra léger connu par sa très faible conductivité thermique, utilisé comme granulats est une des voies d'allègement et d'amélioration du pouvoir d'isolation envisageable pour le béton par le remplacement d'une fraction de sable par les billes polystyrène traité.

En résumé, l'utilisation des matériaux locaux et des déchets industriels pour le développement de nouveaux matériaux de construction légers s'avère une alternative très intéressante sur le plan économique et environnemental et c'est dans cette optique que s'est orienté notre travail.

L'objectif de notre travail est de réaliser, caractériser un béton léger composite, obtenu en substituant une fraction optimale des granulats naturels par des granulats artificiels qui sont des billes de polystyrène.

En deuxième lieu la valorisation du sable dunaire en l'utilisant dans une matrice cimentaire à base de chaux. L'influence du taux de substitution de la chaux par le ciment sur les caractéristiques physico-mécanique et thermique est en fait l'objectif principal de cette étude.

Afin d'atteindre les objectifs cités supra, notre travail est subdivisé en trois chapitres étroitement liés :

- Le premier est consacré à une revue sur la documentation accentuée sur les bétons de sable et les bétons légers en général et sur les bétons de polystyrène en particulier.
- Le deuxième chapitre est consacré à une description des méthodes expérimentales utilisées dans cette étude.
- La caractérisation des matières premières, la formulation des différentes compositions des bétons de Sable dunaire allégé par les billes de polystyrène et leurs caractérisations physicomécaniques et thermiques font l'objet du troisième chapitre intitulé matériaux et résultats expérimentaux.
- Enfin, sur la base des résultats obtenus, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale et des perspectives

Chap I
Revue bibliographique

I.1 Généralités sur le béton de sable

Le béton de sable est un matériau confectionné à partir de sable, de ciment, d'eau et de fillers naturels ou industriels où le gros granulat représente le sable ($D_{\max} = 5 \text{ mm}$). Il ne consomme que 250 à 400 Kg/m³ de ciment, dosage habituel des bétons classiques, alors que le mortier utilise un fort dosage en ciment allant de 400 à 600 Kg/m³ (**Chauvin et al., 1998**)

La norme Française **NF P18 500** définit le béton de sable comme suit : « Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau ; on utilise habituellement un ou plusieurs adjuvant(s) et on peut, éventuellement admettre une quantité de gravillons. Les ajouts (fibres, colorants, etc....) utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange. L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation « béton de sable » tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0,7 ($G =$ gravillon ; $S =$ sable) : « on parle alors de béton de sable chargé »

Le béton de sable a les particularités suivantes :

- Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevée et sa destination (essentiellement destiné aux usages traditionnels du béton) ;
- Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable élevé, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidification par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peut être nécessaire), et l'incorporation d'ajout(s) ;
- Il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et parce qu'il peut être utilisé pour la réalisation des éléments de résistance pour bâtiments et chaussées.

I.2 Généralités sur les bétons légers

Le poids propre de la structure, dans les constructions à béton, représente une proportion importante de la charge totale de la structure, et il est donc très avantageux de réduire la densité du béton en utilisant des granulats légers dans la confection du béton pour avoir un béton à base de granulats légers (BGL).

Plusieurs avantages palpables du béton légers ont été enregistrés par un certain nombre auteurs à savoir, une bonne contrainte de traction, une bonne isolation phonique et thermique due aux vides dans les granulats légers, coefficient de conductivité thermique plus petit et un rapport élevé de résistance/poids.

Par conséquent, la réduction du poids propre de construction par utilisation du béton à granulats légers, réduira les sections des éléments porteurs de la structure et par la suite le coût de la construction

I.2.1 Définitions des bétons légers

Le béton léger est défini comme un béton dont la masse volumique apparente sèche est comprise entre 300 à 2000 kg/m³, des résistances varient de 1 à 60 MPa et des conductivités thermiques de 0.2 à 1 W/m.K (**Clarke, 2002**), qui peuvent être comparées à celles du béton ordinaire : 2200 à 2500 kg/m³, 15 à plus de 100 Pa et 1.6 à 1.9 W/mK.

- La commission des bétons légers propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 kg/m³. D'après (**ACI, 1970**), la masse volumique apparente du béton léger est limitée à **1800 kg/m³** après séchage à l'air pendant 28 jours.

- En Australie, le béton léger de structure est considéré comme béton formé d'agréats de granulats légers et des fines normales donnant une densité sèche pas plus de **1800 kg/m³**.

- En Norvège, toute combinaison de tout type d'agréats peut être utilisée pour béton de structure et qui aboutie à : Un béton de densité sèche de 1200 à 2200 kg/m³ et une résistance inférieure à 85 KN/mm² si les granulats sont légers.

En USA, le béton léger de structure est considéré comme béton de densité sèche inférieure à 1810 kg/m³.

- Le Japon adopte une approche plus radicale, dont il fait référence aux granulats légers mais il ne spécifie aucune valeur de densité, et les propriétés sont conditionnées seulement pour le béton de granulats légers et d'agréats fins.

- En Russie le béton léger est défini par sa résistance à la compression qui variée de 2.5 à 40 N/mm² avec des densités qui varient de 800 à 2000 kg/m³ suivant le type d'agréat utilisé.

En Europe le béton de granulats légers est classé suivant sa densité comme il est indiqué sur le tableau (I.1).

Tableau I.1: Classe de densité [**ACI 213R-87, 1994**]

Classe de Densité	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Densité sèche (kg/m ³)	901-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000

I.2.2 Classification des bétons légers

Les bétons légers de densité de 1000 à 1400 kg/m³ et de résistance de 15 à 22 MPa, sont destinés à la réalisation de dalles et à la construction de murs isolants. Ceux de densité entre 1500 à

2000 kg/m³ et des résistances plus 25 MPa, sont réservés aux dalles de compression, aux planchers en poutrelles de béton, voire à la réalisation des structures d'immeubles ou d'ouvrages d'art, dans

lesquels le poids propre joue un rôle prépondérant. En effet, Les résistances des bétons légers décroissent avec la densité qui peut descendre jusqu'à 400 kg/m³. Du point de vue thermique, il existe une corrélation directe entre la densité, la résistance à la compression et la conductivité thermique (qui caractérise le pouvoir isolant). En effet, la résistance à la compression et la conductivité thermique varient dans le même sens que la densité. Lorsque celle-ci diminue, les résistances mécaniques deviennent plus faibles ainsi que la conductivité thermique, ce qui augmente le pouvoir isolant (Neville,2000).

Tableau I.2: Classification des bétons légers selon le guide [ACI 213R-87].

Classification	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Résistance à la compression R _c (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	< 7

Une classification fonctionnelle est recommandée par la RILEM(1970), basée sur les travaux de (Kass et Compbell, 1972) qui ont dressé une classification selon l'utilisation des bétons légers d'après leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques (tableau I.3).

Tableau I.3: Classification des bétons légers selon [RILEM, 1970].

Classe	I	II	III
Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m ³)	< 1800	Non précise	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W/m.K)	—	< 0.75	< 0.30

I.2.3 Différence entre bétons classiques et bétons légers

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

- Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres (**Kedjour, 1993 et Alrim, 1991**).

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

- D'éléments porteurs de faible section
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique (**Neville, 2000**).

La faible masse volumique des bétons légers provient de leur porosité élevée.

I.2.4 Domaine d'utilisation des bétons légers

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

I.2.4.1 Béton de structure

C'est le cas des bétons légers de haute performance, les bétons au laitier expansé, à l'argile frittée expansée, aux cendres volantes...etc.

I.2.4.2 Isolant porteur

C'est le cas des bétons à la pierre ponce, béton à l'argile expansé...etc.

I.2.4.3 Isolants

Leur résistance est faible, dans cette catégorie on peut citer :

- Les bétons de Bois,
 - Les bétons de polymère,
 - Les bétons à la perlite,
 - Les bétons à la vermiculite,
 - Les bétons cellulaires,
- Dans la construction on les utilise comme : Bloc de maçonnerie, Panneau préfabriqué, Mur anti-bruit, Bardage, Ouvrage extérieur, Élément de cave, Entreevous et hourdis ou comme des pavés.

I.2.5 Types de bétons légers

La masse volumique du béton peut être diminuée en remplaçant une quantité de matériau par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits : soit dans les granulats, soit dans la pâte de ciment ou entre les gros granulats par élimination des granulats fins. On note trois

dénominations pour ces bétons soient : les bétons de granulats légers, les bétons cellulaires et les bétons sans fines ou caverneux (figure I.1).

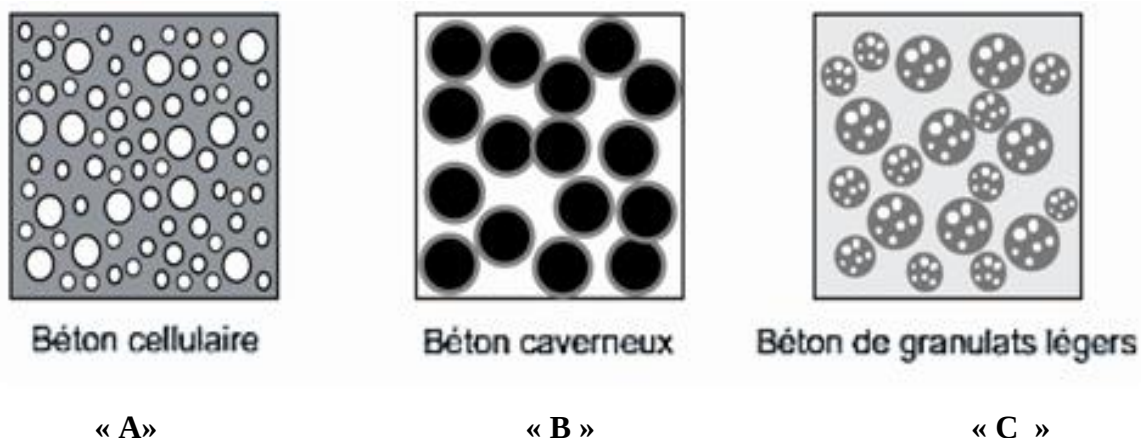


Figure I.1: Représentation schématique des différents types de bétons légers

I.2.5.1/ Le béton cellulaire « A »

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte, soit par gâchage avec de la poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier.

I.2.5.2/ Le béton caverneux « B »

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée; ils sont drainants. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats.

I.2.5.3/ Le béton de granulats légers « C »

Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers. Ces granulats légers sont : le schiste expansé, le mâchefer, les laitiers expansés, l'argile expansée, la ponce, la perlite, la vermiculite ou le polystyrène expansé. On retrouve une grande diversité de compositions et de mélanges possibles et donc une grande variété de propriétés des bétons de granulats légers.

I.3 Les bétons de granulats légers

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

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

I.3.1 Classification des granulats légers

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

- **Matériaux minéraux naturels non préparés** Par définition ce sont des matériaux qui n'ont subi que des traitements mécaniques tels que lavage, broyage, tamisage. Les granulats les plus connus dans cette catégorie sont : la ponce, les pouzzolanes, les roches d'origines volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques (**Arnoud et Virlogeux, 1986; Ledhem, 1997**).

- **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 à part, dans certains cas un traitement mécanique de tri. Le principal granulat dans ce type est le mâchefer, résidu de la combustion des charbons gras du coke ou des ordures ménagères (**Ledhem, 1997**).

- **Déchets industriels préparés** Ce sont en générale des sous produits de l'industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granulats légers. Les granulats de ce type les plus répandus sont : le laitier expansé ou granulé, les cendres volantes frittées ou expansés et le verre expansé.

- **Matériaux organiques** dans cette catégorie on classe des produits qui sont soit des polymères solides de synthèse, soit des matériaux d'origine végétale, on peut ranger dans cette catégorie les granulats de polystyrène expansé qui sont assez répandus et les granulats de bois (copeaux ou sciure). Les deux derniers types de granulats ont fait l'objet de plusieurs études puisque leur utilisation rentre dans le cadre de la valorisation des déchets qui est une politique suivie dans presque tous les pays visant le côté économique de ces types de granulat, ainsi que l'aspect environnemental.

En effet plusieurs travaux ont été réalisés où la matrice est composée essentiellement de déchets industriels ou de matières locales (**Goual, 2001**). L'allègement de la matrice a été réalisé par différents procédés à savoir, l'utilisation de granulats légers, notamment, les granulats de bois et de caoutchouc, ou la création d'une structure cellulaire, soit par réaction chimique, ou par entraînement d'air. Tous ces travaux ont montré l'intérêt de l'allègement des matériaux élaborés dans l'amélioration des performances thermiques, tout en conservant une résistance mécanique suffisante.

I.3.2 Propriétés physico mécaniques et thermiques des Granulats légers

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

Les propriétés spécifiques des granulats pouvant avoir une influence sur les caractéristiques du béton sont :

I.3.2.1 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.

I.3.2.2 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 5 mm.
- 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 19 mm.
- c) Ils ont une densité sèche inférieure à 880 kg/m^3 .

> Masse volumique

Grace 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.4 fixe le choix des granulats en fonction de la classe du béton :

Tableau I.4 : Choix des granulats en fonction des classes de béton (Ferhat, 2002).

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

(+) utilisation recommandée + utilisation possible 0 utilisation impossible

I.3.2.3 Résistance des granulats

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

La caractérisation de la résistance des granulats pose un problème, en effet les essais mécaniques de base (compression et traction) leur sont donc inapplicables vu leur forme géométrique irrégulière et la différence entre leur structure interne et externe. Il en est de même des essais routiers classiques (Los Angeles, fragmentation dynamique, micro-Deval) sont imprécis et peu représentatifs.

Au cours des dernières années, trois essais ont donné lieu à des études précises en vue d'une meilleure compréhension du rôle des divers paramètres de la résistance mécanique des granulats légers, l'essai le plus classique est l'essai "au pot", dérivé directement de la norme soviétique **GOST 9758-68**. Il se réalise par mesure de la pression nécessaire pour enfoncer de

20 mm un piston dans un récipient rempli de granulats.

En 1976, selon **GOST 9758-68** le **CTBB** de France a mis au point un nouvel essai dit de « compression isostatique » qui consiste à mesurer la pression hydrostatique nécessaire à l'écrasement d'un granule entouré d'une gaine souple et plongé dans un bain d'huile mis sous pression.

D'après (**Arnoud et Virlogeux, 1986**), **Armines** a également mis au point un autre essai nouveau dit de "rupture au fil" qui consiste à rompre les granulats par serrage dans une boucle d'un fil. Chaque granulat est caractérisé par une résistance au fil f_{tg} , rapport de la force de traction F exercée sur le fil lors de la rupture à l'aire S de la surface de rupture :

$$f_{tg} = F/S \dots \dots \dots (I.1)$$

I.3.2.4 Porosité et absorption de granulats légers

Les Granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% (**Arnoud et Virlogeux, 1986 ; Hink, 2003 ; Corman, 1961**). La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption. Par ailleurs, la porosité des granulats varie proportionnellement à la taille des grains.

En raison de leur structure poreuse, les granulats légers ont tendance à absorber plus d'eau que les granulats normaux. Un essai d'absorption de 24 heures montre que les granulats légers absorbent généralement 5 à 20% en poids du granulat sec (**Neville, 2000 ; Rilem, 1970**). Cette absorption dépend de la structure des pores du granulat (porosité ouverte ; porosité fermée), de leur taille et de la morphologie interne des granulats.

La capacité d'absorption des granulats légers a une grande importance dans l'étape du malaxage. Lorsqu'une certaine quantité d'eau est mélangée, la quantité disponible pour humidifier le ciment et permettre la réaction d'hydratation dépend de la quantité d'eau absorbée par les granulats légers. Cette quantité peut être nulle lorsque les granulats légers ont été préalablement immergés pendant une longue période, alors qu'elle peut être très importante, selon le type de granulat léger, lorsqu'ils ont été préalablement séchés au four. Entre ces deux cas extrêmes, la quantité d'eau absorbée par les granulats séchés à l'air peut varier entre 70 et 100 kg par m³ de béton après leur introduction dans le malaxeur (**Neville, 2000 ; Corman, 1961**).

Après 24 heures, l'absorption des granulats légers se situe entre 5 à 20 % de la masse du granulat à l'état sec, mais ne dépasse habituellement pas les 156 % dans le cas des granulats de bonne qualité utilisés dans les bétons structuraux.

I.3.2.5 Caractéristiques thermiques des granulats légers

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

Tableau I.5 : Caractéristiques des granulats légers (Ziregue, 2005)

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

I.3.3 Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques Des bétons de granulats légers

I.3.3.1 Masse volumique

La masse volumique est une caractéristique fondamentale du béton léger. Elle dépend principalement de la masse volumique des granulats et de la composition du béton léger et en particulier du rapport G/S, du volume absolu de granulats légers au volume absolu de sable. Mais la définition d'une masse volumique de référence n'est pas sans difficulté, du fait de l'importance de la quantité d'eau contenue dans le béton léger frais et de ces variations lors du durcissement. On définit la masse volumique sèche, noté ρ_s , comme étant la masse volumique qu'aurait le béton léger une fois toute l'eau ne servant pas à l'hydratation du ciment soit évaporée, elle doit être mesurée à 28 jours après séchage à l'étuve à 100°C (Dupain et al, 1995 ;

Arnoud et Virlogeux 1986 ; Corman 1961). Le diagramme suivant montre les différentes gammes de masse volumique pour les différents types de bétons légers.

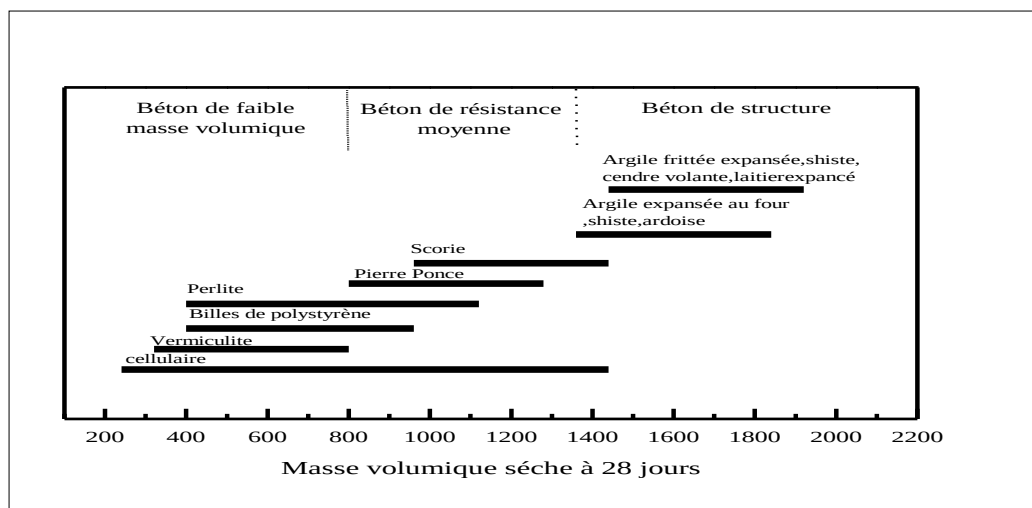


Figure I.2 : Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87 (Neville, 2000).

I.3.3.2 Résistance à la compression

En général presque tous les bétons légers présentent des résistances à la compression inférieures à celles des bétons ordinaires ; cependant quelques types de bétons légers, évidemment par ajout de produits peuvent atteindre des résistances similaires à celles du béton classique, c'est le cas des bétons légers de haute performance BLHP (Levy et boulicaut, 1932). La qualité des granulats est considérée comme le principal facteur limitant la résistance en compression des bétons de granulats légers, vient ensuite la qualité de la matrice utilisée et la masse volumique du béton durci. Plusieurs résultats témoignent d'un plafond de résistance de 60 à 70 MPa (Shink, 2003 ; Corman, 1961 ; Yamasaki et Nimura, 1994) en compression pour une masse volumique de 1800 à 1900 kg/m³, difficile de dépasser avec des granulats légers.

Cependant la résistance en compression est influée par plusieurs paramètres dont on peut citer :

- **Le dosage en ciment.** Il est bien évident que, pour tous les bétons la résistance en compression est proportionnelle au dosage en ciment. Cette loi est vraie aussi pour les bétons légers mais il faut noter qu'à partir d'un certain seuil, une augmentation du dosage en ciment n'aurait pas d'influence sur la résistance. Cette notion se justifierait par le fait que la rupture du béton léger se produit par cassure des granulats légers, qui sont moins résistants que le mortier. De ce fait, la résistance du béton léger serait "plafonnée" par celle

des grains, et à partir d'une certaine valeur, l'augmentation de la résistance du mortier n'aurait plus d'incidence sur celle du béton. La figure I.3 montre les variations de la résistance en compression de différents bétons légers en fonction du dosage en ciment, et on

peut bien voir que la résistance augmente en fonction du dosage en ciment et qu'il existe un seuil de dosage au-delà de lequel la résistance reste constante. La légende dans la figure est telle que montré sur le tableau ci-dessous :

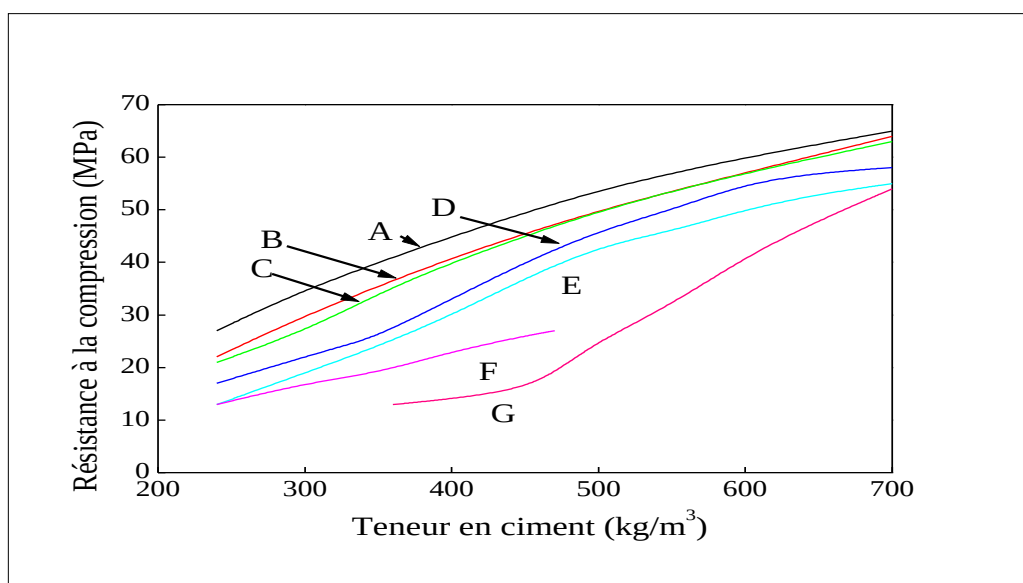


Figure I.3 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats (Neville,2000)

Tableau I.6:Types de Désignation

Graphe	Désignation
A	cendres volantes frittées et granulats ordinaires
B	laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire
C	cendres volantes frittées
D	schiste fritté
E	ardoise expansée
F	argile expansée et sable
G	laitier expansé

- **Le dosage en eau.** Il est bien évident que la résistance du béton est d'autant plus élevée que la

quantité d'eau de gâchage est plus faible. Dans le cas des bétons de granulats légers il se produit des phénomènes, parfois mal expliqués due à l'absorption d'eau par les granulats lorsqu'on fait varier la quantité absorbée par ces granulats.

En principe, si les granulats sont secs et très absorbants, l'absorption d'eau par les granulats, avant prise, risque de dessécher le mortier situé à la périphérie du granulat et dans cette zone, le ciment risque de ne pas pouvoir s'hydrater complètement. Ce qui peut conduire à une chute de la résistance du béton. Dans le cas de granulats saturés, le départ d'eau des granulats vers le mortier risque de délayer le mortier situé à la périphérie des grains. Et surtout le sens de migration de l'eau risque d'empêcher la pénétration du mortier dans les pores des granulats légers et de réduire les liaisons entre le mortier et les granulats et par suite la résistance du béton.

Le comportement du béton léger n'apparaît quand même pas facile à comprendre. En pratique, au souci de la recherche d'une résistance élevée s'ajoutent les impératives de la mise en œuvre : le béton léger doit avoir une maniabilité correcte pendant 1 à 2 heures après sa fabrication (Neville, 2000 ; Arnoud et Virlogeux, 1986). Cela conduit à l'emploi quasi systématique d'un plastifiant réducteur d'eau.

• **Le dosage en granulats (rapport G/S).** Bien entendu, le rapport du volume de granulat G, au volume absolu de Sable S, joue un rôle considérable dans la résistance du Béton léger, plus il augmente plus la proportion des granulats légers (point faible du Béton) augmente et plus la résistance diminue, mais la masse volumique du béton est d'autant plus faible que le rapport G/S est élevé. Il faut donc trouver un compromis entre les deux besoins contradictoires : Faible masse volumique et forte résistance exige en pratique un apport G/S compris entre 1.5 et 1.8, il peut atteindre 1.90 mais cela conduit à des bétons assez fragiles (Neville, 2000 ; Corman, 1961).

Pour les granulats légers rigides utilisés généralement dans les bétons de structure, il est vrai qu'on obtient des résistances meilleures avec les gros granulats qu'avec des petits granulats. Mais pour les granulats légers utilisés dans les bétons de construction et d'isolation, le phénomène est inversé, puisque les gros granulats sont relativement faible et leur résistance peut constituer une limite pour celle du béton (Neville, 2000).

I.3.3.3 Résistance à la flexion

Dans la plupart des bétons légers, la résistance à la flexion suit la résistance à la compression. Cette résistance est relativement faible, d'autant que la propagation des fissures s'effectue au travers des granulats légers et non au niveau des interfaces. Les résistances en traction peuvent atteindre des valeurs maximales de 5.0 à 7.6 MPa pour des bétons d'une masse volumique moyenne de 1940 kg/m³ (Shink, 2003 ; Corman, 1961). Pour les granulats légers à

caractère fibreux, leur action dans les bétons légers est similaire à celle observée dans les granulats rigides, c'est-à-dire qu'ils permettent essentiellement d'augmenter la ductilité du matériau.

Les bétons légers présentent à peu près le même rapport R_t/R_c que les bétons ordinaires (**Bouguerra, 1997**), ce rapport est influencé par :

- La grosseur des granulats.
- L'âge de l'échantillon.
- L'environnement de mûrissement.

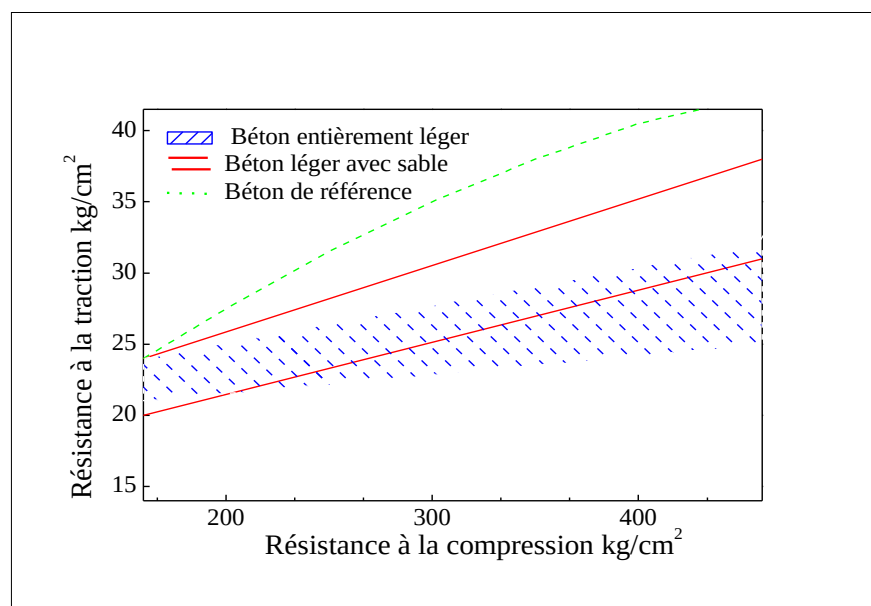


Figure I.4 : Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction (**Ferhat, 2002**).

La figure I.4 montre la relation entre la résistance à la compression et la résistance à la traction, et on constate bien qu'il y a une bonne corrélation entre les deux résistances.

I.3.3.4 L'isolation thermique

L'une des caractéristiques les plus importantes des bétons légers est leur pouvoir isolant. Cette propriété est caractérisée par des paramètres thermo physiques qui sont : la conductivité thermique λ ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), la chaleur spécifique c ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), la diffusivité thermique a (m^2/s) et l'effusivité thermique b ($\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$) (**Astrand et al, 1993 ; Ramachandran, 1981**).

Le pouvoir isolant est déterminé par la nature du matériau et celle du granulat. La figure I.5 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique du béton

léger et on voit bien que la valeur de λ augmente avec la masse volumique.

La conductivité thermique est influencée par le degré de saturation du béton. En effet, la conductivité de l'air est plus faible que celle de l'eau, dans le cas des bétons légers, une augmentation de la teneur en humidité de 10% augmente la conductivité thermique d'à peu près la moitié (**Astrand et al 1993**). Dans le tableau 1.7 et d'après (**Loudon et Stacey,1990**) qui proposent les conductivités thermiques pour les différents types de bétons.

La figure I.5 représente selon un fuseau les variations de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique et on peut bien voir qu'elle augmente en fonction de la masse volumique.

Tableau I.7 : Valeurs de la conductivité thermique recommandée par(Loudon et Stacey,1990)

Teneur en eau (%)	Conductivité ($\text{Wm}^{-1}.\text{K}^{-1}$)							
	Pour un béton protégé des intempéries				Pour un béton exposé aux intempéries			
	5	5	5	2.5	8	8	8	5
Masse volum	Béton cellulaire	Béton léger avec laitier expansé	Béton léger avec argile expansée ou cendres volantes frittées	Béton ordinaire	Béton cellulaire	Béton léger avec laitier expansé	Béton léger avec argile expansée ou cendres volantes frittées	Béton ordinaire
320	0.109	0.087	0.130		0.123	0.100	0.145	
480	0.145	0.116	0.173		0.166	0.130	0.187	
640	0.203	0.159	0.230		0.223	0.173	0.260	
800	0.260	0.203	0.303		0.273	0.230	0.332	
960	0.315	0.260	0.376		0.360	0.289	0.433	
1120	0.389	0.315	0.462		0.433	0.360	0.519	
1280	0.476	0.389	0.562		0.533	0.433	0.635	
1440		0.462	0.678					
1600		0.549	0.794	0.706				0.808
1760		0.649	0.952	0.838				0.952
1920				1.056				1.194
2080				1.315				1.488
2240				1.696				1.904
2400				2.267				2.561

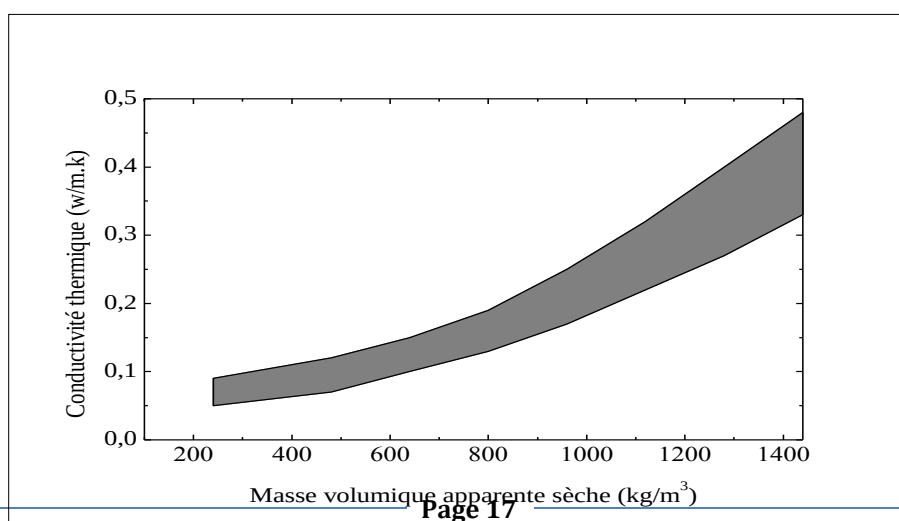


Figure I.5 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique (Steiger, Hurd,1978).

I.3.3.5 Résistance au feu

Lorsqu'un élément en béton est soumis au feu, il se produit un nombre restreint de phénomènes qui peuvent le conduire à la ruine :

- L'éclatement ponctuel ou plus ou moins généralisé.
- L'affaiblissement progressif des caractéristiques mécaniques.

L'éclatement se produit en général assez rapidement, le plus souvent dans les 20 à 30 premières minutes de l'incendie, et a pour origine l'expansion de la vapeur en laquelle s'est transformée l'eau que contient toujours le béton, lorsque celle-ci dépasse un certain pourcentage du volume et qu'elle ne peut s'échapper librement. Pour les bétons de granulats légers, on estime que le risque d'éclatement disparaît lorsque la teneur en eau descend en dessous de 5 à 7 %. On note également que ce risque est nettement moins élevé lorsque l'épaisseur des éléments dépasse 0.2 à 0.3 m.

En ce qui concerne l'influence du feu sur les résistances mécaniques, plusieurs études sur des bétons légers ont mis en évidence une sensibilité au feu relativement faible des bétons légers par rapport aux bétons traditionnels. La figure 1.6 montre que le béton léger présente une perte de la résistance à la compressions beaucoup plus faible que celle des bétons classiques et des bétons calcaires, après l'exposition à des températures comprises entre 100 °C et 800 °C.

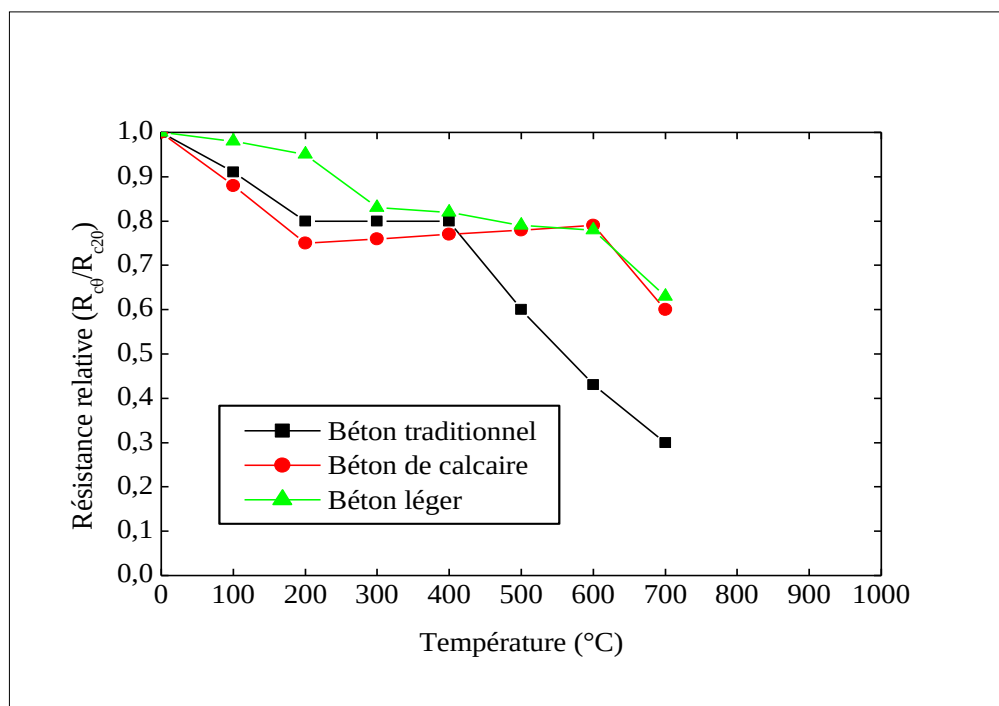


Figure I.6 : Résistance à la compression du béton en fonction de la température (Arnoud et Virlogeux, 1986).

I.3.3.6 Durabilité

L'utilisation de granulats légers n'entraîne pas d'effet préjudiciable sérieux sur la durabilité, si ce n'est lorsqu'ils sont saturés et soumis à des cycles de gel-dégel, parce que le réseau poreux d'un granulat est généralement discontinu (**Neville, 2000 ; Arnoud et Virlogeux, 1986 ; Shink, 2003 ; Corman, 1961 ; J. Baron, 1992**).

La porosité des granulats eux-même ne modifie pas la perméabilité du béton, puisqu'elle est contrôlée par la perméabilité de la pâte. La faible perméabilité du béton de granulats légers est le résultat de plusieurs facteurs : la qualité élevée de l'interface granulat pâte, ce qui empêche l'écoulement autour des granulats, la compatibilité entre le module d'élasticité du granulat et celui de la matrice, de plus la réserve d'eau contenue dans les granulats permet la poursuite de l'hydratation du ciment et la réduction de la perméabilité (**Neville, 2000**).

Les grands volumes de vides occasionnés par les granulats légers pourraient augmenter la perméabilité aux gaz des bétons de granulats légers, en particulier le CO₂ et l'on pense généralement qu'il est préférable d'assurer un recouvrement plus important des armatures (**Neville, 2000 ; Arnoud et Virlogeux, 1986 ; Shink, 2003**).

La résistance au gel et à l'écaillage du béton est obtenue en combinant des granulats et une matrice de bonnes qualités. Bien que les granulats légers soit très absorbants, ils sont néanmoins très durables au gel. Lorsque les granulats légers sont saturés avant la fabrication du béton on augmente toute fois les risques d'endommagement du matériau, si ce dernier est soumis à des cycles répétés de gel-dégel comme les bétons ordinaires, l'air entraîné permet de protéger efficacement les matériaux contre le gel et l'écaillage (**Shink, 2003**).

En fin de ce paragraphe, nous pouvons réunir dans le tableau I.8 l'ensemble des principales caractéristiques des bétons les plus couramment utilisés.

I.3.3.7 Propriétés élastiques des bétons légers

L'excellente adhérence entre les granulats légers et la matrice élimine le développement prématuré de la microfissuration de liaison ainsi, la relation contrainte déformation est linéaire, souvent jusqu'à atteindre 90% de la résistance finale (**Neville, 2000**). Le béton légers présente un comportement particulièrement bon de sorte que les propriétés élastiques des granulats ont une influence plus grande sur le module d'élasticité du béton que dans le cas de celui de densité normale, parce que les propriétés élastiques du granulats sont influencés par son indice de vide et donc par sa densité, le module d'élasticité du béton légers peut s'exprimer en fonction de la masse volumique aussi bien que de sa résistance en compression. Mais généralement il est lié à la masse volumique du béton, les Bétons de 1500 à 1900 kg/m³ sont ainsi caractérisés par un module d'élasticité de 15 à 25 GPa (**Shink, 2003**).

Tableau I.8 : Les principales caractéristiques des bétons légers (Loudon et Stacey,1990)

Type de béton		Masse volumique des granulats (kg/m ³)	Masse volumique sèche du béton (Kg/m ³)	Résistance à la compression à 28jours (MPa)	Retrait de séchage (µm/m)	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
Laitier expansé	Fin	900	1850	2	500	0.69
	Grossier	650	2100	1	600	0.76
Argile expansée au four giratoire	Fin	700	1200	1	600	0.38
	Grossier	400	1300	7	700	0.40
Argile expansée au four giratoire avec	Grossier	400	1500	2	-	0.57
			1600	0	-	-
			1750	3	-	-
			1900	5	-	-
Argile frittée	Fin	1050	1500	2	600	0.55
	Grossier	650	1600	5	750	0.61
Ardoise expansée au four giratoire	Fin grossir	950	1700	2	400	0.61
		700	1750	8	450	0.69
				3		
Cendres volantes Frittée	Fin grossier	1050	1500	2	300	-
		800	1540	5	350	-
			1570	3	400	-
Cendres volantes frittées	Grossier	800	1700	2	300	-
			1750	5	350	-
			1790	3	400	-
Pierre ponce		500-800	1200	1	1200	-
			1250	5	1000	0.14
			1450	2	-	-
Perlit		40-200	400-500	1.2-	2000	0.05
Vermiculite		60-200	300-700	0.3-	3000	0.10
Cellulaire	Cendre volante sable	950	750	3	700	0.19
		1600	900	6		0.22
Cellulaire Autoclave		-	800	4	800	0.25

La figure I.7 montre que la variation du module d'élasticité en fonction de la masse volumique est linéaire. Les équations disponibles dans les différentes normes s'expriment néanmoins en fonction de la résistance, car elles sont générales et s'appliquent également aux bétons de granulats rigides.

La figure I.8 montre la différence entre les courbes contrainte-déformation des bétons traditionnels et des bétons légers. On peut voir dans cette figure que pour les bétons légers la déformation augmente plus vite que la contrainte et ceci est due à l'élasticité des granulats légers. En comparant les différentes classes de bétons légers sur la figure I.9, on voit que le module élastique des bétons de granulats légers augmente en fonction de la résistance du matériau de manière identique que les bétons traditionnels. Le matériau suit donc un comportement d'autant plus fragile que sa résistance est élevée. Les déformations maximales des bétons légers à haute performance sont de l'ordre de 3.3 à 4.6 mm/m pour des résistances comprise entre 50 et 90 MPa. Elles sont supérieures à celles des bétons traditionnels de même

résistance. Par ailleurs, le faible module élastique des granulats légers augmente non seulement les déformations instantanées du béton, mais également les déformations sous charge. En effet, contrairement aux granulats rigides, les granulats légers ne gênent pas les déformations de la pâte de ciment. En conséquence les variations dimensionnelles des bétons de granulats légers sont plus importantes que celles des bétons de granulats rigides.

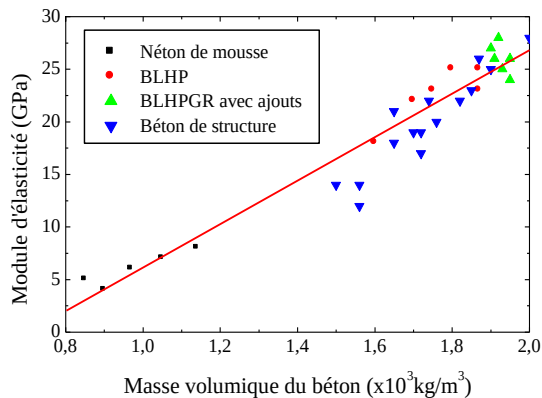


Figure I.7: Variation du module d'élasticité en fonction de la masse volumique apparente du béton (Shink,2003).

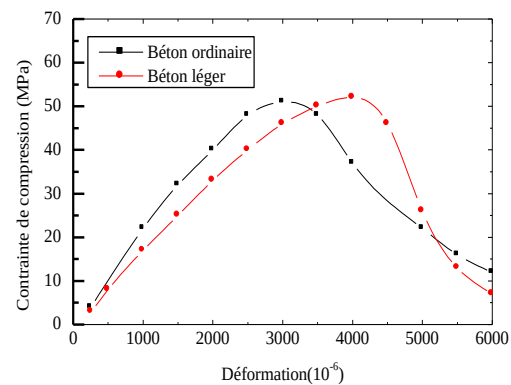


Figure I.8 : Courbes contrainte déformation de bétons mis à l'essai de compression à une vitesse de déformation constante (Neville,2000).

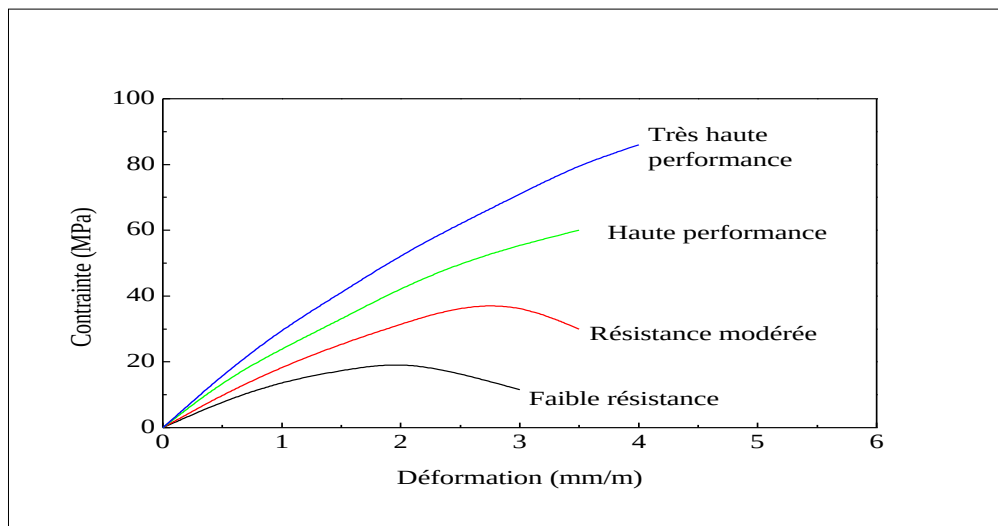


Figure I.9 : Relation contrainte ϵ déformation des bétons de granulats légers (Shink,2003).

I.4 Les béton de granulats de polystyrène expansé

Le béton de polystyrène est un béton qui appartient à la classe des bétons de granulats légers. Il est généralement constitué de billes de polystyrène mélangées à une matrice à base de pâte de ciment, ou à base de mortier. Parfois pour un critère d'allègement le polystyrène est

utilisé dans les bétons traditionnels en remplaçant une partie des granulats ordinaires par des billes de polystyrène.

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

- Il est ultra léger, sans doute parmi les bétons les plus légers.
- Il est reconnu par sa faible absorption d'eau.
- Il est durable.
- Il résiste aux agents agressifs.
- Il est très économique.
- Il est considéré parmi les matériaux qui possèdent les meilleures performances thermiques et phoniques.

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

I.4.1 Les granulats de polystyrène

I.4.1.1 Fabrication du polystyrène expansé

Le polystyrène brute est un matériau plus ou moins lourds il se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée en trois phases

1) La polymérisation du styrène additionnée d'agent porogène

Le produit obtenu se présente sous forme de perles de polystyrène cristal contenant un porogène (pentane) .

2) Le pré expansion des perles à l'aide de la vapeur

La température de la vapeur est supérieure à la température d'ébullition du pentane ce qui entraîne la formation de cellules dans les perles de polystyrène. Les billes obtenues sont constamment agitées afin d'éviter leur agglomération.

Le produit final se présente sous forme de billes de polystyrène contenant des cellules. Ces billes sont ensuite stockées dans des silos pour permettre l'évacuation de l'eau et l'équilibrage des pressions internes / externes.

3) Le moulage

Les billes sont introduites dans un moule dans lequel est injectée de la vapeur d'eau sous pression. Les billes continuent alors leur expansion et se soudent entre elles. La quantité de billes introduites dans le moules détermine la densité finale du produit.

Le polystyrène comporte trois niveaux de structure

- Un agglomérat de billes soudées entre elles,
- Des billes composées de cellules,
- Des cellules contenant un gaz (air et résidus de porogène).

I.4.1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène :

- **Densité**

La densité du polystyrène à l'état brut voisine les 1000 kg/m³ (**Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, 1998**). Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m³ (**Yvrard, 1998**). 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 (**Yvrard, 1998**).

- **Résistance à la chaleur**

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

- **Absorption**

Le polystyrène est un matériau de faible absorption, elle est de 0.2 à 1.g par100.cm³ (**Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, 1998**).

Tableau I.9 : Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité (**Yvrard, 1998**).

Référence	Classe Q ₁	Classe Q ₂	Classe Q ₃	Classe Q ₄	Classe Q ₅
Masse volumique (kg/m ³)	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

- **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 5 cm entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0.027 à 0.037 W.m⁻¹.K⁻¹. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux.

I.4.2 Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de polystyrène

I.4.2.1 Densité

la densité des bétons de polystyrène varie selon le dosage en polystyrène, elle varie dans la gamme 300-2000 kg/m³ (**Chen et Liu,2004**).

I.4.2.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons de polystyrène est fonction du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 0.2 et 23 MPa (**Chen et Liu,2004 ;Chaix, 1989**).

Quant à la résistance à la traction, elle varie entre 0.1 et 2.4MPa. Elle peut être améliorée par incorporation de fibres tels que les fibres en acier (**Chen et Liu,2004 ;Chaix, 1989**)

Des recherches expérimentales effectuées au niveau de notre université Amar Télidji à Laghouat sur les bétons légers à base de sable dune allégé par les billes EPS ont tenté la substitution des fines minérales (issues des déchets de brique), dans le ciment (**Souici, 2012**) et dans le sable (**Belmecheri, 2012**), leurs résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau I.10: Résistances mécaniques et la densité des bétons élaborés par (**Souici, 2012 et Belmechri,2012**).

	BPSE (Souici I. 2012)			BPSE (Belmechri O 2012)		
% PSE	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)	Rt (MPa)	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)	Rt (MPa)
0,00	1930	73,59	7.81	2070	51,03	11,04
0,2	1630	21,48	5.95	1890	37,33	9,21
0,4	1490	16,24	4.69	1760	31,39	8 ,58
0,6	1320	14,10	3.87	1700	27,31	7,02
0,8	1240	6,39	3.39	1610	18,68	6,90
1	1150	5.19	2,79	1540	13,97	6,57
1,2				1480	12,69	6,00

I.4.2.4 Retrait

Variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1.2mm/m (**Ganeshbabu et Saradhi Babu,2004**).

I.4.2.5 Conductivité thermique

Les bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant, leur faible conductivité thermique comprise entre 0.05 à 0.12 W.m⁻¹.K⁻¹pour les bétons de construction en témoignent

cette propriété. Elle varie en fonction de la densité du béton. Le tableau I.11 donne quelques valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche.

Tableau I.11 : Conductivité thermique des bétons de polystyrène (Chaix,1989).

Masse volumique sèche ρ_a (kg/m ³)	300	500	700	900	1200	1500
Conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0.065	0.14	0.15	0.33	0.39	0.7

Tableau I.12 : Résultats de la conductivité thermique des différents bétons BEPS (Souici,2012).

BEPS	ρ_{28j} (g/cm ³)	λ_{sec} (w/m.°C)	λ_{hum} (w/m.°C)
BEPS0	1,93	1,715	2,735
BEPS0,2	1,63	1,240	1,862
BEPS0,4	1,49	0,665	1,284
BEPS0,6	1,32	0,618	1,090
BEPS0,8	1,24	0,598	0,828
BEPS1	1,15	0,378	0,688

I.4.3 Le Polys Béto

Le Polys Béto est un agrégat artificiel d'allègement et d'isolation des bétons. Il remplace totalement ou partiellement le sable et le gravier traditionnellement employés dans la fabrication du béton. Le béton léger est réalisé à base de billes de polystyrène expansé calibrées aux diamètres variant entre 1,5 et 2,5 mm. L'enrobage de celles-ci par des adjuvants spécifiques qui assurent aux billes une intégration et une répartition homogènes dans le béton.

I.4.3.1 Fabrication et contrôle des billes servant à la réalisation du Polys-Béto

I.4.3.1.1 Fabrication des billes

Le polystyrène utilisé dans la conception du Polys Béto est produit à partir de PSE T32 (Polymère de styrène contenant du Pentane servant à l'expansion). Le polystyrène est obtenu de façon homogène et de qualité constante et demande la réalisation d'une double expansion :

La première expansion s'effectue dans des pré-mousseurs munis d'une arrivée de vapeur, d'une arrivée d'air et d'un système d'introduction du PSE T32. Le produit obtenu a une densité

variable de 15 à 16 kg/m³.

Les perles obtenues lors de la pré-expansion devront être stockées durant une période minimale de 24 heures avant de subir leur deuxième expansion.

La réalisation de cette deuxième expansion s'effectue à une capacité de 250 kg/heure, celle-ci permettant d'obtenir un produit d'une densité comprise entre 10 et 11 kg/m³.

Les produits obtenus lors des deux expansions passent par un lit fluide de façon à obtenir une matière sèche.

C'est alors que le PSE T32 transformé devient du polystyrène expansé qui est réceptionné dans des silos pendant au moins 48 heures avant de recevoir son enrobage. Le stockage permet d'obtenir une perle stabilisée.

Les billes de polystyrène obtenues sont ensuite introduites dans un malaxeur de 10 m à axe horizontal afin d'être enrobées par les différents adjuvants, c'est alors qu'on obtient les billes de Polys-Béto.

Les produits sont alors orientés vers les silos sous lesquels se trouvent les postes mise en sachets des billes Polys Béto qui est conditionné dans des sacs de 100 ou de 200 litres.

Les sacs de Polys-Béto peuvent également être livrés en vrac. (**Avis Technique 16/06-507 CSTB, 1969**)

I.4.3.1.2 Caractéristiques techniques des billes Polys-Béto

Les billes de polystyrène servant à fabriquer le Polys-Béto sont composées de cellules fermées qui les rendent hydrophobes, imputrescibles et insensibles aux réactions alcalines et empêchent la production de micro-organismes. Elles ont les caractéristiques techniques suivantes :

- Granulométrie : de 1,5 à 2,5 mm
- Masse volumique apparente après traitement : de 22 à 25 kg / m³
- Masse volumique absolue : 33 kg/m³
- Module d'élasticité : 100%.
- conductivité thermique utile : $\lambda = 0,045 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.
- pas de tassement ou d'écrasement lors du transport, du stockage et de la mise en œuvre du béton.

I.4.3.2 – Le béton incorporant les granulats de Polys Béto

- Masse volumique : à partir de 250 kg/m³,
- Résistance à la compression : à partir de 0.5 MPa,

- Isolation thermique : à partir de $0.06 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$.

I.4.3.3– Propriétés morphologiques

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes (Figure I.10) (Fisch et July,2003). Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

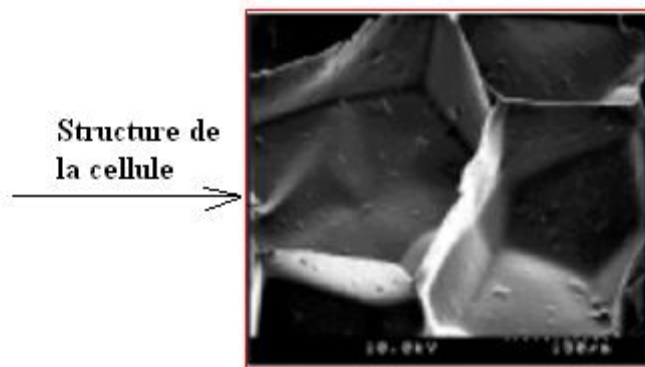


Figure I.10 : Microstructure de la perle (Fisch et July,2003)

I.4.3.4– les études menées sur le béton léger allégé par le Polys Béto en Algérie.

Une étude a été menée par (Abdelhadi, 2005) sur le comportement des bétons légers à base de granulats pouzzolaniques de Beni-Saf allégés par le Polys Béto. L'étude a porté sur deux types de bétons.

Dans un premier cas les granulats étaient secs, et avec un rapport de $E/C=0.59$, dans l'autre cas, les granulats étaient pré mouillés, et le rapport E/C était variable. Dans tous les cas, il a procédé à la variation de la quantité du Polys Béto en pourcentage du volume de 10, 20,30et 50%.

Les éprouvettes cylindriques ont été conservées dans l'eau. les constatations qui ont été faites sont :

- Les masses volumiques diminuent en augmentant le pourcentage de Polys Béto.
- Les contraintes à la compression, pour les granulats secs, diminuent aussi en augmentant le volume en pourcentage du Polys Béto

Il a été enregistré une valeur de résistance de 15.90 MPa pour 10% de PB, et 11.00MPa pour 50%. La substitution totale du granulat léger 3/8 avec le Polys Béto a donné une résistance de 20.50 MPa.

Pour les granulats pré-mouillés les résistances ont été un peu améliorées, on a compté 17.40MPa pour 10% de PB contre 13.50 MPa pour 50% de PB.

L'ajout d'un adjuvant n'a pas donné les résultats escomptés, on a même enregistré des

régressions dans les valeurs des résistances.

Pour 10% de PB on a remarqué une résistance de 15.30 MPa, et pour 50% la valeur de résistance était de 12.11 MPa. La substitution totale du 3/8 n'a donné qu'une résistance de 18.38 MPa.

Alors que pour les granulats pré-mouillés, les résistances étaient 17.50 MPa, 12.25 MPa et 19.05 MPa pour 10%, 50% et la substitution totale du 3/8 respectivement.

I.4.4 Différence entre le polystyrène non traité et le polystyrène traité (polys-béto)

Les polystyrènes sont des alvéoles plastiques de la famille de polymères, de styrène. Il y a des douzaines de types et de qualités différentes.

I.4.4.1 Le polystyrène normal non traité

Plusieurs recherches ont été effectuées sur des essais d'incorporation du polystyrène normal dans le béton. Nous pouvons constater que : Si nous mélangeons le polystyrène non traité normal avec le ciment et l'eau :

- Le polystyrène revient à la surface du béton et flottera.
- > Le ciment tombe au fond à cause de la différence de densité entre le polystyrène expansé et le ciment. Cependant on peut réduire le phénomène "du retour à la surface par flottement du polystyrène", en employant des équipements spécifiques et si le béton est très épais (avec une petite quantité d'eau). Et aussi en employant du polystyrène perméable, car les alvéoles du polystyrène normal seront remplis d'eau pour réduire la différence de densité dans le mélange "eau /ciment/polystyrène".

Mais malgré cela, l'utilisation de cette sorte de béton aura des inconvénients :

- > Il y aura des difficultés d'obtention d'une homogénéité du matériau, en employant l'équipement traditionnel pour faire le béton
 - > Difficulté de pomper ou de vibrer le béton
 - > Constatation d'aucune résistance au feu
- D'où les conséquences négatives suivantes :
- > Le béton contiendra une quantité d'eau
 - > Résistance à la compression faible
 - > Pas économique : car il y aura une grande consommation de polystyrène pour alléger le béton à cause des 5 à 30 % des alvéoles du polystyrène qui seront remplis d'eau et de ciment
 - > L'eau contenue dans le béton produira des germes et donnera de mauvaises odeurs dans le polystyrène ainsi que dans le béton ; particulièrement dans des climats chauds et humides ou dans des pièces humides comme la salle de bains ou la cuisine.
 - > Délai trop grand de séchage pour le béton

- > Retrait important du béton du à la grande quantité d'eau évacuée
- > Possibilité d'employer des renforts d'acier écartée parce qu'ils seraient attaqués par la corrosion (à cause de l'eau contenue dans les alvéoles du polystyrène)

En conclusion l'emploi du polystyrène normal dans le béton a une pauvre image de fragilité, pour minimiser ces problèmes on doit traiter ces billes de polystyrène de façons à d'améliorer ces caractéristiques. En Algérie la société IBERCONSTRUCTION traite les billes de polystyrène qui sont fabriquées à l'usine ENL sise à la zone industrielle d'Oued Smar Alger pour obtenir le produit POLYS BETO (**Groupe Specialize N°7, 2006**).

Les granulats Polys béton sont des agrégats artificiels. Associés à des liants hydrauliques et le plus souvent à du sable, ils sont employés pour la confection de chapes légères sur supports continus porteurs, pour la réalisation de parois et de produits manufacturés et comme remblai. C'est un agrégat léger qui s'emploie comme un agrégat traditionnel. Il est constitué par un polymère rigoureusement sélectionné expansé sous des contraintes spécifiques de température, de vitesse, et de pression, permettant ainsi aux alvéoles périphériques de s'opposer à la pénétration de l'eau. Il est calibré, traité en surface pour éviter toute ségrégation lors de la confection du béton. Incorporé au béton,

Le Polys-béto assure un allègement durable du béton, diminue les délais de prise, ouvre un large éventail de choix de densités. Il participe à l'isolation thermique du béton selon la densité. En Algérie, des demandes ont été formulées pour un avis technique préalable sur ce procédé nouveau, pour pouvoir introduire le matériau dans le marché de la construction. Pour cela plusieurs essais sont en cours pour vérifier les caractéristiques physico mécaniques du procédé Polys béto. (**Guezouli et Benaïssa ,2005**)

I.4.4.2 Béton de polystyrène traité (polys-béto)

Le Polys-béto est un agrégat artificiel conçu et réalisé pour alléger, isoler et améliorer certaines caractéristiques de résistance des bétons. Ces agrégats sont du polymère rigoureusement sélectionné et expansé sous des contraintes spécifiques de température, de vitesse, et de pression, permettant ainsi aux alvéoles périphériques de s'opposer à la pénétration de l'eau.

Le polys-béto est réalisé à base d'un styrène spécifique, expansé à seulement 80 fois pour obtenir une taille de diamètre de perle ou de bille égale au maximum à 3 mm. Donc, dès le début la matière première est complètement imperméable. Ces perles expansées sont alors traitées avec des additifs spécifiques pour d'abord les déchargez de leurs charges électriques, puis avec d'autres additifs, pour les chargez avec des charges électriques négatives, afin que toutes les perles aient les mêmes charges électriques, et auront tendance à se repousser. Ceci dans le but

d'avoir toutes les perles avec des charges opposées, à celle du ciment Les charges électriques des perles seront neutralisées au contact de l'eau et du ciment. Ce qui leurs donnera une répartition entièrement homogène dans le béton. La structure de la surface des perles sera renforcée par leur propriété d'imperméabilisation, ce qui éliminera les risques de microbes et de germes. On aura moins besoin de perles pour alléger, d'où la consommation se verra réduite.(**Guezouli et Benaissa , 2005**)

D'où les perles de Polys-béto sont :

- Utilisable avec tous les types de ciment, et avec tous les types de granulats naturels
- Mixer avec des équipements traditionnels
- Le béton est homogène et est réalisé avec les mêmes règles qu'avec le béton traditionnel.
- Le béton transporté par camion est facile à pomper.
- Peu de perles de Polys-béto seront séparées par des micros bulle aériennes :
- Aucun alvéole ne sera rempli d'eau pour réduire la différence de densité entre le mélange "l'eau / ciment" et le polystyrène " d'où une résistance au feu MO et à la fumée FO ; au contact du feu les perles produiront moins de fumée que les perles normales non traitées.
- Moins d'eau contenue dans le béton
- Polys béton peut alléger tout type de béton de 3 à 80 % selon son taux d'incorporation.
- Résistance à la compression élevée.
- Polys Béto est économique parce que les petites quantités de Polys Béton sont suffisantes pour alléger le béton : les alvéoles du Polys Béton ne seront rempli ni d'eau ni de ciment,
- Aucun microbe ni germes n'est détecté, ainsi qu'aucune odeur.
- Durée courte de séchage pour le béton.
- Aucune corrosion des renforts d'acier.
- Retrait très faible.

I.5 Généralités sur les liants utilisés

I.5.1 Le ciment CPJ CEM II42.5

Le ciment portland compose est produit en broyant le clinker qui se compose essentiellement de silicate de calcium avec le gypse comme ajout constitué de différentes formes de sulfate de calcium (**Bahloul ,2010**).

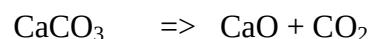
Le ciment portland composé est conforme à la norme AFNOR (NFP 15-301/94) et il dépasse considérablement les exigences de résistance de ces normes. Le ciment portland composé est généralement utilisé lorsqu'il n'y a pas de besoins spéciaux, dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment. Les principales applications de ce ciment sont: le secteur de construction en béton armé pour les bâtiments résidentiels, administratifs, les hôtels, le secteur de travaux publics pour les ponts, les revêtements des routes, les structures ferroviaires, les réservoirs et les tuyaux en béton et aussi pour le secteur industriel.

I.5.2 La chaux

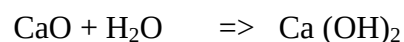
Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique. L'utilisation des produits à base de chaux et de calcaire remonte à la préhistoire. Utilisés depuis plus de 12 000 ans, il s'agit des plus anciens matériaux utilisés par l'humanité dans toutes sortes d'applications : en art et en architecture, dans les matériaux de construction, la préparation des aliments, les soins de toilette personnels, les produits chimiques industriels et bien plus. Aujourd'hui, les produits à base de chaux et de calcaire sont à la base de toute économie industrielle. Ces produits sont utilisés partout et représentent une composante de base importante dans l'industrie.

1.5.2.1 Cycle de la chaux

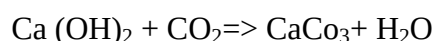
Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire à une température de 750 à 950°C pour former la chaux vive (oxyde de calcium CaO). Elle est exprimée par l'équation chimique suivante :



La chaux éteinte (Ca(OH)_2) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive, cette opération s'appelle extinction ou hydratation. Elle exprimée chimiquement par l'équation :



On peut remarquer que le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire. Cette réaction représente la première réaction de durcissement des mortiers historiques. L'équation chimique s'exprime par:



I.5.3 Les différences entre chaux et le ciment

La chaux est un liant minéral naturel extrait de roche sédimentaire utilisable après cuisson dont le durcissement est obtenu exclusivement avec l'air. Tandis que le ciment est un liant minéral artificiel utilisable après plusieurs cuissons et qui est constitué de plusieurs composants dont la prise est obtenue avec l'eau.

Dans le cas extrême, le mortier contenant uniquement du ciment est celui qui possède une forte résistance à la compression et un faible pouvoir de rétention d'eau. Un mur construit avec ce mortier est très solide mais peut permettre à la pluie de s'infiltrer. A l'autre extrême, le mortier de chaux a une faible résistance mécanique à la compression et un fort pouvoir de rétention d'eau. Un mur construit avec ce mortier aura une résistance mécanique inférieure, en particulier la résistance initiale, mais il devrait avoir une meilleure résistance à la pénétration de la pluie. Entre ces deux extrêmes, il existe diverses combinaisons de ciment et chaux capable de donner au mortier toute une gamme de propriétés intéressantes dues aux avantages de chaque liant, c'est-à-dire une forte résistance mécanique et une prise rapide (ciment) modifiées par une ouvrabilité et un pouvoir de rétention d'eau excellent (chaux) (Brahim et Djaid, 2012).

I.5.4 Avantages du mortier de ciment et de chaux

La chaux est un élément important des mortiers depuis plus de 2000 ans. Les caractéristiques de la chaux éteinte confèrent des avantages uniques pour les applications de maçonnerie, ce qui permet aux mortiers de ciment et de chaux de se distinguer des autres mortiers de maçonnerie. Parmi les principaux avantages on trouve (Brahim et Djaid, 2012)

I.5.4.1 Résistance d'adhérence en flexion

La chaux éteinte ont démontré des niveaux élevés de résistance d'adhérence en flexion. En plus de la résistance d'adhérence élevée, les mortiers de ciment et de chaux présentent les caractéristiques suivantes:

a) Résistance à la traction de l'adhérence

Il s'agit de la résistance du mortier qui retient les éléments de maçonnerie ensemble. Une résistance élevée à la traction de l'adhérence est obtenue grâce aux caractéristiques de mortier suivantes:

- La chaux fournit une rétention d'eau élevée qui permet un séchage initial maximal des matériaux cimentaires.
- L'écoulement initial élevé permet une couverture complète et aisée des éléments de maçonnerie.

- La faible teneur en air du mortier de ciment et de chaux augmente la résistance d'adhérence.

b) Durabilité de l'adhérence

Plusieurs études ont démontré que la résistance d'adhérence des mortiers de ciment est supérieure à celle des mortiers de chaux.

I.5.4.2 Résistance à la compression

Les mortiers de ciment et de chaux mélangés selon la spécification de proportion ont généralement une résistance à la compression suffisante pour satisfaire à la spécification de propriété supérieure (**Bahloul, 2010**).

L'identification des mélanges de mortiers de ciment et de chaux par proportion fournit une marge de sécurité quant à la résistance à la compression.

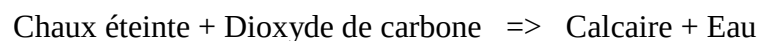
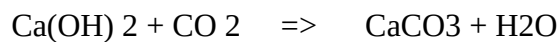
Lorsqu'une résistance élevée à la compression n'est pas désirée, on peut augmenter la teneur en chaux et utiliser la spécification de propriété.

Dans tous les cas, les niveaux de résistance à la compression des mortiers de ciment et de chaux sont ajustables et prévisibles.

La chaux éteinte améliore la résistance du mortier de plusieurs façons :

A) Carbonatation

La chaux éteinte réagit avec le dioxyde de carbone dans l'atmosphère pour former du calcaire.



B) Réactions cimentaires

L'effet pouzzolanique peut se produire entre la chaux éteinte et les composés de silice contenus dans le mélange de mortier.

C) PH

La chaux éteinte aide à conserver des niveaux élevés de pH dans le mélange de mortier. Ceci a pour effet de rendre les matières siliceuses plus solubles et plus réactives [**Rezzoug, 2016**].

chapitre II

caractérisation des matériaux et techniques expérimentales

II.1 Introduction

Etant donné que les caractéristiques physico-mécaniques des bétons sont étroitement liées à celles des différentes matières premières qui les composent, il est indispensable d'étudier les caractéristiques des différents matériaux utilisés afin de pouvoir convenablement interpréter les résultats obtenus par la suite.

La première partie est consacrée à la caractérisation des matières premières avec le procédé expérimentale et les résultats obtenus, puis on abordera les méthodes de caractérisation physico-mécaniques et thermiques des matériaux élaborés. Notant que tous les essais expérimentaux ont été menés au laboratoire de recherche de génie civil de l'université Ammar Thelidji Laghouat.

II.2 Caractérisation de la matière première

II.2.1 La chaux

La chaux utilisée est celle de la région de Saida ; c'est un chaux vive.

II.2.1.1 Masse volumique apparente et absolue NF P18- 558

C'est le rapport de la masse de l'échantillon sur son volume total apparent. Cet essai effectué à l'aide de récipient de 1L

$$\gamma_{app} = \frac{m}{V} \quad (II.1)$$

Où : m : est la masse de la chaux et V : volume apparent de la chaux.

La masse volumique absolue de la chaux est mesurée au moyen du densimètre Le Chatelier (Figure II.1).

$$\gamma_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (II.2)$$

Où :

M1: masse de (cellule + éthanol),

M2 : masse de (cellule + éthanol + chaux),

V 1: le volume initial du éthanol.

V 2: le volume final de éthanol.

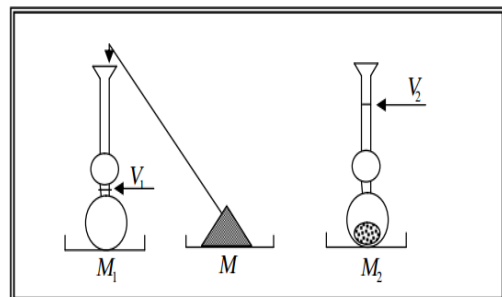


Figure II.1 : Dispositif Le Chatelier

II.2.1.2 Surface spécifique de Blaine EN 196- 3

Il s'agit de faire passer un volume connu d'air à travers une poudre de chaux. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées, la surface spécifique est proportionnelle à $t^{1/2}$.

L'appareil utilisé dans cet essai est appelé 'appareil Blaine'. Il est le même que celui utilisé pour le ciment.

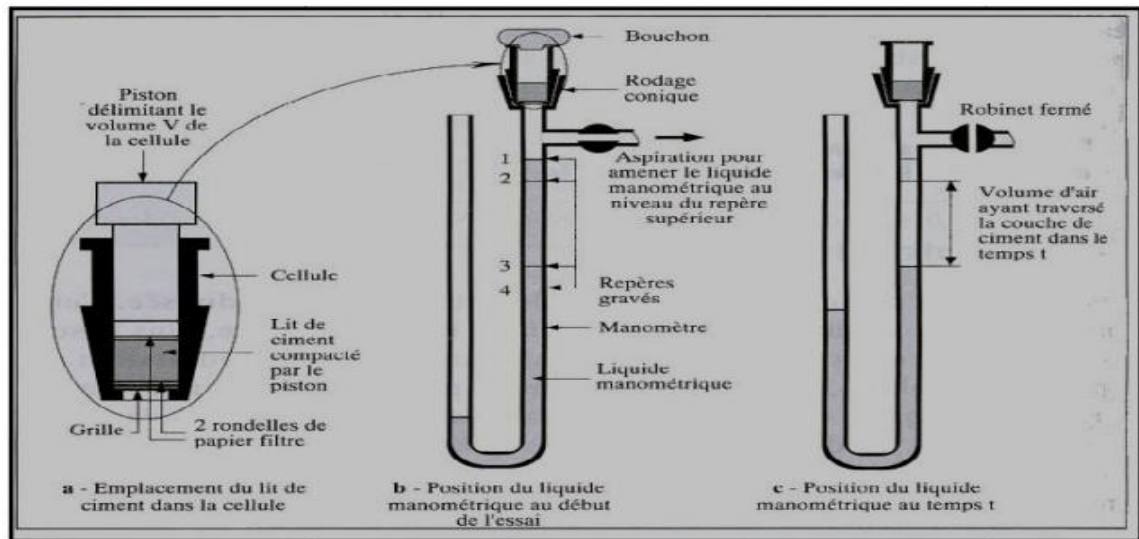


Figure II.2 : Dispositif expérimental du perméabilimètre Blaine[Rezzoug, 2016]

La surface spécifique est calculée à l'aide de l'expression :

$$Sp = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\gamma_{abs} (1-e) \sqrt{\eta}} \quad (II.3)$$

où :

Sp: surface spécifique

k : constante de l'appareil.

e : l'indice des vides de la couche tassée.

t : temps mesuré en secondes.

γ_{abs} : masse volumique des grains (g/cm^3).

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai (poises).

Sur le tableau II.1, nous regroupons les caractéristiques physiques de la chaux

Tableau II.1 : les résultats des essais de caractérisation de la chaux

Surface spécifique $S_p (cm^2/g)$	Masse volumique absolue $\gamma_{abs} (Kg/m^3)$	Masse volumique apparente $\gamma_{app} (Kg/m^3)$
12358	2690,98	702.03

II.2.1.3 Analyse chimique et minéralogique de la chaux

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saïda adonné les résultats récapitulés dans le tableau II.2

Tableau II.2 : Composition chimique de la chaux de Saida [Rezzoug, 2016].

Composition chimique	Chaux broyée (%)	Chaux hydratée (%)
Humidité	<5	
CaO	> 83.3	67.4 – 73.25
MgO	< 0.5	< 0.4
Fe ₂ O ₃	< 2	< 2
Al ₂ O ₃	< 1.5	< 1
SiO ₂	< 2.5	< 2.2
SO ₃	< 0.5	<1
K ₂ O + NaO	0.47 à 0.5	< 0.4
CO ₂	< 5	< 5
CaCO ₃	< 10	< 10
Ca(OH) ₂		< 80
Constante volumique	Bonne	Bonne
Insoluble	< 1	< 0.35

II.2.1.4 Préparation de la chaux éteinte

Nous avons suivis les procédures de préparation de la chaux éteinte suivantes :

- o Décharger la chaux dans une cuve métallique
- o Verser de l'eau et procéder au malaxage de celui-ci.
- o Garder- la pendant 24 heures pour arriver à une chaux éteinte.

Les blocs de chaux éteinte sont placés, ensuite, dans l'étuve durant 96 heures pour assurer le séchage de la chaux ; après ce temps nous procédons au broyage de ces blocs dans l'appareil de micro deval pour les réduire en poudre.

**Figure II.3 :** la poudre de la chaux après broyage

II.2.2 Sable dunaire

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier, il est inerte et sert à accroître la compacité du béton.

Les sables de dune en Algérie sont choisis pour des raisons de coût et de disponibilité, et il est bien connu que certains type de sables ne sont pas conformes aux exigences granulométriques puis qu'ils contiennent en général trop ou très peu d'éléments fins.

Les nombreuses utilisations du sable exigent de ce matériau qu'il soit d'une qualité fiable en fonction des destinations qui lui sont affectées (**Brahim et Djaid, 2012**).

Pour notre étude, on a utilisé le sable dunaire de la région Nord de la ville de Laghouat de classe granulaire 0/0.63 mm diamètre max.

II.2.2.1 Masse volumique absolue et apparente (NF P 18-555)

Elles sont exprimées en Kg/m^3 . La masse volumique **absolue** est la masse par unité de la matière qui constitue l'agrégat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

La masse volumique **apparente** est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V_{\text{app}}} \quad (\text{II. 4})$$

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_{\text{abs}}} \quad (\text{II. 5})$$

Les méthodes utilisées sont le récipient de 1l pour la masse volumique apparente et pour la masse volumique absolue on utilisera la méthode de pycnomètre. Il s'agit d'un récipient de 50 à

1000 cm^3 comportant un bouchon rodé muni d'un tube très fin sur lequel est gradué un trait de repère figure. II.4:

- Peser le pycnomètre vide : M_1 ,
- Introduire une prise d'essai à l'intérieur du pycnomètre, puis peser l'ensemble avec le bouchon : M_2 ,
- Le pycnomètre est ensuite rempli d'eau. Eliminer les bulles d'air et adapter le bouchon. Finir de remplir jusqu'au trait repère, vérifier que le niveau est stable, peser l'ensemble : M_3 ,
- Vider le pycnomètre, bien le nettoyer et le remplir d'eau jusqu'au repère du bouchon. Peser après vérification du niveau : M_4 ,

La masse volumique réelle du matériau est :

$$M_{vr} = \rho_w \cdot \frac{(M_2 - M_1)}{(M_4 + M_2 - M_1 - M_3)} \quad (\text{II.6})$$

Avec ρ_w masse volumique de l'eau prise égale à 1 kg/dm^3

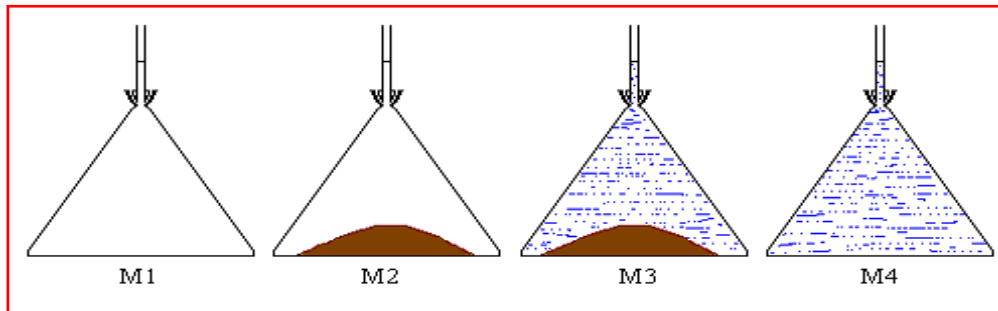


Figure II.4 : Pycnomètre pour mesure de la masse volumique absolue[Mazouz,2010]

Les résultats des masses volumiques obtenues sont regroupés sur le tableau suivant :

Tableau II.1 : les masses volumiques du sable dunaire

Sable	Absolue (γ_{abs})	Apparente (γ_{app})
Masse volumique (Kg/m ³)	2551.03	1510.66

II.2.2.2 L'équivalent de sable(AFNOR P 18-598)

L'essai d'équivalent de sable permet de mesurer la propreté d'un sable sur la fraction passant au tamis de 2 mm, et dont la proportion des éléments fins passant au tamis de 0.08 mm a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur si nécessaire, et d'en déterminer l'importance par une valeur numérique exprimant le rapport volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent (figure II.6).



Figure II. 2: Eprouvette de mesure de l'équivalent de sable

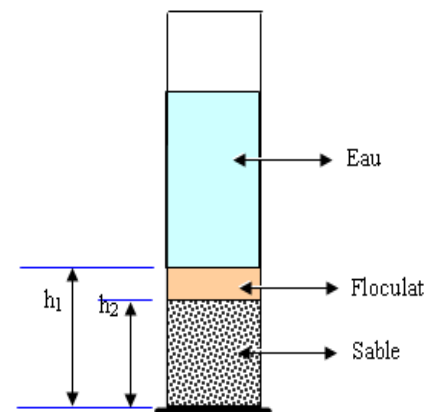


Figure II. 6 : Essai d'équivalent de sable

Cet essai est réalisé suivant la norme.

- Siphonner la solution lavante jusqu'au repère inférieur,
- Verser soigneusement à l'aide de l'entonnoir la quantité de sable voulue, correspondant à 120 g de sable sec,

- Frapper fortement la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour éliminer les bulles d'air,
- Laisser reposer 10 mn,
- A la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette puis la fixer sur la machine d'agitation. Faire subir à l'éprouvette 90 cycles en 30 secondes.
- Remettre l'éprouvette sur le plan de travail et laver le sable. Pour cela, descendre le tube laveur dans la masse du sable et faire remonter les particules fines.
- Sortir le tube laveur lorsque le niveau atteint le trait supérieur,
- Laisser reposer 20 mn en évitant toute vibration,
- Au bout des 20 minutes, mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculat au fond de l'éprouvette,
- Descendre doucement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat jusqu'à ce qu'il repose sur le sable.
- Bloquer le manchon coulissant .Mesurer h_2 entre la face supérieure du manchon et la face inférieure de la tête du piston,
- Arrondir ces hauteurs au millimètre le plus proche.
- Noter la température.

L'équivalent de du sable est donnée par la formule :

$$ES = (h_2/h_1) \cdot 100 \quad (II.7)$$

Pour qualifier le sable, on peut se baser sur les valeurs de ES du tableau suivant :

Tableau II.2 : La nature et qualité du sable

ES (Visuel)	ES (à piston)	Nature et qualité du sable
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : risque de retrait ou degonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < ES < 75	60 < ES < 70	Sable légèrement argileux : de propreté admissible pour les bétons de qualité courante, à moins de craindre particulièrement le retrait.
75 < ES < 85	70 < ES < 80	Sable propre : à faible pourcentage de fines argileuses, convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité (valeur optimale ES piston = 75; ES visuel = 80).
ES > 85	ES > 80	Sable très propre : l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II.3 : Valeurs de l'équivalent de sable du sable dunaire.

Equivalent du sable	ESv	ESp
Sable dunaire	89.622 > 85	80

D'après ce tableau, on constate que notre sable est un sable propre

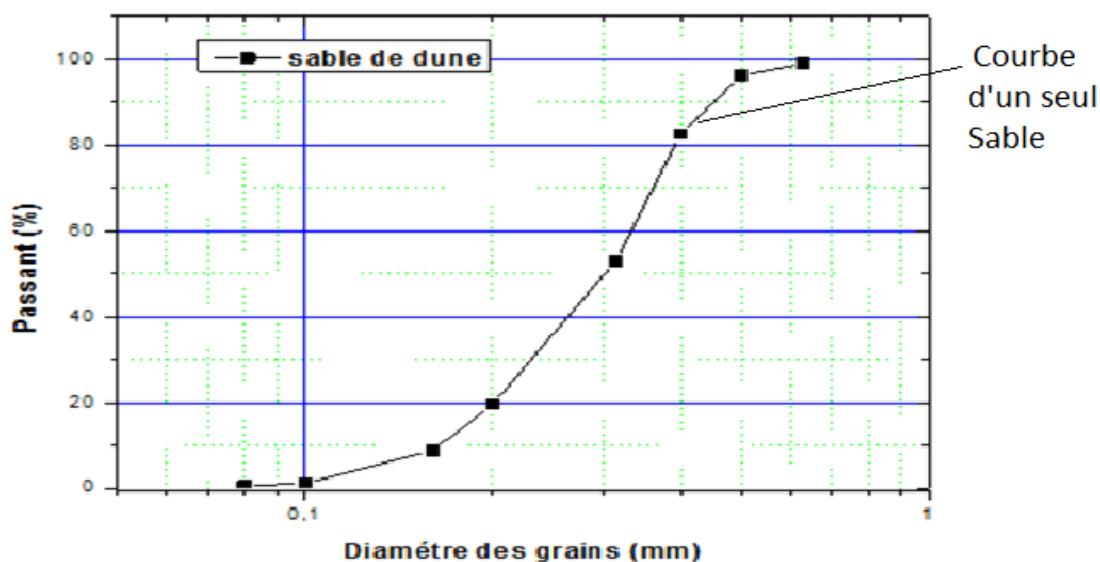
II.2.2.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus importants effectués dans l'étude de la composition du béton puisque la notion même de sable est basée sur un critère de taille des éléments. Selon la norme française **NFP18-560**, qui permet de déterminer les pourcentages en poids des grains ayant une dimension inférieure ou égale à un diamètre donné, cette répartition de grains de sable est traduite par les courbes.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés par les courbes granulométriques de la figure II.7. Avec un module de finesse **Mf** de **1,4**

$$M = \frac{\sum \text{des refus sur les tamis } (0.16; 0.315, 0.63)}{100} = 1.378 \quad (\text{II.8})$$

C'est un sable fin.

**Figure II.7 :** La courbe granulométrique de sable de dune

II.2.2.4 Caractérisation minéralogique et chimique du sable dunaire

Le diffractogramme de la figure II.8 obtenu par analyse minéralogique de ce sable, menée par rayons X au diffractomètre de l'UATL, confirme la présence du composant minéralogique de l'espèce SiO_2 (silice).

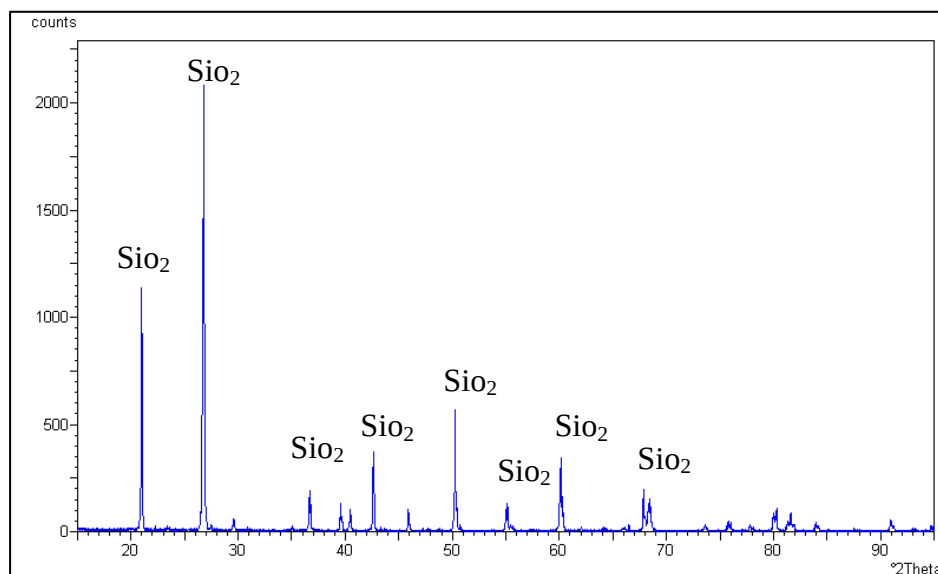


Figure II.8 : Diffractogramme aux rayons X du sable de dune[Belmechri,2012].

Les résultats ci-dessus montrent que le sable utilisé est de nature siliceuse, vu la dominance de la silice (SiO_2).

L'Analyse chimique du sable dunaire a donné les résultats suivants :

Tableau II.6: Analyse chimique du sable de dune [Mazouz, 2010].

Résidus insolubles (SiO) %	95,87
Teneur en sulfate (SO_3)%	0,91
Matières organiques MO%	-----
Teneur en chlorures %	0,36
Carbonate de Calcium CaCO_3 %	2.5

II.2.3 Le ciment

Un seul type de ciment a été employé dans l'ensemble des expérimentations, il s'agit d'un ciment CPJ CEM II/A 42.5 « mâtime » provenant de la cimenterie Hamame Dhala de Msila. C'est un ciment portland composé qui résulte de la mouture des clinkers, de constituants secondaires et de sulfate de calcium sous forme de gypse, conformément à la norme NA 442: 2000.



Figure II. 3 : ciment CPJ CEM II/A 42.5

II.2.3.1 Surface spécifique du ciment

La surface spécifique d'une poudre, ou dite encore la finesse de mouture est définie comme étant la surface exprimé en cm^2 d'un gramme de cette poudre. C'est une propriété physique importante des ciments, elle influe directement sur le comportement de la pâte.

Nous avons déterminé, la surface spécifique à l'aide de l'appareil de Blaine selon la norme ENV 196-6 comme indiqué ci-dessus.

II.2.3.2 Masses volumiques absolue et apparente du ciment (NF P 18-555)

Pour les liants on utilisera le volumènomètre de Le Chatelier (**ASTM C 188-72**), et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre (liant). Ce sera par exemple du tétrachlorure de carbone ou du benzène ou l'éthanol.

$$\rho_{ab} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (\text{II. 9})$$

L'essai est réalisé avec le même principe utilisé pour la chaux. Les résultats obtenus sont regroupés sur le tableau suivant

II.2.3.3 Diffractogramme de rayons X du ciment

Tableau II.7 : Résultats des essais de caractérisation du ciment

la surface spécifique S_p (cm^2/g)	Masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m^3)	Masse volumique absolue ρ_{abs} (kg/m^3)	Résistance à la compression (MPa) R_{C28}	Résistance à la flexion R_{f28} (MPa)
3424.0	1050.0	3061.22	43.47 ± 2.05	3.25 ± 0.96

L'analyse du ciment CPJ 42.5 effectuée par rayon X révèle la présence prépondérante de l'espèce CaCO_3 , CaO et FeO_3 , en plus de la présence de quelques traces d'espèces calciques et magnésiennes.

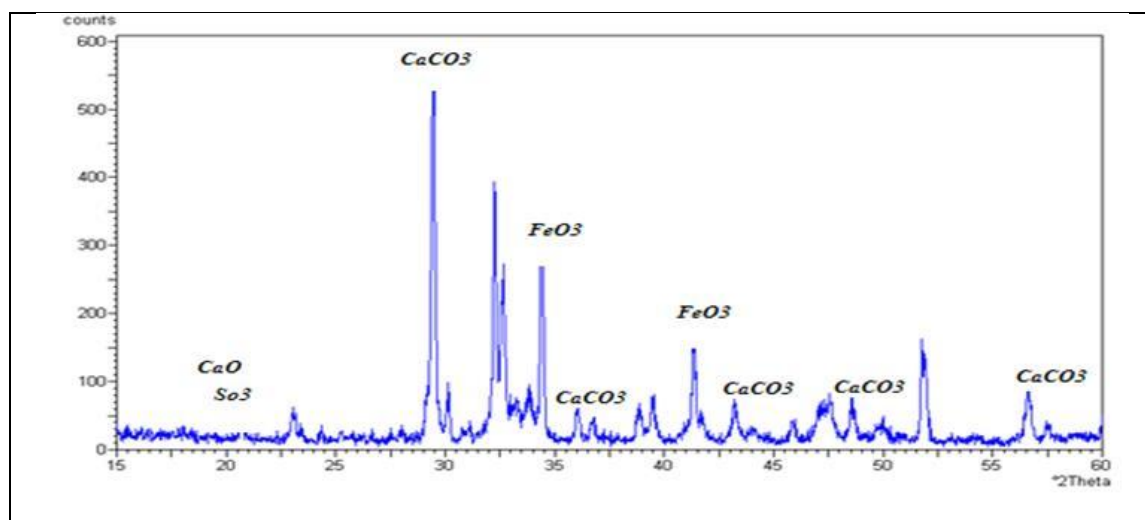


Figure II.4 : Diffractogramme du ciment [Brahim et Djaid, 2012]

II.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des substances qui pourraient avoir un effet négatif appréciable sur la qualité et la durabilité du mortier ou du béton. C'est pour cette raison là qu'on a effectué une analyse chimique sur l'eau utilisée. Celle utilisée dans tous les essais est l'eau courante des robinets du laboratoire de département de génie civil de Laghouat.

Tableau II.8 : Analyse chimique de l'eau utilisée [Damene, 2005]

Espèces chimique	Quantité (mg/l)
Ca^{+2}	119.04
Mg^{+2}	32.93
Na^{+2}	144.90
K^{+}	5.69
Cl^{-}	169.96
SO_4^{-2}	420
HCO_3^{-}	153.80
NO_3^{-}	11.07

II.2.5 Billes de polystyrène Polys-béto

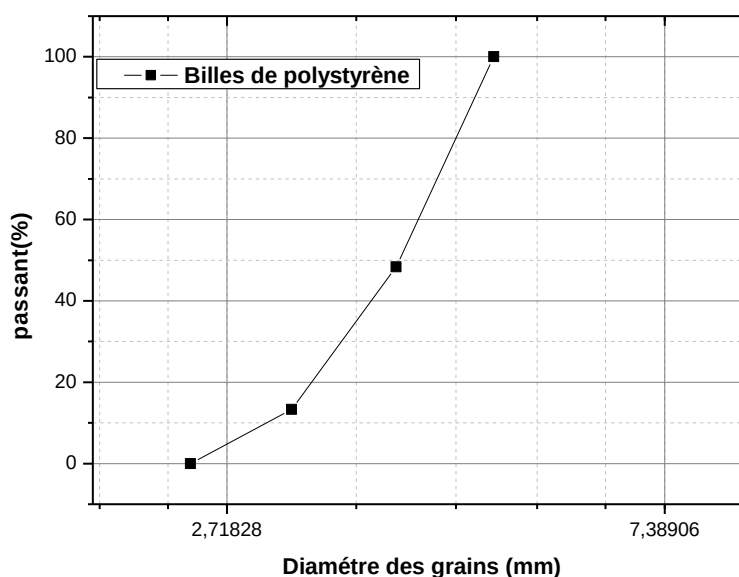
Le polystyrène utilisé dans la conception du **Polys béto** est produit à partir de **PSE**. Ces billes de polystyrène obtenues sont ensuite introduites dans un malaxeur de 10 m³ à axe horizontal afin d'être enrobées par les différents **adjuvants**, c'est alors qu'on obtient les billes de **POLYS BETO**(voir chapitre I).

Tableau II.9 : Caractéristiques des POLYS BETO

La granulométrie	Masse volumique apparente après traitement kg/m^3	Masse volumique absolue kg/m^3	Conductivité thermique $\text{W/m}^\circ\text{C}$
2,5 à 4 mm	22 à 25 [Mazouz,2010] 26,97 (mesurée par Ziregue B et Abah K)	33 [Mazouz,2010] 36,8 (mesurée par Ziregue B et Abah K)	0,045 [Mazouz,2010]

II.2.5.1 Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats de polys-béto sont illustrés sur la courbe granulométrique de la figure II. 11 ci- dessous

**Figure II.11:** Analyse granulométrique de billes de polystyrène

II.3 Essais expérimentales réalisés

II.3.1 Essais de maniabilité

La maniabilité a été mesurée suivant la norme **NFP18-452**[42], en utilisant un maniabilimètre à mortier LCL (type B) indiqué sur la figure II.12.

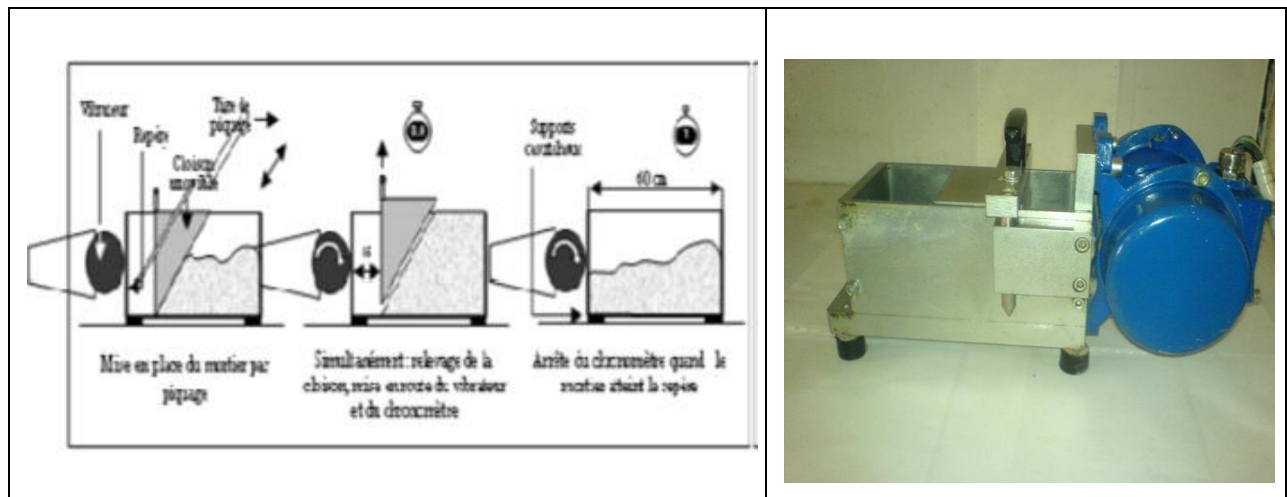


Figure II.12 Schémas du maniabilimètre type B

Le maniabilimètre B est un boîtier parallélépipédique métallique (18 cm x 9 cm x 9cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible. Celle-ci est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison en 4 couches piquées à raison de six coups à l'aide d'une tige de piquage qui doit être maintenue parallèlement à la paroi inclinée de la cloison. Après avoir arasé la surface à la règle, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur. Sous l'effet de la vibration, le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

II.3.2 Essai réalisé sur les bétons durcis

Pour bien suivre l'évolution des éprouvettes des mortiers au cours du temps, chaque éprouvette a fait l'objet d'un suivi régulier.

II.3.2.1 Masse volumique apparente

Par définition, la masse volumique apparente sèche ρ_{app} est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent sec V_t . Cette mesure permet de déterminer l'évolution de la masse volumique apparente de chaque composition pendant 40 jours. Les pesées sont effectuées à 0.1g près sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³. La masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de chaque composition.

II.3.2.2 Essai de retrait

L'étude de l'évolution de la variation de longueur des mortiers et des bétons est un moyen nécessaire qui permet de prévoir le comportement de ces matériaux vis-à-vis des conditions climatiques, car la durabilité de ces matériaux est compromise lorsque le matériau de construction de base a tendance à rétrécir au jeune âge. Si la variation relative de dimension est très grande, la durabilité par conséquent est affectée et on doit établir de nouvelles formulations afin d'optimiser le comportement du matériau vis-à-vis de l'apparition de fissures à cause du retrait, qui par conséquent, facilitent la pénétration des agents agressifs à travers ces fissures.

Au cours du séchage, les mortiers diminuent de volume. Une grande partie de cette diminution est due à la perte d'eau de gâchage lors du séchage. Ce phénomène est appelé retrait. Le retrait ne dépend pas seulement des conditions de conservation (humidité, température), il dépend aussi des constituants du mortier, par exemple l'augmentation du dosage de chaux augmente le retrait du mortier.

Les mesures de retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³ selon la norme NFP 15-433. On mesure la valeur du retrait avec un rétractomètre muni d'un comparateur digital.



Figure II.13: Appareillage de mesure du retrait.

Cette étude est basée sur les résultats donnés par l'essai de retrait sur des éprouvettes conservés à l'air libre

II.3.2.3 Essai de résistance mécanique

L'évolution de la résistance a été suivie au cours du temps, en faisant des essais de flexion et de compression.

Généralement les mortiers sont classés selon leurs résistances à 28 jours. Ces dernières sont souvent influencées par plusieurs facteurs entre autres le rapport eau/liant (E/L), le dosage et la classe de liant, la nature et les proportions des granulats, les conditions climatiques et de mise en œuvre. La mesure de la résistance se fait par les essais de flexion et de compression permettant de déterminer la contrainte de rupture de traction par flexion et la contrainte de rupture de compression du mortier calcaire.

II.3.2.3.1 Résistance à la traction

Cet essai est établi suivant la norme EN 196-1. Un dispositif à rouleau utilisé en flexion à 3 points, l'éprouvette prismatique $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée F_f .

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation suivante :

$$R_f = \frac{1.50 F_f l}{b^3} \quad (\text{II -10})$$

R_f : Résistance à la flexion en (MPa);

F_f : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion (N);

l : Longueur qui sépare les deux appuis en (mm);

b : Côté de l'éprouvette qui est égale à 40mm;

L : Longueur totale de l'éprouvette.

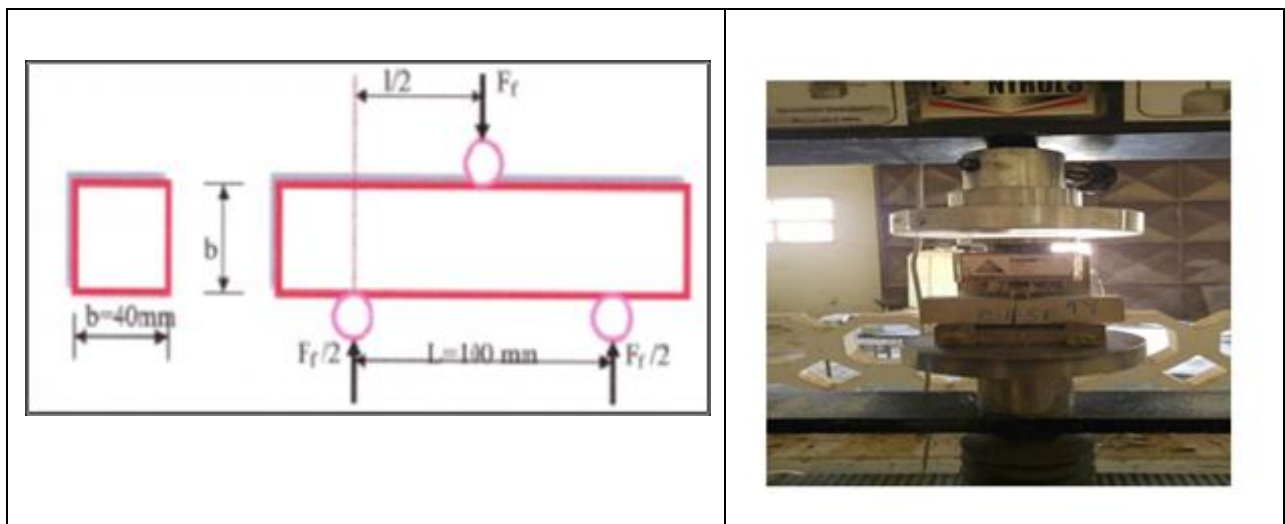


Figure II.14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (à 3 points).

II.3.2.3.2 Résistance à la compression

Cet essai est régi suivant la norme EN 196-1, exécuté avec une presse pour matériaux durs, sur les demi-échantillons provenant de l'essai précédent. Chaque demi-prisme est mis entre deux plaques de métal dur puis testé en compression sur ses faces latérales (de moulage) de section de

40x40mm². Le demi-prisme est placé entre-elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'environ 1cm. Le dispositif de cet essai est présenté par la figure II.15

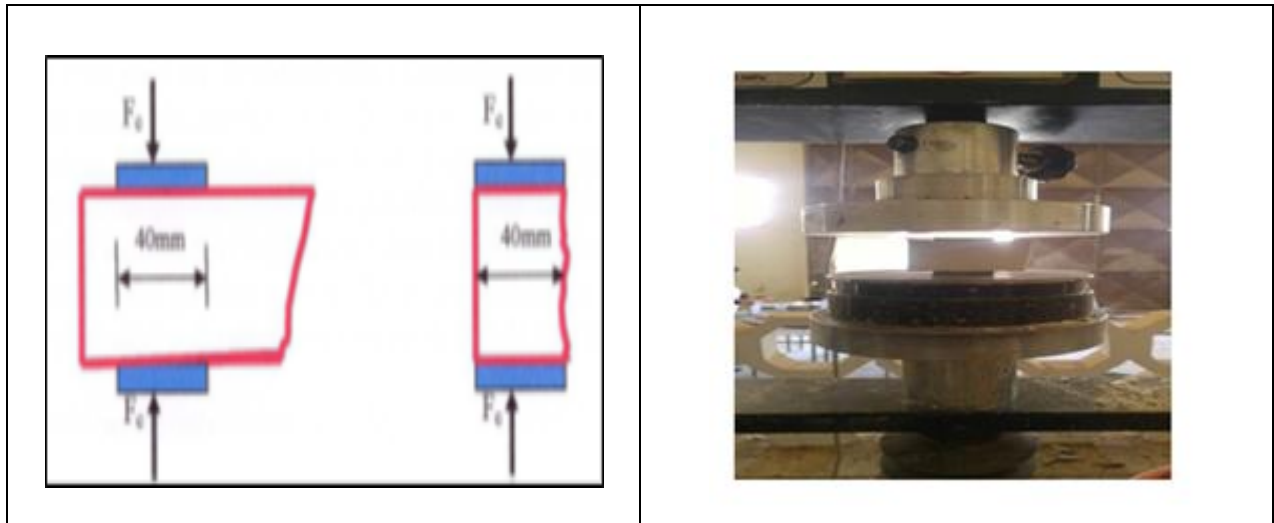


Figure II.15 : Dispositif de rupture en compression.

La résistance à la compression est calculée selon l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II-11})$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa);

F_c : Charge de rupture en (N);

b : Côté de l'éprouvette qui est égal à 40 mm.

II.3.2.4 Essais d'Absorption

Les phénomènes de transport, dont l'absorption d'eau par capillarité, s'avèrent être primordiaux vis à vis de la durabilité des mortiers à la chaux compte tenu de leur rapport eau /chaux élevé. La composition de ce genre de mortiers et du mode de leur cure sur le processus d'absorption d'eau peut influencer sur l'absorption de ces mortiers. Les mortiers à la chaux absorbent une quantité d'eau plus ou moins importante selon la nature du sable qu'ils contiennent et leur composition. Ils sont donc plus vulnérables à diverses agressions. L'essai d'absorption d'eau par capillarité est réalisé conformément à la norme **NFP 10-502**. Cet essai est effectué sur des éprouvettes de dimensions (4x4x16) cm³ séchées jusqu'à poids constant.

On pose les éprouvettes sur leurs bases 4x4cm², en les séparant d'au moins 1 cm du fond du récipient et on maintient le niveau d'eau constant. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une profondeur de 5 mm. Les surfaces latérales des éprouvettes sont imperméabilisées à l'aide de deux couches de verni pour avoir un écoulement uni directionnel. La base inférieure et

la base supérieure ne sont pas imperméabilisées pour permettre la montée de l'eau par capillarité et l'évacuation de l'air pendant l'essai. Les éprouvettes sont pesées à des intervalles de temps réguliers.

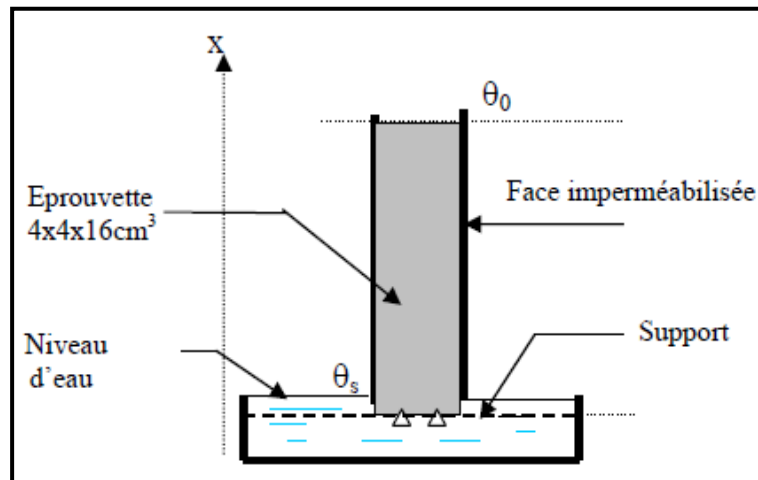


Figure II.16: Absorption d'eau par capillarité

$$i = S_w \sqrt{t} \quad (\text{II.12})$$

Où S_w est la sorptivité du matériau et i le volume d'eau absorbée par unité de surface.

II.3.2.5 Essais thermiques

Une meilleure connaissance des caractéristiques thermiques des matériaux mis en œuvre dans la construction, permettra une approche plus précise des échanges d'énergie qui s'établissent entre une ambiance extérieure naturelle et une ambiance intérieure contrôlée. La conductivité, la résistance thermique, et la chaleur massique sont les propriétés thermo-physiques les plus importantes à prendre en compte pour le choix d'un matériau d'isolation. Il est important de rappeler ici, que la conductivité thermique intervient en régime permanent, et que dans la plupart des cas, c'est la grandeur que l'on mesure, les deux autres s'obtenant par déduction. La diffusivité thermique « a » d'un matériau exprimé la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle exprime en (m^2/s). La conductivité thermique (λ) est une caractéristique propre à chaque matériau. Elle indique la quantité de chaleur qui se propage par $\text{W}/\text{m.K}$. Pour cette mesure il existe plusieurs méthodes d'essai, on a utilisé dans notre cas la méthode de hot disk.

Les caractéristiques thermiques des matériaux élaborés ont été déterminées à l'aide de l'analyseur thermique Hot Disk TPS développée par la société suédoise Hot Disk AB. Le Hot Disk est un dispositif de caractérisation thermique fonctionnant sur le principe de la Technologie TPS. Il effectue des mesures précises de conductivité, de diffusivité et de capacité thermique en

une seule manipulation : le Hot Disk Instrument idéal pour des mesures rapides et fiables de conductivité thermique et diffusivité thermique.

La méthode, régie par la Norme Internationale ISO 22007-2, est basée sur l'utilisation d'un capteur plan transitoire, dont l'adaptation est l'analyseur de conductivité thermique et diffusivité thermique Hot Disk. La sonde Hot Disk se compose d'un motif conducteur électrique qui se présente sous la forme d'une double spirale en Nickel sérigraphie sur des feuilles minces d'un matériau isolant (Kapton ou Mica).

Le principe de base du système est de fournir au matériau à caractériser une puissance constante pendant un temps défini via la **sonde Hot Disk** afin de générer une augmentation de température de un à plusieurs degrés. C'est également la sonde qui est utilisée pour mesurer l'élévation de température, grâce à l'enregistrement de la variation de sa résistance électrique via un pont de Wheastone très précis. La **sonde Hot Disk** est donc utilisée à la fois comme source de chaleur et comme capteur de température.

Pour effectuer une mesure de conductivité thermique ou diffusivité thermique, la sonde Hot Disk doit être placée entre deux échantillons du matériau à caractériser et une légère pression mécanique est appliquée sur l'ensemble, dans le but d'améliorer le contact mécanique entre les surfaces de la sonde et celles de l'échantillon diminuant ainsi l'effet des résistances thermiques de contact les paramètres thermiques sont ensuite calculés par un logiciel.

II.3.2.6 La Porosité totale

La porosité est une caractéristique très importante, elle influe sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons. C'est une des principales caractéristiques du matériau poreux.

La porosité de béton provient de celle de la matrice et celle du granulat, elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction des volumes des vides dans le matériau par rapport au volume total.

Connaissant la masse volumique ρ_{abs} du solide obtenue, le calcul de la porosité totale ε est immédiat si l'on connaît, de plus, la masse volumique apparente ρ_{app} de l'échantillon auquel on s'intéresse. En effet, on peut écrire:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad (\text{II.13})$$

chapitre III

matériaux élaborés et discussion des résultats

III.1 Introduction

L'objectif principal de notre recherche est l'élaboration d'un béton léger à base de billes de polystyrène traité appelés polys-béto et dont la matrice liante est composée d'un mélange de ciment et de chaux. Le travail expérimental vise l'étude de l'influence du type de liant sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du matériau composite élaboré. Pour cela on a choisi un pourcentage de billes de polystyrène fixé à 1% d'un composite de ciment, sable de dune, et billes de polystyrène (le rapport de billes BSP substitué dans le sable est égale à 1% par rapport au poids du sable) (**Belmechri, 2012**). Il s'agit d'étudier l'effet du rapport chaux/liant sur les différentes caractéristiques d'un composite à base de sable de dune allégé par les billes de polystyrène traité en faisant varier le dosage en chaux par rapport au poids de ciment avec des pourcentages de 0%, 25%, 50% et 100%, et la composition C/S à considérer est fixée à 2/3 selon la référence [**Damene Z et al 2014**].

III.2 Formulation du béton de référence sans les billes de polystyrène

Les études antérieures menées (**Damene et al, 2014 ; Belmechri, 2012 ; Souici, 2012 ; Benhassine, 2011**) sur les bétons légers à base de sable de dune ont montré l'importance du dosage en ciment dans l'amélioration de certaines propriétés surtout les résistances mécaniques, et de là notre choix s'est orienté vers la composition dont le rapport ciment /sable est égal à 2/3. Et afin d'obtenir un béton de référence qui sera témoin avant l'ajout des billes de polys-Béto ; nous allons poursuivre une optimisation à travers une variation du rapport E/L et la résistance caractéristique à 28 jours et d'en choisir une composition qui facilite la mise en moule tout en gardant une résistance adéquate. Le dosage en eau est déterminé sur des échantillons avec 0% de polys-béto, sachant que le polystyrène est un matériau dont l'absorption d'eau est pratiquement nulle selon (**Yamura et al., 1982**).

III.2.1 Etude de maniabilité

Pour varier le type de liant, nous avons choisi des dosages en chaux par rapport au liant de l'ordre de 0% , 25%, 50% et 100% et pour déterminer le rapport E/L qui procure une mise en moule facile et une bonne résistance, nous avons débuté par une optimisation d'E/L préliminaire qui va nous permettre de choisir un témoin pour chaque composition. Pour chaque composition, on a essayé de mesurer le temps d'écoulement à l'aide d'un maniabilimètre type B (**figure III.1**), et on a aussi déterminé la résistance à la compression à 28 jours des éprouvettes confectionnées pour chaque composition.



Figure III.1 Maniabilimetre type B

Les résultats du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L sont illustrés sur la **figure III.2** ci-dessous,

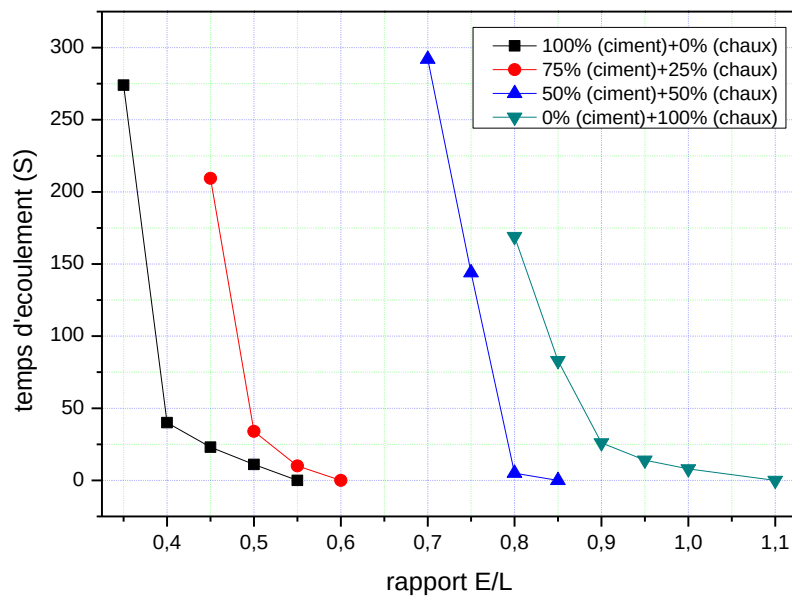


Figure III.2 Variation du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L

L'allure des courbes montrent que le temps d'écoulement diminue lorsque le rapport E/L augmente. D'autre part on peut remarquer que la substitution de la chaux dans le ciment fait augmenter le rapport E/L, cela est dû à la finesse de la chaux et à son pouvoir d'absorption d'eau.

Pour le choix de notre béton de référence en vue d'une tentative d'allègement par la suite, nous allons fixer un temps de maniabilité qui procure une bonne mise en œuvre en se référant à la norme de l'essai **NF P18-452** qui associe une bonne ouvrabilité à un temps compris entre 5 et 10 secondes.

Donc les valeurs de E/L pour les différentes compositions choisies sont comme suit :

Pour la composition (**100% ciment + 0% chaux**) => **E/L = 0,5**

Pour la composition (**75% ciment + 25% chaux**) => **E/L = 0,55**

Pour la composition (**50% ciment + 50% chaux**) => **E/L = 0,8**

Pour la composition (**100% ciment + 0% chaux**) => **E/L = 1**

Les résultats des compositions optimisées sont regroupés dans le tableau **III.1** suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques des bétons de sable de référence BSD (avant allègement)

Composition	Nomination	E/L en %	Temps d'écoulement en secondes	Masse volumique sèche en kg/m ³	Résistance à la compression à 28j en MPa
100% ciment + 0% chaux	BSD0	50	9	2139.84	45.02
75% ciment+25% chaux	BSD25	55	10	2086.05	13.667
50% ciment+50% chaux	BSD50	80	5	1904.80	4.068
0% ciment+100% chaux	BSD100	100	8	1613.35	1.328

III.3 Élaboration du béton de polys-béto (billes de polystyrène traité)

III.3.1 Formulation du béton de polys-béto

Après avoir fixé la quantité d'eau utilisable et déterminé la composition de référence de béton de sable, on procède à l'allègement du matériau par incorporation dans la matrice des granulats de polystyrène traité en forme de billes.

Les dosages pondéraux en granulats PSE du béton de polystyrène sont déterminés par rapport au poids du sable utilisé. Un dosage de 1% est fixé pour toutes les compositions (**Ziregue, 2005; Belmechri, 2012 ; Souici, 2012**). Les compositions sont réalisées à des pourcentages en chaux de **0%**, **25%**, **50%** et **100%** par rapport au ciment. Les différentes compositions seront noté dans tout ce qui suit par :

BSD0 : Béton de sable dunaire non allégé à matrice cimentaire

BSDP0 : Béton de sable dunaire allégé par le polystyrène à **0%** de chaux.

BSDP25 : Béton de sable dunaire allégé par le polystyrène à **25%** de chaux.

BSDP50 : Béton de sable dunaire allégé par le polystyrène à **50%** de chaux.

BSDP100 : Béton de sable dunaire allégé par le polystyrène à **100%** de chaux.

Les différentes compositions sont représentées dans le tableau **III.2**

Tableau III.2 : Composition des bétons de polystyrène traité (polys-béto)

Compositions	Sable/liant	E/L	Polystyrène	Liant	
Nomination	(g)	(%)	(%)	Ciment (%)	Chaux (%)
BSDP0	3/2	50	1	100	0
BSDP25	3/2	55	1	75	25
BSDP50	3/2	80	1	50	50
BSDP100	3/2	100	1	0	100

III.3.2 Mode de malaxage et préparation des éprouvettes

III.3.2.1 Malaxage

Afin d'éviter le problème de ségrégation en raison de la légèreté des granulats. On a essayé d'introduire les différents constituants dans le malaxeur comme suit :

Le sable et le liant sont introduits en premier dans la bétonnière, le malaxage dure pendant deux minutes. On introduit ensuite les $\frac{3}{4}$ de la quantité d'eau nécessaire et le malaxage continu pendant une minute. Les granulats sont introduits graduellement pendant que le malaxage continue pendant une autre minute. Enfin on ajoute la quantité d'eau restante et on laisse la bétonnière tourner pendant une dernière minute.

III.3.2.2 Préparation des éprouvettes

Le choix des dimensions du moule est fixé par la norme **NF P.18-400**. Il doit satisfaire le critère de l'échelle de volume représentatif stipulant que la plus petite dimension du moule doit être largement supérieure à la dimension du plus gros granulats, de plus les dimensions permettent de réaliser les essais de caractérisation recherchés. Pour la caractérisation physico-mécaniques des bétons élaborés dans ce travail, le choix de moules de dimensions **4x4x16 cm³** pour les bétons témoin (100% ciment) et les autres bétons conviennent largement pour effectuer les essais de caractérisation.

La mise en moule est faite sans vibration à raison de 3 couches piquées à la truelle chacune pour éviter tout problème de ségrégation affectant l'homogénéisation des échantillons. Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'air libre du laboratoire en les couvrant d'une toile en plastique. Au bout de 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans la chambre de conservation (**HR= 95% et T=20°C**), à l'exception des éprouvettes destinées aux essais de retrait qui sont restées dans l'ambiance du laboratoire sous une humidité relative **HR=45±5 %** et une température de **20±5°C**.

III.4 Étude des propriétés du béton de polys-béto élaboré

Les principaux essais effectués sur le béton polys-béto durci pour les différentes compositions variant le dosage en chaux sont :

- Evolution du retrait.
- Mesure de la masse volumique ρ
- Mesure de la résistance à la traction R_t
- Mesure de la résistance à la compression R_c
- Mesure de la sorptivité S_w
- Mesure de la porosité totale ε
- Mesure des caractéristiques thermiques λ et a .

III.4.1 Etude du retrait

Le béton possède une structure extrêmement complexe, formée de matériaux de natures minéralogiques différentes et d'une phase liquide dont l'influence est importante. Lorsque l'on observe une pièce de béton aussitôt après gâchage, on constate qu'en l'absence de toute force extérieure, elle change de volume, cette propriété qui a pris le nom de retrait est très souvent à l'origine des fissures que l'on trouve fréquemment dans presque tous les types d'ouvrages en béton. Ces fissures de retrait sont provoquées par la contraction du béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés. La diminution de volume provoque des contraintes internes de traction qui peuvent être à l'origine des fissures de la pâte.

Les mesures de retrait sont effectuées selon la norme **NFP 15-433**. Les mesures de retrait des différentes éprouvettes sont effectuées dès le premier jour, au moment du démoulage. Les éprouvettes sont conservées dans l'ambiance du laboratoire à une humidité relative **HR=45±5 %** et une température de **20±5°C**. Chaque jour trois éprouvettes sont testées et chaque mesure de retrait correspond à la moyenne des valeurs relevées sur ces dernières et ceci pendant 40 jours.

Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite.

Pour les différentes compositions confectionnées, les valeurs de retraits obtenues sont représentées par les courbes de la figure III.3 :

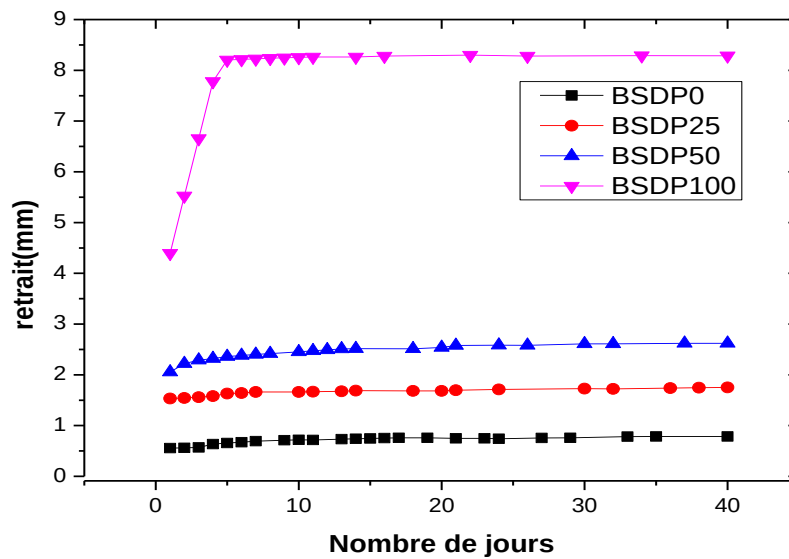


Figure III.3 Evolution du retrait en fonction de l'âge des BSDP.

En se référant à cette figure III.3, nous remarquons que le retrait des polys-béto élaborés augmente avec l'âge des éprouvettes. Cette augmentation est beaucoup plus accentuée au cours des premiers jours et haut delà de 30 jours le retrait est pratiquement constant cela est observé pour tous les types de bétons (**Neville, 2000**)

D'autre part le béton témoin **BSDP0** (100% ciment) présente le retrait le plus faible par rapport aux autres bétons. L'effet de l'augmentation du dosage en chaux est très remarquable, en effet l'augmentation du dosage en chaux fait augmenter le retrait cela est dû à sa finesse élevée par rapport à celle du ciment et d'autre par les mortiers de chaux demandent plus d'eau que ceux du ciment et par conséquent le phénomène d'évaporation est plus important d'où leur retrait important **BSDP100**.

La consommation de l'eau par l'action d'hydratation, principal facteur de retrait, dépend de la taille des pores et du degré d'interconnexion du réseau poreux **EN V 197-1, 1996**.

III.4.2 Mesure de la masse volumique apparente

La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes. Elle est définie comme étant le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent à l'état sec. On a mesuré la masse volumique apparente de chaque composition pendant 40 jours. Les résultats de mesure et de l'évolution de la masse volumique sont représentés sur la figure III.4 ci-dessous.

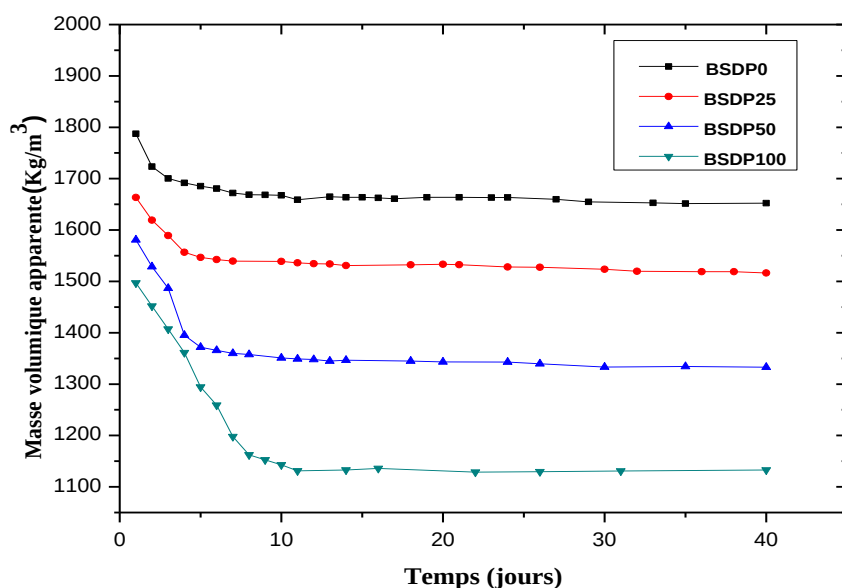


Figure III.4 : Variation de la masse volumique en fonction du temps (jours) des BSDP.

La figure III.4 représente la masse volumique apparente en fonction de l'âge du béton et selon le dosage en chaux. Afin d'étudier l'influence de la chaux sur la masse volumique apparente, on prend la première mesure après le démoulage c'est-à-dire 1 jour, on constate que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage en chaux augmente ceci est dû à la densité légère de la chaux par rapport à celle du ciment. La masse volumique apparente diminue en fonction du temps (nombre des jours) jusqu'à l'âge de presque 28 jours ou elle se stabilise, ceci est à cause de l'évaporation de l'eau contenue dans la matrice.

Le taux de diminution des masses volumiques enregistrées à 28 jours est résumé dans le tableau ci-dessous pour toutes les compositions des bétons élaborés.

Tableau III.3 : Taux de réduction de la masse volumique des différentes compositions.

ρ en Kg/m ³ Avant allègement	ρ en Kg/m ³ Après allègement	Taux de réduction en % de la masse volumique	Taux d'allègement en % par rapport au BSDP0
BSD0 (2139.84)	BSDP0 (1660.16)	22.42	
BSD25 (2086.05)	BSDP25 (1521.48)	27.07	8.35
BSD50 (1904.80)	BSDP50 (1316.01)	30.91	20.73
BSD100 (1613.35)	BSDP100 (1112.89)	31.02	32.96

Il est bien clair que l'effet de l'ajout de billes de polystyrène ainsi que la substitution de la chaux dans le ciment réduisent la densité des bétons confectionnés.

III.4.3 Mesure de la résistance à la traction

L'essai est mené conformément à la norme européenne **EN 196-1**, comme s'est expliqué au chapitre 2. Les résultats de la résistance à la traction à 28j des bétons élaborés sont illustrés dans la Figure III.5 ci-dessous.

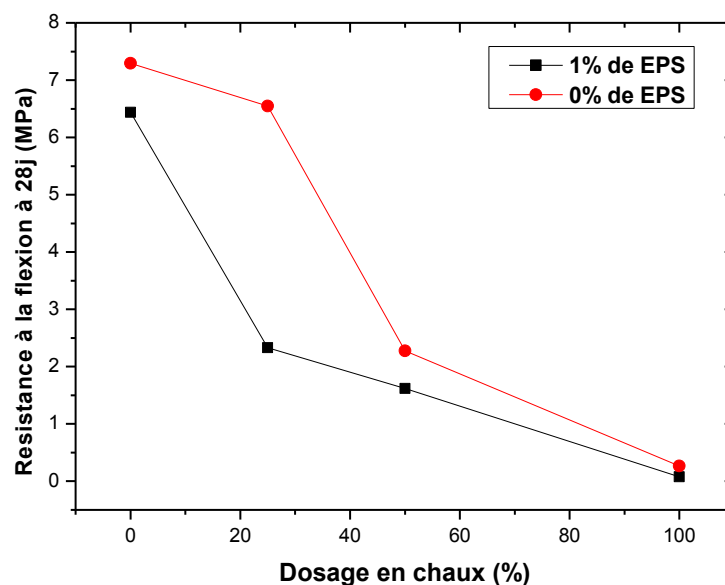


Figure III.5 Variation de la résistance en fonction du dosage en chaux

On remarque d'après cette figure, que la résistance à la traction diminue en fonction de la teneur en chaux comme l'indique le taux de réduction sur le tableau III.3 ci-dessous. Selon l'allure des courbes, l'ajout de billes de polystyrène a aussi diminué la résistance à la traction quel que soit le pourcentage de la chaux.

Nous pouvons résumer les résultats de la résistance à la traction ainsi que le taux de réduction dans le tableau **III.3** pour toutes les compositions.

Tableau III.4 : Valeurs des résistances à la traction des BSDP et des taux de décroissance.

% en chaux	Rt(0% de polystyrène) Avant allègement des BSD	Rt (1% de polystyrène) Après allègement des BSDP	Taux de diminution de résistance BSD0	Taux de diminution de résistance BSDP0
0	7.30 MPa	6.43 MPa		
25	6.55 MPa	2.33 MPa	10.27%	63.76 %
50	2.27 MPa	1.62 MPa	68.90%	74.81 %
100	0.27 MPa	0.08 MPa	96.30 %	98.75 %

III.4.4 Mesure de la résistance à la compression

Les morceaux obtenus des éprouvettes rompues en traction par flexion 03 points, sont ensuite écrasés en compression, suivant la norme **EN 196-1** (voir chapitre 2).

Les résultats de la résistance à la compression à 28j des bétons élaborés en fonction du dosage en chaux sont illustrés dans la figure III.6, et sur le tableau III.4, on résume les taux de décroissance de la résistance à la compression vis-à-vis de l'ajout des billes et par rapport à la teneur en chaux des différentes compositions BSD et BSDP.

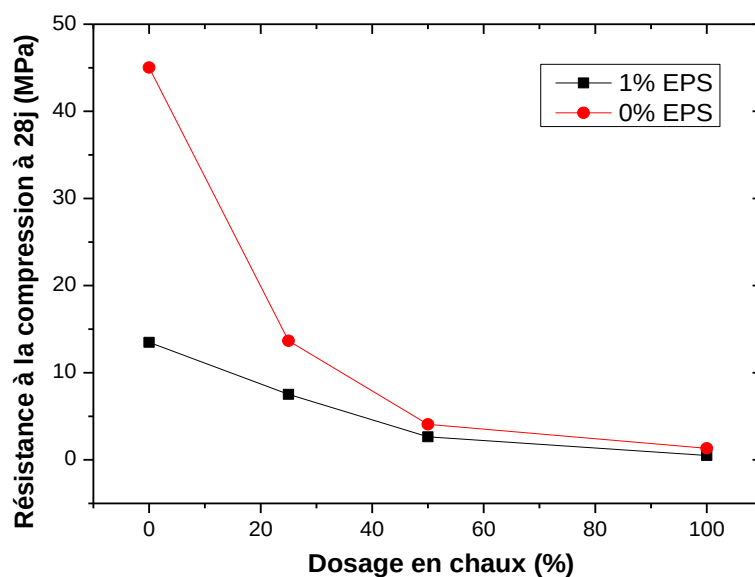


Figure III.6 : Variation de la résistance à la compression des BSD et BSDP.

Tableau III.5 : Valeurs des résistances à la compression des BSDP et des taux de décroissance.

% en chaux	Résistance à la compression des BSD0 Rc (MPa)	Résistance à la compression des BSDP Rc (MPa)	Taux(%) de réduction de Rc	Taux (%) de diminution de résistance/ BSD0	Taux(%) de diminution de résistance/ BSDP0
0	45.02	13.48	70		
25	13,67	7.51	45	69.63	44,3
50	4.07	2.65	35	90.95	80.34
100	1.33	0.49	63	97.05	96.36

On remarque d'après ces résultats, que la résistance à la compression diminue en fonction de la teneur en chaux du fait de la faible classe de résistance de la chaux par rapport à celle du ciment. L'ajout de billes de polystyrène diminue la résistance quel que soit le pourcentage de la chaux cela est dû au fait qu'on substitue une quantité rigide et résistante qui est le sable par une

même quantité de polystyrène plus mole et moins résistante qui est le polystyrène cette diminution est observée pour tous les types de bétons de granulats légers en particulier les bétons de sable allèges comme c'est confirmé dans la littérature (**Belmechri, 2012 ; Ziregue, 2005**).

Pour les BSDP la décroissance de résistance sous l'effet de l'augmentation du dosage en chaux est moins importante que les BSD c'est l'avantage des billes EPS.

III.4.5 Mesure de la sorptivité S_w

L'absorption capillaire est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Sa mesure est un outil de caractérisation macroscopique de son réseau poreux. C'est un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des mortiers, car un grand nombre d'agressions telles que la carbonatation, l'attaque des sulfates et des acides, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du mortier est faible. L'essai d'absorption d'eau par capillarité est réalisé conformément à la norme **NFP 10-502**. Cet essai est effectué sur des éprouvette de dimension $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ séchées jusqu'à poids constant (voir chapitre 2).

La figure III.7 ci-dessous représente la masse d'eau absorbée en fonction de racine carré de temps, et la sorptivité $S_w(\text{mm.mn}^{-0.5})$ des BSDP en fonction du dosage en chaux. Les mesures sont effectuées sur trois éprouvettes pour chaque composition, la valeur représentée sur la figure est la moyenne des trois valeurs.

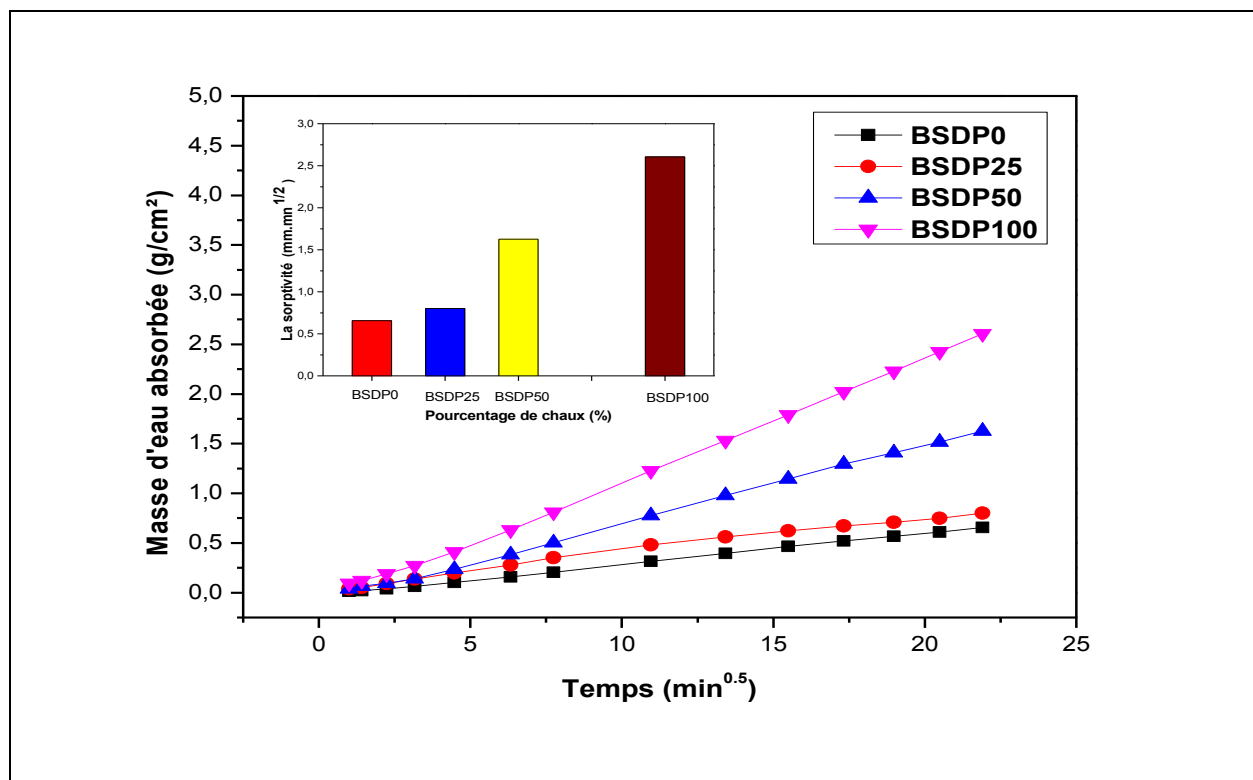


Figure III.7 : Evolution de la masse absorbée par unité de surface en fonction de la racine carré du temps et sorptivité en fonction du dosage en chaux

On remarque que pour toutes les compositions, l'absorption capillaire augmente au cours du temps, cette évolution est très rapide pendant les premières heures, puis elle tend à se stabiliser. Les résultats obtenus montrent aussi que l'absorption capillaire évolue avec l'augmentation du rapport chaux/ciment.

Les résultats de la sorptivité sont regroupés dans le tableau III.5 suivant :

Tableau III.6 : Valeurs de la sorptivité $S_w(\text{mm.mn}^{-0.5})$ des BSDP

Compositions	Densité en Kg/m^3	$S_w(\text{mm.mn}^{-0.5})$
BSDP0	1660.16	0.657
BSDP25	1521.48	0.801
BSDP50	1316.01	1.627
BSDP100	1112.89	2.606

Les éprouvettes de BSDP100 montrent une sorptivité supérieure par rapport à celle du BSDP0, du BSDP25 et du BSDP50. Cela est expliqué par le fait que plus le dosage en chaux est grand plus le réseau des pores capillaires est grand et plus l'absorption capillaires est importante.

Les résultats obtenus sont proportionnels aux valeurs des densités et en concordance avec la littérature (voir tableau ci-dessous)

Tableau III.7: Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité

Matériau	Densité	Sorptivité ($\text{mm.mn}^{-1/2}$)
Béton élaboré BPSE	1270-1890	0.414 - 0.295
Béton cellulaire autoclavé (Purzak J et al. 1992)	0.390	0.287
	0.500	0.465
	0.650	0.503
Brique argileuse (Purzak J et al. 1992)	1.700	1.239
Béton (Purzak J et al. 1992)	2.300	0.929
Plâtre (Christopher et al. 1993)	1.390	1.549
	1.430	1.510
Béton de ciment - 100% Clinker - 0% Calcaire - 80% Clinker - 20% Calcaire (Tsivilis S et al. 2000)	2.400	0.237
	2.394	0.220
Béton argileux cellulaire (Goual., 2000)	1.038	1.835
	0.953	1.673
	0.843	1.456
Béton argileux à base de copeaux de bois (Bouguerra et al, 1997)	1.28 (sans bois)	1.398
	0.82 (30% de bois)	0.918
Béton (Miniotaité, 2004)	2.18	1.66
Brique de céramique (Miniotaité, 2004)	1.91	0.62
Bois de pin (Miniotaité, 2004)	0.385	0.090

III.4.6 Mesure des caractéristiques thermiques

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existant dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels: la conductivité thermique λ et la diffusivité α . Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et de son état hydrique.

La conductivité thermique λ des matériaux est la propriété le plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants (CEREZO, 2005). Elle renseigne sur le pouvoir d'isolation thermique d'un matériau donné. En effet, elle mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle varie avec la masse volumique du matériau.

Quant à la diffusivité « α », c'est une propriété spécifique des matériaux caractérisant la conduction de chaleur non constante. Cette valeur décrit comment un matériau réagit rapidement à un changement en température. Elle représente, pour un matériau, la possibilité de transmettre de la chaleur. Plus elle est faible, plus le matériau est apprécié comme isolant.

La technique de mesure que nous avons utilisé pour déterminer la conductivité thermique est la méthode dite de hot disk dont la démarche expérimentale est détaillée et décrite au chapitre II. Chaque résultat représente la moyenne de trois mesures effectuées sur chaque échantillon.

Les valeurs des conductivités thermiques λ et de la diffusivité α à l'état sec et à l'état saturé, des différents teneurs en chaux obtenues avec la méthode du Hot Disk, sont reportées dans le tableau III.8

Nous présentons d'abord l'influence de polystyrène sur l'isolation thermique d'après les résultats des essais thermique d'un béton témoin BSD0 avec un béton BSDP0, par la suite nous étudierons l'influence des différents pourcentages de chaux sur les caractéristiques thermiques.

Tableau III.8: Valeurs des caractéristiques thermiques λ W/(m.k) et α mm²/s des BSDP.

Teneur en PSE (%)	Teneur en chaux (%)	la conductivité thermique λ W/(m.k) à l'état sec	la conductivité thermique λ W/(m.k) à l'état saturé
1	0	1.0765	2.0422
1	25	0.7118	1.767
1	50	0.684	1.638
1	100	0.485	Non mesurable

On constate que la conductivité thermique diminue avec l'ajout des Billes de polystyrène dans la matrice. Les propriétés thermiques des bétons de polystyrène sont liées à leurs masses volumiques, Autrement dit, plus la masse volumique diminue plus la conductivité thermique diminue c'est-à-dire, les capacités d'isolation thermique sont meilleures. Cette diminution revient à l'ajout des billes de polystyrène (granulats légers) de faible conductivité dans la matrice. Cette diminution de la conductivité thermique entre BSDP et BSD est de l'ordre de 16% pour le BSDP0, comme s'est montré sur la figure III.8 ci-dessous.

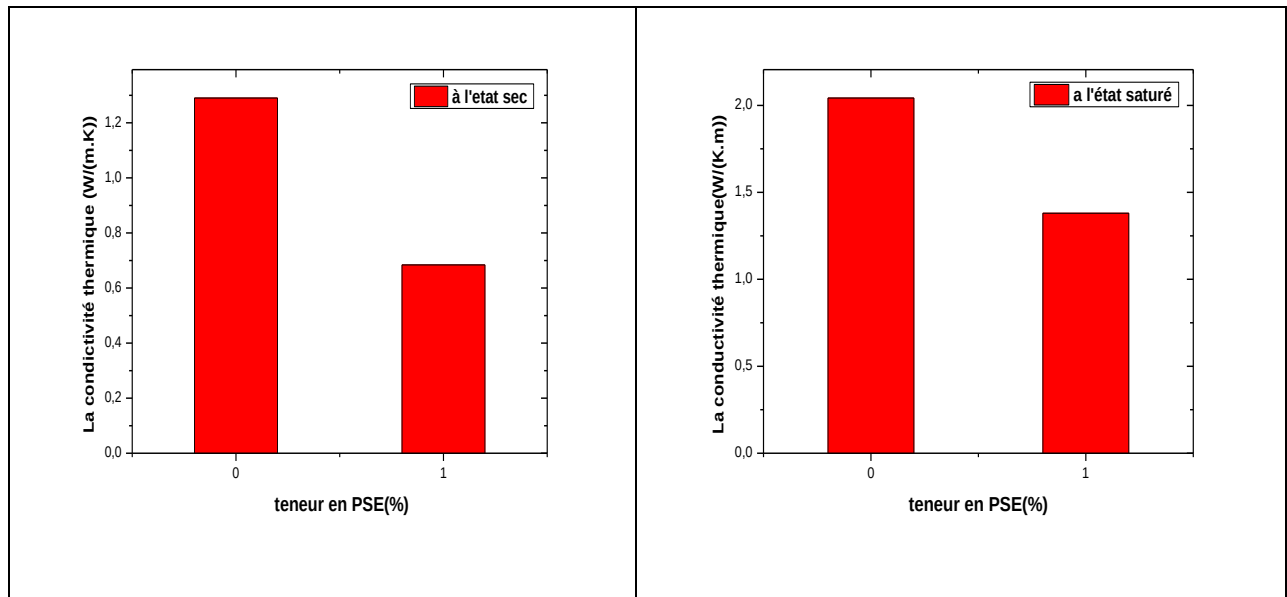


Figure III.8 : Conductivité thermique des BSD0 et BSDP0.

L'effet de la chaux sur les caractéristiques thermiques est illustré par la figure III.9

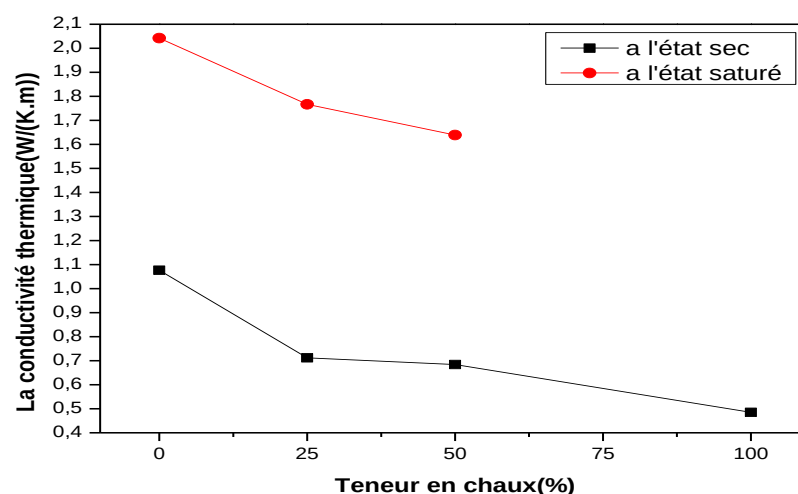


Figure III.9 Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en chaux

La figure III.9 représente les résultats de la conductivité thermique en fonction de teneur en chaux à l'état sec et à l'état saturé. On remarque que lorsque la teneur en chaux augmente de 0 à 100% ; la conductivité thermique du matériau diminue. À l'état sec, elle passe de **1.0765 W/m.k** pour le BSDP0 jusqu'à **0.7118 W/K.m** pour le BSDP25 avec un taux de diminution de 34% puis elle descend à **0.684 W/K.m** pour le BSDP50 avec un taux de diminution de 36% et enfin arrive à sa plus faible valeur de **0.485 W/K.m** avec un taux de diminution de 55%. À travers ces valeurs nous pouvons voir clairement l'effet remarquable de la chaux sur le pouvoir isolant du béton élaboré. La conductivité thermique est réduite de 55% sachant que le matériau obtenu a de bonnes caractéristiques thermiques pour ($\lambda < 0.75 \text{ w/(k.m)}$) selon les recommandations de la RILEM. De même, pour l'état saturé, on remarque que lorsque la teneur en chaux augmente de 0 à 100% ; la conductivité thermique du matériau décroît, la conductivité à 0% de chaux est de **2.0422 W/(m.k)** après elle diminue jusqu'à **1.767 W/(K.m)** à 25% de chaux, puis elle continue de diminuer jusqu'à **1.638 W/(K.m)** à 50% de chaux ce qui signifie l'amélioration de l'isolation thermique avec l'augmentation de pourcentage de chaux et pour 100% chaux l'échantillon se dégrade dans l'eau et on ne peut rien mesurer.

III.4.7 Variation de la porosité des bétons élaborés en fonction du dosage en granulats

Les résultats des essais de la porosité totale sont illustrés dans la figure suivante :

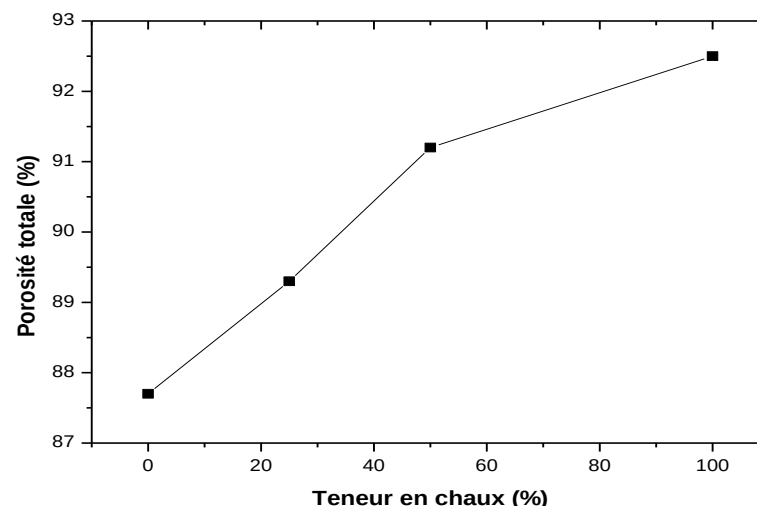


Figure III.10 Variation de la porosité totale en Fonction du dosage en chaux

Les résultats de la variation de la porosité totale en fonction du pourcentage de chaux pour les différentes compositions de bétons allégés par 1% de polys-béto sont représentés dans la figure III.10. Cette figure montre que la porosité totale augmente en fonction du dosage en chaux. Cette augmentation est due à cela est dû à la grande finesse de la chaux.

III. 5 Synthèse des résultats

En regroupant les résultats obtenus des propriétés des bétons de polystyrène traité BSDP (polys-béto) élaborés avec le sable de dune nous pouvant classer nos matériaux selon la classification des RILEM (1970) (**Kass. et Compbell, 1972**) du tableau I.6 dans le chapitre I.

Tableau III.9 : Résultats des caractéristiques importantes des BSDP réalisés

caractéristiques	BSD	BSDP 0	BSDP 25	BSDP 50	BSDP 100	BSDP (Souici, 2012)	BSDP (Belmech eri,2012)
Densité sèche ρ (Kg/m ³)	2139.8	1660.2	1521.5	1316.0	1112.9	1150	1540
Résistance à la compression R_{c28} (MPa)	45.02	13.48	7.51	2.65	0.49	5,19	13,97
Conductivité thermique λ (w/k.m)	1.71	1.0765	0.7118	0.684	0.485	0,378	0.74
Sorptivité Sw (mm.mm ^{-0.5})	-	0.657	0.801	1.627	2.606	0,031	0.427
Classe		I	II	III	III	II	II

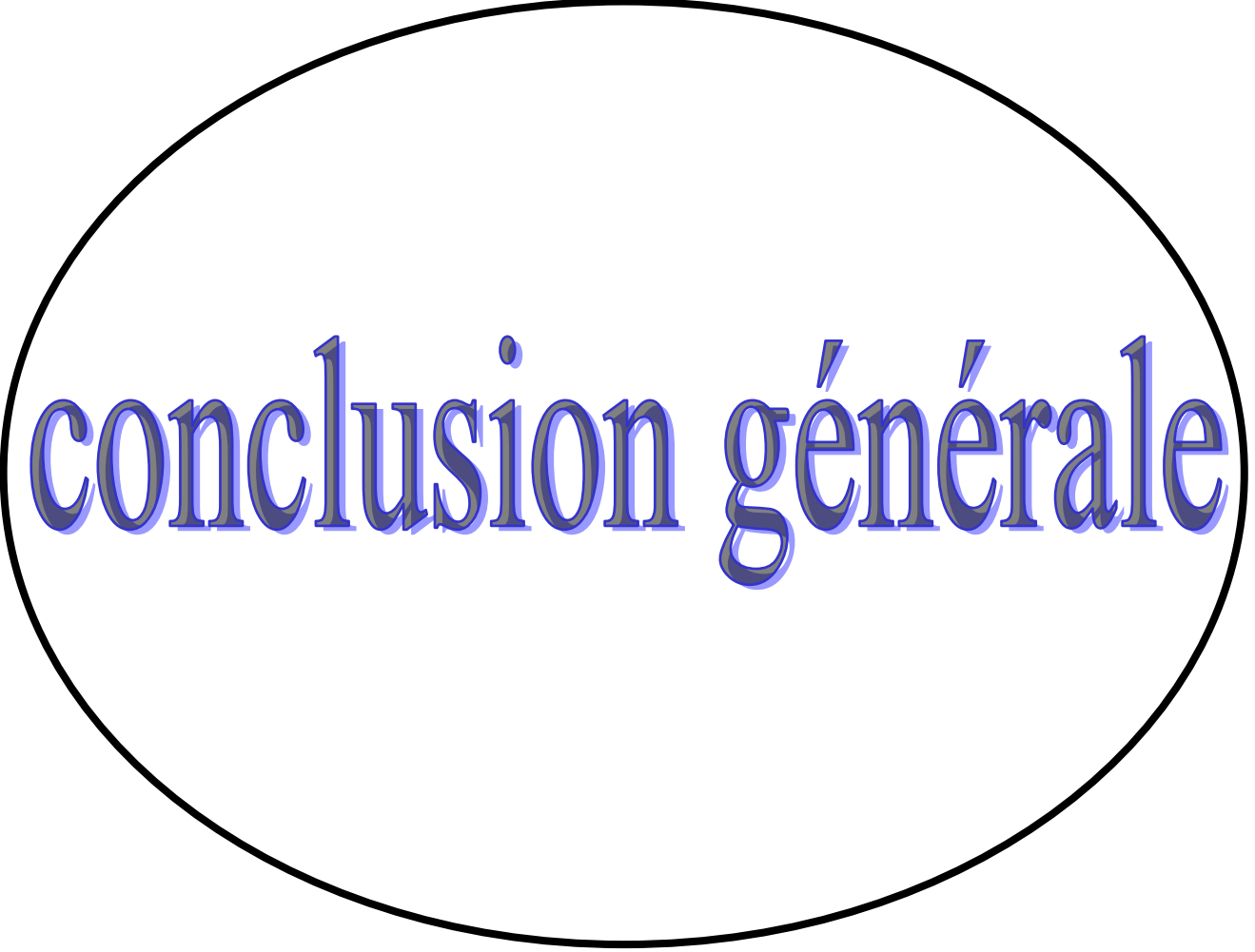
Sur la base des résultats regroupés dans le **tableau III.9** des travaux antérieurs de (**Belmecheri, 2012**) et de (**Souici, 2012**) et des nôtres et en se référant au classement de la **RILEM** et de l'**ACI** nous pouvons établir les constatations suivantes :

- L'ajout de chaux dans le composite de béton de sable de dune allégé par les billes de polystyrène traité fait diminuer la densité de 20 à 30 % par rapport au béton de sable avant l'allègement.
- Concernant la résistance à la compression, elle diminue automatiquement avec la substitution de la chaux dans le ciment d'une façon importante mais cette avec l'introduction des billes dans la matrice cette diminution de résistance est un peu réduite.
- Quant à l'isolation, l'effet de la substitution de chaux dans le ciment est d'un apport confortable concernant la conductivité thermique.
- Mais pour la durabilité vis-à-vis de la sorptivité, l'introduction de la chaux augmente ce paramètre de capillarité.

➤ **Pour les densités**, nous avons obtenus des densités similaires avec celles de **Belmechri**, mais plus grandes que celles obtenues par **Souici**. Les BDSP0 sont alors dans la gamme des isolants porteurs. En revanche l'ajout de la chaux nous a permis d'avoir des densités assez faibles mais donne des résistances très faibles, toutefois elles restent tolérables.

➤ **Pour les résistances à la compression**, nos résultats sont toujours similaires à celles obtenus par **Belmechri** et meilleurs que celles de **Souici**. Néanmoins ces valeurs sont en accord avec les densités. En revanche l'ajout de chaux n'a fait que chuter les résistances mécaniques.

➤ **Sur le plan de l'isolation thermique**, on note qu'avec un taux de substitution de 25% en chaux Les valeurs de conductivité thermique sont proches de celles de **Belmechri**. et de **Souici**.



conclusion générale

Conclusion Générale

Ce travail avait pour objectif la valorisation des matériaux locaux et les déchets industriels en les transformant en béton léger isolant. Il s'agit du sable dunaire de la région de Laghouat disponible en très grande quantité et le polys-béton (billes de polystyrène traitées). Deux paramètres ont été étudiés dans ce travail, le premier est l'influence des billes de polystyrène sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques du béton de sable dunaire. Le deuxième paramètre est l'apport de la substitution de la chaux par le ciment et son influence sur les caractéristiques du béton élaboré en particulier la résistance à la compression. Une première approche entreprise pour entamer ce travail est l'étude de la formulation du béton élaboré en se basant sur deux aspects, l'un relatif au facteur d'allègement du béton de sable par le polys-béton à cet effet un dosage de 1% a été pris en se basant sur les travaux entrepris par **Belmechri et Souici 2012** ; l'autre relatif à la substitution du ciment par de la chaux allant de 0 à 100%.

Une étude a été menée pour caractériser les bétons élaborés et voir l'effet de l'incorporation des billes de polystyrène et la chaux sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons de sable élaborés. Cette étude nous a permis de déceler un certain nombre de constatations que nous énumérons comme suit :

- ✓ L'incorporation du polys-béto avec un dosage de 1% a permis de diminuer la masse volumique des bétons de sable de **20%** par rapport au béton témoin correspondant à 100% de ciment.

- ✓ Une valeur minimale de la masse volumique de **1132.81 Kg/m³** est atteinte pour le dosage en chaux de 100% correspondant à un taux de diminution de **31.4%** par rapport au béton allégé par 1% de polys-béton et 100% de ciment.

- ✓ Les mesures du retrait sur les éprouvettes des différentes compositions nous ont permis de constater que l'incorporation de la chaux dans la matrice cimentaire fait augmenter le retrait.

- ✓ L'impact de l'incorporation du polys-béto sur les résistances mécanique et très remarquable en effet celle-ci chute de la valeur de **45.02MPa** pour le béton de sable à base de ciment avec 0% de polys-béton à **13.88 MPa** pour le béton de sable allégé par incorporation de 1% de polys-béton. Ce qui correspond à une diminution de **70%**. L'effet de la chaux sur la résistance à la compression était évident, celle-ci diminue lorsque le dosage en chaux augmente. la valeur tolérable pour les bétons de structure est enregistrée pour le dosage de 25 % de chaux (**7.51 MPa**) au-delà, les autres compositions indiquent de faible résistances.

- ✓ Pour la résistance à la flexion l'ajout de 1% de polystyrène la fait chuter d'une valeur de **7.30MPa** à une valeur de **6.43MPa** ce qui correspond à un taux de 12%. La valeur minimum de

la flexion est de **0.27 MPa** pour le béton de sable non allégé avec 100% de chaux et de **0.08 MPa** pour le béton de sable allégé avec 100% de chaux.

✓ Pour les essais d'absorption capillaire l'augmentation du pourcentage de chaux fait augmenter la sorptivité du matériau élaboré.

✓ Pour le comportement thermique des bétons élaborés, il a été bien évident que l'ajout du polys-béto améliore le pouvoir isolant des bétons de sable. En effet la conductivité thermique est passée de **1.29 W/m.k** à **1.0765 W/m.k** avec un taux de réduction de **17%**. Nous avons signalé l'apport bénéfique de l'ajout du pourcentage de chaux sur les caractéristiques thermiques. Une chute de la valeur de la conductivité thermique est observée lorsqu'on augmente le taux de substitution de la chaux. La valeur minimale est enregistrée pour le dosage en chaux de 100% avec une valeur de **0.485 W/m.k** correspondant à un taux de diminution de **55%**. Enfin l'effet de la cure sur la conductivité thermique est remarquable, la cure dans un endroit humide augmente la conductivité thermique.

✓ En combinant les deux aspects mécanique et thermique, nous pouvons conclure, qu'avec une teneur en polys-béto de 1%, il est possible d'obtenir de bons bétons qui peuvent servir comme matériaux isolants-porteurs.

Recommandations et perspectives

A l'issue de ces conclusions, nous recommandons la poursuite de ces travaux, notamment les points suivants :

➤ Compléter la caractérisation thermique des matériaux élaborés par la détermination des autres caractéristiques thermiques notamment la diffusivité thermique et la capacité calorifique afin de juger d'une manière rationnelle leur pouvoir isolant.

➤ L'addition des fines de briques dans la matrice liante, Notamment pour la composition avec le dosage de 25% de chaux.

➤ L'augmentation de l'échelle de dimension des échantillons peut donner plus de significations à nos résultats.



Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- 1- **Abdelhadi .H** (2005). « le comportement des bétons légers à base de granulats pouzzolaniques de BENI-SAF », Mémoire de magister de l'université d'Oran, p183.
- 2- **ACI**, (1979). 'Guide pour le béton de structure à base de granulats légers', Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics, Paris, 52pages.
- 3- **ACI**, (1970). guide pour le béton de structure à base de granulats légers, traduction de CATED, SDT BTP.
- 4- **ACI 213R-87**, (1994). Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan.
- 5- **Al-Rim .K, Al Cheikh-Kassem, Queneudec .M, Decamps .E.A**, (1991). Construire en matériaux locaux : tradition et modernité de l'habitat, approches culturelles, réalités économique, Colloque Franco-maghrebin, Marseille.
- 6- **Al-Rim .K, A. Ledhem, O. Douzane, R. M. Dheilly and M. Queneudec**,(1999). Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites, Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 4, Pages 269-276.
- 7- **Al-Rim .K**, (1995). Etude de l'influence des différents facteurs d'allègement des matériaux argileux – Les bétons argileux légers, Généralisation à d'autres formes de roches, Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes.
- 8- **Arnoud .M, Virlogeux .M**, (1986). Granulats et Bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- 9- **Astrand .J, Bessadi .L, Johansson .E, Laid .S, Teggour .H, Toumi .N**, (1993). Matériaux thermiquement isolant CNERIB, et LCHS) de l'université de Lund.
- 10- **Avis Technique 16/06-507** , (1969). CSTB LE FUTUR EN CONSTRUCTION.
- 11- **Ayadi .A, Iratini .A**, (2002). Elaboration et caractérisation d'un matériau isolant à base de déchets de verre, Proceeding of International Seminary GEOMAT'02, M'sila, Algérie, pp.257-262.
- 12- **Bahloul .D**, (2010). Effet de mode de conservation sur propriétés mécaniques de béton de sable Thèse d'ingénieur.
- 13- **Baron .J**, (1992). La durabilité des bétons, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- 14- **Belmechri .O**, (2012). **Performance d'un composite sable de dune ciment et granulats de polystyrène, these de magister.**
- 15- **Belouettar .R**, (2002). Utilisation du laitier granulé dans la fabrication du béton cellulaire autoclavé, Proceeding of International Seminary GEOMAT'02, M'sila, Algérie, pp.341-347.

Références bibliographiques

- 16- Benazzouk .A, Mezreb .K, Doyen .G, Goullieux .A, and Quéneudec .M,** (2003). Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement–rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates, *Cement and Concrete Composites*, Volume,25,pp.711-720.
- 17- Bing Chen, Juanyu Liu,** (2004). Proprieties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research* 34, pp.1259-1263.
- 18- Bouguerra .A,** (1997). Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux: comportement hygrothermiques des matériaux élaborés, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- 19- Bouguerra .A, Ledhem .A, F. de Barquin, Dheilly .R .M, and Quéneudec .M,** (1998). Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates, *Cement and Concrete Research*, Volume 28, Issue 8, Pages 1179-1190.
- 20- Brahim .M, Djaid .A,** (2012). Caractérisation des mortiers bâtards chaux-ciment à base de sable dunaire et alluvionnaire. Thèse d'ingénieur, université Amar Telidji.
- 21- Chaix .J .M, Laviales .G Quenard .D,** (1989). structure et propriétés d'un matériaux polyphasique modèle : le Béton légers isolant thermique, compte rendu de fin d'étude, CSTB Grenoble.
- 22- Chauvin j. j, Grimaldi .G,** (1998). Les bétons de sable, *Bull. LCPC*, n°157, 9-15
- 23- CIM Béton,** (1995). Les béton de sable en structure de chaussées, centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France.
- 24- Clarke .J .L,** (2002). Structural lightweight concrete by “Blackie academic and professional”.
- 25- Corman .P,**(1961). Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, Paris.
- 26- Damene .Z, Goual .M .S, Benhassine .N, Ferhat .A,** (2014). “Study of the effect of aluminium content and C/S ratio on the physic-mechanical and thermal properties of a lightweight concrete made from sand dune. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*.
- 27- Dupain .R, Lanchon .R, Saint Arroman .J .C,** (1995). Granulats, sols, ciments et Bétons, édition Casteilla, paris.
- 28- 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, p174.
- 29- Fisch .H, July,** (2003). *Plastics An innovative material in building and construction* ,TOULOUSE/2002 Conference- EUROCHEM (<http://www.apa.org>).
- 30- Ganeshbabu .K, Saradhi Babu .D,** (2004). Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, *Cement and Concrete Composites* 26, pp.605-611.

Références bibliographiques

- 31- **Goual .M .S**, (2001). Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux .Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Caractérisation et comportement thermo hydrique, Thèse de doctorat d'état de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- 32- **Groupe specialize N°7**,(2006). «produits et procédés pour chape et maçonnerie» Avis technique -1 CNERIB.
- 33- **Guettala .A, Mezghiche .B, Chebili .R**, (2002). Valorisation d'un déchet industriel pour la confection d'un béton de sable, Proceeding of International Seminary GEOMAT'02, M'sila, Algérie, pp.413-421.
- 34- **Guezouli .A, et Benaissa .A**, (2005). «le polys beto un nouveau matériau de construction». Décembre.
- 35- **Kass .J .L, et D. Compbell** (1972): Functional classification of lightweight concrete, Matériaux et Constructions, Vol.5 N°27, pp.171-172.
- 36- **Kedjour .N .E**, (1993). propriétés et pathologie du Béton, réimpression.
- 37- **Kluge .R .W, Sparks M. M. and Tuma, E. C**, (1949). 'lightweight aggregate concrete', ACI Journal, Proceedings V. 45 No. 9, pp 625-644.
- 38- **Ledhem .A**, (1997). Contribution à l'étude d'un béton de bois, Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois, Thèse de doctorat de l'INSA de lyon,.
- 39- **Ledhem .A, Dheilly .R .M, Benmalek .M .L, Queneudec .M**, (2000). Proprieties of wood-based composites formulated with aggregate industry waste, Journal of Construction and Building Materials 14pp.341-350.
- 40- **Levy .C, et Le boulicaut .P**, (1932). le BHP livré par réseau de centrale de BPE. Les bétons à hautes performances, presses des ponts et chaussées, pp95-114.
- 41- **Lightweight Aggregate concrete'**, (1949). Housing and Home Finance Agency, Washington, D.C., August.
- 42- **Loudon. J. C et Stacey**, (1990). Palm kernel shell as a lightweight aggregate in concrete.
- 43- **Mazouz .L**, (2010). **Contribution A L'étude Des Betons Legers A Base De Pouzzolane Et De Polys Beto;Memoire de magister.**
- 44- **Ndiaye .K**, (1993). « Optimisation des formulations des bétons de sa ble», Projet de fin d'études, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sén égal.
- 45- **Neville .A**, (2000). propriétés des Bétons, Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris.

Références bibliographiques

- 46- Pimienta .P, Chandellier .J, Rubaud .M, Dutruel .F, Nicole .H,** (1994). Etude de faisabilité des procédés de construction à base de Béton de Bois, Cahier du CSTB, Livraison 346, N°2703.
- 47- Ramachandran .V .S,** (1981). Utilisation des déchets et sous produits comme granulats du béton, CNRC construction.
- 48- Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise,** (1998). Etude et analyse du polystyrène expansé, Alger.
- 49- Rezzoug .S,** (2016). **Formulation Des Mortiers À Base De Chaux Et De Sables Dunaire Et Alluvionnaire ; mémoire de magister, Université de Laghouat.**
- 50- Richart F. E. and Jensen .V. P,** (1930). 'Construction and design features of Hydite concrete', ACI Journal, Proceedings V.27, N°. 2, , pp 151-182.
- 51- Rilem,** (1970). Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13. PP 60-69.
- 52- Rilem Recomandation,** (1979). Absorption d'eau par immersion sous vide, Matériaux et Construction vol 12 N°69- p 391-394.
- 53- Sablocrete,** (1994). « Bétons de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- 54- Shink .M,** (2003). Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des Bétons de granulats légers, Thèse de doctorat de l'université de Laval.
- 55- Short .A, et Kinnenburgh .W,** (1968). Lightweight Concrete, CR Books ltd.
- 56- Souici .I,** (2012). « Etude des propriétés physico-mécaniques et thermiques d'un composite à base de sable de dune, fines de brique, ciment et billes de polystyrène expansé » projet de fin d'étude, Ingénieur en génie civil, université Amar Telidji.
- 57- Steiger .R .W, Hurd .M .K,** (1978). Lightweight insulating concrete for floors and roof decks, The Aberdeen Group Michigan.
- 58- Véronique Cerezo,** (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: Approche expérimentale et modélisation théorique. Thèse de doctorat; INSA de Lyon.
- 59- Yvrard .J .P,** (1998). Expérimentation et modélisation du comportement Mécanique du polystyrène expansé. Thèse de doctorat de l'université de Lille.
- 60- Yamasaki .J, Nimura .S, NakaJima .I,** (1994). developperment of special light weight concrete,

Références bibliographiques

61- Ziregue .A, (2005). Influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment. Mémoire de Magister de l'université de Laghouat.

NF P18-500 Béton - Béton de sable

NF P18- 558 Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines - Granulate. Bestimmung Der Reindicht Der Feinanteile.

EN 196- 3 Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité.

NF P 18-555 Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables - Granulate. bestimmung der dichte,des absorptionskoeffizienten und des wassergehaltes von sand.

AFNOR P 18-598 Granulats - Équivalent de sable - GRANULATE. SANDGLEICHWERT.

P18-560 Granulats - Analyse granulométrique par tamisage - GRANULATE. SIEBANALYSE.

NA 442: 2000 Conforme à l'arrêté interministériel du 04 juin 2003 portant sur les spécifications techniques et les règles applicables aux ciments

ENV 196-6 Méthodes d'essais des ciments - Détermination quantitative des constituants

ASTM C 188-72 Density test of hydraulic cement

AFNOR NFP 15-301/94 : Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité

NF P18-452 Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres

EN 196- 1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques –

NF P.18-400 La dimension des moules

NFP 15-433 Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement

NFP 10-502 The rate of capillary absorption of water