

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie Civil & hydraulique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية والري
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Génie Civil
Spécialité (Option) : Matériaux de construction

Intitulé

**ETUDE DES PROPRIETES MECANQUES, THERMIQUES ET
ACOUSTIQUES DES BETONS DE GRANULATS LEGERS**

Présentée par :

Ouided HERIHIRI

Soutenue publiquement le 12-12-2022

Devant le jury composé de :

Pr. Taallah Bachir	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. Guettala Abdelhamide	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Pr. Chabil Hocine	Professeur	Examineur	Université de Constantine 1
Dr. Belebchouche Chérif	Docteur MCA	Examineur	Université de Constantine 1

Dédicace

Je dédie ce travail:

*À ma famille bien-aimée, ma mère, mon père, mes sœurs et mes frères dont
le soutien, les encouragements et l'amour constant m'ont soutenu tout au long
de ma vie.*

À tous mes amis et collègues

À tous ceux qui me connaissent

Et enfin à toi cher lecteur

Remerciement

Cette thèse marque la fin d'un voyage ardu mais perspicace dans la recherche scientifique. Ma profonde reconnaissance va à mon promoteur, Pr. GUETTALA Abdelhamide dont les manières professionnels, la patience et l'encouragement m'ont donné l'énergie de compléter ce qui semblait parfois être un objectif irréalisable. Je tiens à le remercier pour ses précieux conseils et orientations tout au long de cette étude.

Je remercie sincèrement les membres du jury d'avoir accepté de lire et d'évaluer cette thèse. Par les noms, je remercie le Prof. TAALLAH Bachir le Prof. CHABIL Hocine, le Dr. BELEBCHOUCHE Chérif.

Je remercie tous les participants qui ont pris part à cette étude. Ils ont fait preuve de beaucoup de dévouement et de professionnalisme que je n'oublierai jamais, alors je tiens à les remercier tous.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à ma famille dont l'aide et les encouragements m'ont exhorté à terminer ce travail. Je ne les remercierai jamais assez pour leur abnégation et leur soutien indéfectible.

Résumé

Depuis l'implication du concept de développement durable dans toutes les sciences, y compris le domaine de la construction et les travaux publics, des énormes recherches accentuées sur la réduction de la consommation énergétique et la préservation de l'environnement tout en gardant l'aspect du confort des citoyens. Selon cette perspective notre recherche est basée sur le remplacement partiel ou total des matériaux naturels par d'autres synthétiques recyclables afin d'avoir un éco-matériau moderne qui répond au concept binaire ; la réduction du cout et construire des éléments légers à géométrie complexe qui favorisent la créativité architecturale.

Ce mémoire de thèse est consacré à l'étude expérimentale des composites cimentaires légers confectionnés à base de la valorisation du sable des dunes, est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie, corrigé par un sable concassé par l'application de la méthode d'Abrams. La légèreté est réalisée par la substitution partielle du sable corrigé par le polystyrène expansé, ce dernier est caractérisé par sa puissance d'isolation thermique et acoustique ainsi que sa légèreté. Dans ce sens, une campagne expérimentale a été élaborée. Des formulations des composites cimentaires (mortier/bétons) incorporant des billes de polystyrène expansé (PSE) à des teneurs volumiques allant de 0 ; 5 ; 15 ; 25 ; 50 ; 75 et 100% pour les mortiers de PSE et de 0 ; 15 ; 25 ; 35 ; 45 ; 75 et 100% pour les bétons de PSE, comme substitution du sable de dune corrigé par le sable de carrière. Les résultats générés dans cette étude permettront donc de mieux comprendre l'évolution des propriétés physico-mécaniques. L'augmentation de la teneur en billes de PSE a diminuée positivement la densité et négativement les propriétés mécaniques (la résistance mécanique à la compression (R_c), la résistance mécanique à la traction R_t et le module d'élasticité dynamique (E_d)). Sur la base de cette diminution trois classes de mortier et de bétons légers se manifestent en corrélant entre la masse volumique et la résistance à la compression après 28 jours de cure. De plus, les propriétés de durabilité sont examinées sur les mélanges de béton de PSE: les critères d'absorption, de retrait et de gonflement, leur sensibilité à des environnements chimiquement agressifs (HCL), aux conditions accélérées de carbonatation et à des cycles de chauffage et refroidissement de l'ordre de (200, 400 et 600 °C).

Enfin, une caractérisation des propriétés thermiques et acoustiques du mortier/béton de PSE est réalisée. Elle montre des niveaux d'isolation élevés encourageant l'exploitation du polystyrène expansé dans les composites cimentaires.

Mots clés : Béton léger, sable de dune, polystyrène expansé, isolation, durabilité.

Abstract

Since the implication of the concept of sustainable development in all sciences, including the field of construction and public works, enormous research accentuated on the reduction of energy consumption and the preservation of the environment while maintaining the comfort of citizens. According to this perspective, our research is based on the partial or total replacement of natural materials by other recyclable synthetics in order to have a modern eco-material that responds to the binary concept; cost reduction and light elements construction with complex geometry that promote architectural creativity.

This thesis is devoted to the experimental study of lightweight cementitious composites made from the valorization of dune sand, is a material widely available in Algeria, corrected by crushed sand by applying the method of Abrams. The lightness is achieved by the partial substitution of corrected sand by expanded polystyrene. This latter is characterized by its capacity of thermal and acoustic insulation as well as its lightness. In this sense, a series of experiments was elaborated. Formulations of cementitious composites (mortar/concretes) incorporating expanded polystyrene beads (EPS) at volume contents ranging from 0;5; 15; 25; 50; 75 and 100% for EPS mortars; 15; 25; 35; 45; 75 and 100% for EPS concretes, as substitution of corrected dune sand by quarry sand. The results generated in this study will therefore make it possible to better understand the evolution of the physic mechanical properties. The increase in the content of EPS beads decreased the density positively and the mechanical properties negatively (mechanical compressive strength (R_c), mechanical tensile strength R_t and dynamic modulus of elasticity (E_d)). On the basis of this reduction, three classes of mortar and lightweight concretes appear by correlating between the density and the compressive strength after 28 days of curing. In addition, durability properties are examined on EPS concrete mixes: absorption, shrinkage and swelling criteria, their sensitivity to chemically aggressive environments (HCL), accelerated carbonation conditions and cycles of heating and cooling of the order of (200, 400 and 600°C).

Finally, a characterization of the thermal and acoustic properties of the EPS mortar/concrete is carried out. It shows high levels of insulation encouraging the exploitation of expanded polystyrene in cementitious composites.

Keywords: Lightweight concrete, dune sand, expanded polystyrene, insulation, durability.

ملخص

منذ ادخال مفهوم التنمية المستدامة في جميع العلوم، بما في ذلك مجال البناء والأشغال العمومية، ركزت الأبحاث على دراسة كيفية الحد من استهلاك الطاقة والحفاظ على البيئة مع الحفاظ على راحة الانسان. وفقاً لهذا المنظور، يعتمد بحثنا على الاستبدال الجزئي أو الكلي للمواد الطبيعية بمواد أخرى قابلة لإعادة التدوير من أجل الحصول على مادة بيئية حديثة تستجيب للمنظورين ؛ خفض التكلفة وبناء عناصر بهندسة معقدة تعزز الإبداع المعماري.

هذه الرسالة مخصصة للدراسة التجريبية للمركبات الأسمنتية خفيفة الوزن المصنوعة من استغلال رمال الكتبان الناعم، وهي مادة متوفرة على نطاق واسع في الجزائر، ويتم تصحيح عامل نعومتها بالرمل المسحوق الخشن بتطبيق طريقة أبرامز. يتم تحقيق الخفة من خلال الاستبدال الجزئي للرمل المصحح بالبولىسترين الموسع، ويتميز هذا الأخير بفعاليتته في العزل الحراري والصوتي بالإضافة إلى خفته. بهذا المعنى، تم تطوير تركيبات من المركبات الأسمنتية (ملاط / خرسانة) تشتمل على حبيبات بولىسترين ممددة بمحتويات حجم تتراوح من 0 ؛ 5 ؛ 15 ؛ 25 ؛ 50 ؛ 75 و 100% لـ PSE في ملاط ؛ 15 ؛ 25 ؛ 35 ؛ 45 ؛ 75 و 100% للخرسانة PSE ، كبديل لرمل الكتبان الرملية المصححة برمل المحجر. إن النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة ستجعل من الممكن فهم تطور الخواص الفيزيائية الميكانيكية بشكل أفضل. أدت الزيادة في محتوى حبات EPS إلى انخفاض في الكثافة وخواص ميكانيكية (قوة الضغط الميكانيكية (Rc) وقوة الشد الميكانيكية Rt ومعامل المرونة الديناميكي (Ed)). على أساس هذا التخفيض، تظهر ثلاث فئات من الملاط والخرسانة خفيفة الوزن من خلال الربط بين الكثافة وقوة الانضغاط بعد 28 يوماً من المعالجة. بالإضافة إلى ذلك، تم فحص خصائص المتانة على الخلطات الخرسانية PSE: معايير الامتصاص والانكماش وحساسيتها للبيئات العدوانية كيميائياً (HCL) وظروف الكربنة المتسارعة ودورات التسخين والتبريد بدرجات (200 و 400 و 600 درجة مئوية).

أخيراً، تم إجراء توصيف الخصائص الحرارية والصوتية لملاط PSE /الخرسانة. يظهر مستويات عالية من العزل الذي يشجع على استغلال البولىسترين الموسع في المركبات الأسمنتية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الخفيفة، رمل الكتبان، حبيبات البولىسترين، العزل، الديمومة.

Notation et Abréviation

λ	La conductivité thermique
ρ_b	Masse volumique du béton.
BGL	Le béton de granulat léger.
BL	Béton léger.
BLPSE	Béton léger de polystyrène expansé.
BO	Béton ordinaire.
C	Ciment
CT mètre	Conductivité Thermique mètre
E	Eau.
E/C	Rapport massique de l'eau sur le ciment.
E/L	Rapport massique de l'eau sur le liant.
Ed	Module d'élasticité dynamique.
MO	Mortier ordinaire.
MPSE	Mortier de polystyrène expansé.
P	Porosité
PL %	Dosage en superplastifiant exprimé en [% de poids de liant].
PL	Plastifiant.
PSE	Polystyrène expansé.
PZ	Pouzzolanes naturelles.
Rc	Résistance à la compression.
V	Vitesse du son.
Rf	Résistance à la flexion.
Rtf	Résistance à la traction par flexion.
α	Coefficient d'absorption acoustique

Liste des figures

Chapitre I : Revue bibliographique

- Figure I.1 : Répartition de la consommation énergétique mondiale (British Petroleum, 2014)..... P 06
- Figure I.2 : La consommation d'énergie finale dans le monde en 2012 avoisine 9 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (d'après Key World Energy Statistics 2014, AIE).....P 07
- Figure I.3 : Part de la consommation d'énergie finale et d'émissions mondiales des bâtiments et de la construction, 2017 (Bilan mondiale, 2018).....P 07
- Figure I.4 : Consommation d'énergie finale en Algérie (APRUE 2009).P 09
- Figure I.5: structure alvéolée d'un granulats..... P 12
- Figure I.6: Trois types de porosité présente dans les granulats (Cérézo, 2005) P 15
- Figure I.7: Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g , d'après Zhang & Gjorv P 16
- Figure I.8 : Evolution dans le temps de la quantité d'eau contenue dans les granulats légers (Virlogeux, 1986)P 16
- Figure I. 9: Évolution de la masse volumique des bétons en fonction du taux de substitution du sable naturel par du sable léger (Nguyen, 2013).)..... P18
- Figure I.10: Masse volumique en fonction d'âge (Bouabdallah et al., 2007) P 19
- Figure (I.11) : Essai de résistance conventionnelle au pot des granulats légers. (Arnold et al., 1986). P 20
- Figure (I.12): Essai de résistance des granulats légers à la presse hydrostatique (Arnold et al., 1986). P 20
- Figure I.13 : Essai de résistance des granulats légers au fil d'Armines. (Arnold et al., 1986)..... P 21
- Figure I.14 : évaluation du moule de déformation en fonction de la masse volumique des grains (M. Virlogeux, 1986) P 21
- Figure I.15: Interface pâte-granulats et mécanismes d'interaction (Zhang et al, 1990)..... P 23
- Figure I.16: Effet des facteurs sur la densité (Y. Xu et al., 2012).....P27

Figure I.17 : Effet des facteurs sur la résistance à la compression à 28 jours (Y. Xu et al., 2012).	P 27
Figure (I.18) : Échantillons de mélange de béton de polystyrène (a) Densité moyenne de D200 sur les billes de polystyrène expansé ; b) densité moyenne de D600 sur le polystyrène broyé).....	P 28
Figure I.19 : Changements dans la résistance à la compression du béton de polystyrène en fonction de différente densité. (Kharun, 2017).	P 29
Figure I.20: la résistance à la compression des différents teneurs en billes de PSE (Aasif et al., 2018).	P 29
Figure I.21 : Effet de taille sur la résistance en compression du béton léger de polystyrène expansé (Le Roy et al., 2005).	P 30
Figure I.22 : La résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment ((Neville, 2000).	P 31
Figure I.23 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport polystyrène/sable pour les différentes quantités du ciment. (Kuhail, 2001).....	P 31
Figure I.24 : Effet de la teneur en ciment sur la perte de résistance des composites de PSE.....	P 32
Figure I.25 : Effet du fumé de silice (SF) sur la résistance à la compression du béton de PSE avec différents volumes des billes de PSE (Chen et al., 2010).....	P 33
Figure I.26 : Variation de la résistance à la compression du béton avec du polystyrène et le cendre volante (Costin et al., 2018).	P 35
Figure I.27 Effet de la teneur en mousse sur la conductivité thermique du béton mousse PSE (Chen et al., 2013).....	P 36
Figure I.28 : Changements dans la conductivité thermique du béton de polystyrène en fonction de la densité différente. (Kharun et al., 2017).	P 38
Figure I.29 : La variation de la conductivité thermique en fonction des billes de polystyrène expansé (Dixit et al., (2019).	P 39
Figure I.30 : Influence de la fraction volumique des billes de poudre de PSE (de 10 à 70 vol%) sur la porosité et la conductivité thermique des mousses céramiques cuites. (Moraes et al., 2019)	P 40
Figure I.31: Effet du dosage volumique en bille de PSE sur la perte de réflexion des ondes sonores (diamètre du bille PSE d=1 mm) (Guan, et al., (2007).	P 42

Figure I.32: Effet de la taille des billes de PSE sur la perte de réflexion des ondes sonore, 3# : 50 vol.% PSE (d=1 mm), 4# : 60 vol.% PSE (d=1 mm) 5# : 50 vol.% PSE (d=3 mm), 6# : 60 vol.% PSE (d=3mm) (Guan, et al., (2007).....p43

Figure I.33: Effet de l'épaisseur des échantillons sur la perte de réflexion des micro-ondes 4# : 60 vol.% PSE (20 mm), 7# : 60 vol.% PSE (30 mm), 8# : 60 vol.% PSE (10 mm). (Guan, et al., (2007). P 44

Figure de I.34 : Coefficient d'absorption acoustique: (courbe en points) mousse de coque en céramique (70 vol% de PSE); (Moraes et al., 2019).P 45

Figure I.35 : Réduction du bruit d'impact des différents mortiers (0% ; 35% ; 50% et 65% en billes de PSE. (L. Santos et al., 2021). P 46

Chapitre. II Méthodologie expérimentale Et Caractérisation

Figure II.1 : Aspects des granulats utilisés, a) sable de dune, b) sable concassé, c) polystyrène expansé PSE, d) gravier 3/8, e) gravier 8/16. P 51

Figure II.2 : La courbe figure 1 granulométrique des sables utilisés..... P 52

Figure II. 3 : Analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/16 et sable 0/5)...P 54

Figure II. 4 : Résistances en compression normalisées obtenues avec les billes de diamètres $\emptyset = 2:5\text{mm}$ et $\emptyset = 6:3\text{mm}$ P 55

Figure II. 5 : Courbe d'analyse granulométrique des billes de PSE. P 56

Figure II. 6: Les pourcentages volumétriques des granulats selon la méthode de DREUX GORISSE P 58

Figure II.7 : Malaxeur à mortier..... P 60

Figure II. 8: Le malaxage des bétons au laboratoire..... P 61

Figure II. 9 : Conservation des éprouvettes..... P 61

Figure II. 10: Les différentes étapes de formulation, façonnage, affaissement et conservation.P 64

Figure II.11 : Maniabilimètre à mortier..... P 65

Figure II.12 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à mortier P 65

Figure II.13: Essai d'affaissement au cône d'Abrams P 66

Figure II.14: Domaine ciblé de l'affaissement au cône d'Abrams.....P 67

Figure II.15 : Mesure de la masse volumique à l'état frais.	P 67
Figure II.16 : Aéromètre à mortier.....	P 68
Figure II.17 : Mesure de la masse volumique des composites.	P 69
Figure II.18 : dispositif de rupture à la compression.....	P 72
Figure II.19 : dispositif de rupture à la traction par flexion.....	P 72
Figure II. 20: Ultrason de	P 73
Figure II.21 : Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier et béton.....	P 76
Figure II. 22: Dispositifs utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau.....	P 76
Figure II.23 : Le Retractomètre.....	P 76
Figure II. 24 : Éprouvettes immergées dans la solution de l'acide chlorhydrique (HCl).....	P 78
Figure. II.25 : Enceinte hermétique (chambre de CO2).	P 79
Figure. II.26 : Dispositifs de chauffage.	P 80
Figure II.26 : Evolution de la température - temps pour des expositions thermiques T200, T400, T600 °C.....	P 81
Figure II. 27 : Le microscope électronique à balayage.	P 81
Figure II.28 : Essai au CT-mètre du CNERIB	P 82

Chapitre III : Résultats et Discussions Caractérisation physico-mécanique

Figure III.1 Le rapport E/C en fonction du pourcentage de PSE.....	P 86
Figure III.2: L'ouvrabilité des mortiers fabriqués avec différents contenus de PSE	P 87
Figure III.3: L'Air Occlus en fonction du pourcentage de PSE.....	P 88
Figure III.4: La masse volumique en fonction du pourcentage de PSE.....	P 89
Figure III.5: Évolution de la résistance à la compression en fonction de %PSE.....	P 89
Figure III.6: Évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de %PSE...	P 90
Figure III.7: Évolution du module d'élasticité dynamique à différentes formulations...	P 91
Figure III.8 : La porosité en fonction du pourcentage de PSE.....	P 92

Figure III.9: Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique....	P 92
Figure III.10: Évolution du rapport E/C en fonction du dosage en PSE.	P 93
Figure III.11 : Mesure de la masse volumique sèche des composites.....	P 94
Figure III.12: Évolution de la masse volumique en fonction du dosage en PSE....	P 96
Figure III.13: Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en PSE à 7, 28, 56 et 90 jours.	P 96
Figure III.14: Évolution de la résistance RC en fonction de la masse volumique à 28 jours.....	P 97
Figure III.15: Évolution de la résistance Rt en fonction du dosage en PSE à 7, 28, 56 et 90 jours.	P 98
Figure III.16 : Corrélation entre les résistances à la compression et à la traction obtenue d'une part par flexion et d'autre part calculer.	P 99
Figure III.17: Évolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.....	P 99
Figure III.18 : Corrélation entre la vitesse du son et la résistance à la compression.....	P 100
Figure III.19 : Évolution du module d'élasticité dynamique des bétons de PSE...	P 101
Figure III.20 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression.....	P 101
Figure III.21: Évolution de l'absorption par immersion des bétons de PSE.....	P 102
Figure III.22 : Zone de transition inter-faciale Perles PSE et matrice de ciment...	P 102
Figure III.23: Évolution de l'absorption capillaire des bétons de PSE.	P 103
Figure III.24: Évolution du retrait en fonction du dosage en PSE.	P 104
Figure III.25: Évolution du gonflement en fonction du dosage en PSE.....	P 105
Figure III.26: Évaluation de la porosité en fonction de PSE%.....	P 106
Figure III.27: Évolution de la perte de masse en fonction de dosage de PSE à 7, 14, 21, 28 et 90 jours dans le milieu acide.	P 107
Figure III.28: Évaluation de la baisse de la résistance R _C en fonction de PSE à 28 jours.....	P 108
Figure III.29: L'aspect visuel des éprouvettes de BPSE.....	P 109

Figure III.30: Évolution de la profondeur de la couche dégradée des différents types de bétons en fonction de la durée d'immersion.	P 110
Figure III.31: la zone carbonatée des différents types de béton après 30j dans l'enceinte de CO ₂	P 111
Figure III.32: Profondeur de carbonatation des différents types de béton.....	P 112
Figure III.33: Les billes de PSE avant et après leurs mises au four.	P 113
Figure III.34: La perte de masse des billes de PSE en fonction de la température.....	P 114
Figure III.35: La perte de masse en fonction de la température de tous les mélanges... ..	P 115
Figure III.36 : La variation de la masse volumique avec l'élévation de la température de tous les mélanges.	P 116
Figure III.37 : La vitesse du son en fonction de la température de tous les mélanges.....	P 117
Figure III.38: Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température	P 118
Figure III.39 : Évolution de perte de la résistance à la compression de chaque type de béton en fonction de température.	P 118
Figure III.40: L'état des éprouvettes BT et BPSE à 20°C, 200°C, 400°C et 600°C	P 119
Figure III. 41 : Aspect de la structure poreuse de la bille de PSE au M.E.B	P 121

Chapitre IV : Résultats et Discussions Caractérisation Thermique

Figure IV.1: Schéma de principe de la méthode du fil chaud (Franco. A, 2007) .	P 131
Figure IV.2: Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk. (Boukhattem, 2008)	P 132
Figure IV. 3 : Évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage PSE.. ..	134
Figure IV. 4: Évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage PSE selon les conditions hydriques.	P 135
Figure IV.5: Corrélation entre la masse volumique et la conductivité thermique des mortiers de PSE.	P 136

Figure IV.6: La capacité thermique volumique en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.	P 137
Figure IV.7: la chaleur spécifique en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.	P 139
Figure IV.8: La diffusivité en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.....	P 139
Figure IV.9: La résistance thermique en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.	P 139
Figure IV.10: La conductivité thermique en fonction de la teneur en billes de PSE des bétons de PSE.	P 142
Figure IV.11: La conductivité thermique en fonction du rapport E/C des bétons de PSE.	P 142
Figure IV.12: La conductivité thermique et la densité des bétons de PSE.	P 143
Figure IV.13: La conductivité thermique et la porosité des bétons de PSE.	P 144
Figure IV.14: La chaleur spécifique en fonction du dosage en bille de PSE.	P 145
Figure IV.15: La diffusivité thermique la porosité des bétons de PSE.....	P 146
Figure IV.16: La résistance thermique des bétons de PSE.	P 147

Chapitre V: Résultats et Discussions Caractérisation Acoustique

Figure V.1 : Modèle de l'onde acoustique dans un gaz à l'échelle microscopique.....	P 151
Figure V.2 : Ondes incidentes, réfléchies et transmises pour un matériau soumis à une onde acoustique.	P 152
Figure V.3 : Le coefficient d'absorption acoustique en fonction du pourcentage des billes en PSE des deux familles (mortier&béton)	P 154
Figure V.4 : Coefficient d'absorption en fonction de porosité des composites....	P 157
Figure V.5 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction de la masse volumique des composites	P 158
Figure V.6 : L'impédance acoustique en fonction du pourcentage des billes en PSE.....	P 159
Figure V.7: Les coefficients de réflexion et de transmission en fonction du pourcentage des billes en PSE	P 159

Figure V.8 : Evolution en fonction de teneur en PSE de la vitesse du son et le coefficient d'absorption acoustique P 160

Figure V.9 : Évolution du coefficient d'absorption acoustique en fonction de la vitesse du onde sonore..... P 161

Figure V.10 : Évolution du Coefficient d'absorption acoustique et fonction de la résistance à la compression en fonction du dosage en PSE. P 162

Figure V.11 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction de la résistance à la compression P 163

Figure V.12 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction du module d'élasticité dynamique P 163

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Détail de la consommation finale par secteur d'activité.....	P 08
Tableau I.2: Masse volumique des granulats légers (Coquillat et al., 1986).....	P 17
Tableau I.3 : Propriétés élastiques des granulats d'argile expansés,(Muller-Rochholz, 1979).....	P 22
Tableau I.4: les quantités des différents mélanges (Y. Xu et al., 2012).....	P26
Tableau I.5: Réseau orthogonal L9 et résultats expérimentaux (Y. Xu et al., 2012).	P 26
Tableau I.6 : La densité des BPSE (Costin et al., 2018)	
Tableau I.7 : La conductivité thermique du béton cellulaire de PSE.....	P 36
Tableau I.8 : Résultats de conductivité thermique des bétons légers (Schackow et al., (2014).....	P 37
Tableau I.9: Propriétés mécaniques et thermiques du mélange E0-E4. (Dixit et al., 2019).....	P 38
Tableau I. 10 : Proportion de mélange et densité apparente de chaque échantillon (Guan, et al., (2007)	P 42
Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du ciment	P 49
Tableau II.2 : Composition chimique de ciment.....	P 50
Tableau II.3 : Composition minéralogique de ciment	P 50
Tableau II.4 : Caractéristiques physiques des sables.	P 53
Tableau II. 5 : Propriétés des graviers.....	P 53
Tableau II.6 : Caractéristiques du polystyrène.....	P 55
Tableau II.7 : Compositions des différents mortiers testés.	P 57
Tableau II. 8 : Données de base	P 58
Tableau II.9: La composition des différents mélanges de béton de PSE (BPSE). P 59	
Tableau II. 10: Les différentes étapes de malaxage	P 60
Tableau II. 11 : Quantité et programme des essais réalisés sur mortier et béton léger.....	P 62
Tableau II.12 : La masse volumique sèche et les écart-types correspondants.....	P 69

Tableau II.13 : Ecart des masses volumiques entre le béton témoin et les bétons légers	P 70
Le tableau III.1 : Classification des composites de PSE	P 97
Tableau III.2 : La variation de la profondeur de l'attaque de l'acide HCL.....	P 110
Tableau V.1 : Classes d'absorption acoustique, ISO 11654. (1997).	P 153

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Résumé

Notation et Abréviation

Liste des figures

Liste des tableaux

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Revue bibliographique	5
<i>I.1 Introduction.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2 Situation énergétique.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3 La consommation de l'énergie dans le monde</i>	<i>6</i>
<i>I.4 La consommation de l'énergie en Algérie.....</i>	<i>8</i>
<i>I.5. Isolation thermique dans le bâtiment</i>	<i>9</i>
<i>I.6. Béton léger dans le domaine du génie civil.....</i>	<i>10</i>
<i>I.7 Les bétons de granulats légers</i>	<i>11</i>
<i>I.8 Les granulats légers</i>	<i>12</i>
I.8.1 Définition.....	12
I.8.2 Classification	12
I.8.2.1 Les granulats légers naturels sans traitement.....	13
I.8.2.2 Les granulats légers naturels ayant subi un traitement thermique	13
I.8.2.3 Les granulats légers artificiels ne subissant pas de traitement spécial.....	13
I.8.2.4 Les granulats artificiels subissant divers traitements spéciaux	13
I.8.2.5 Les matériaux organiques	14
I.8.3 L'expansion des granulats	14
I.8.4 Propriétés des granulats légers.....	15

I.8.4.1 Porosité et absorption	15
I.8.4.2 Légèreté	17
I.8.4.3 Comportement et performances mécaniques	19
I. 9 Zone d'interphase « granulats-pâte cimentaire ».....	22
.....	23
I.10 Béton de polystyrène expansé (PSE)	24
I.10.1 Généralités	24
I.10.2 Propriétés physico-mécaniques des bétons de PSE	25
I.10.2.1 Effet de fraction volumique en billes de PSE	25
I.10.2.2 Effet de taille des billes de PSE.....	29
I.10.2.3 Effet du dosage en ciment (matrice cimentaire)	31
I.10.2.4 Effet des additions minérales.....	33
I.10.3 caractéristiques thermiques des bétons de PSE.....	35
I.10.4 caractéristiques acoustiques des bétons de PSE.....	40
I.11 Conclusion.....	47
Chapitre. II Méthodologie expérimentale Et Caractérisation	49
II.1 Introduction.....	49
II.2. Caractérisation des constituants utilisés.....	49
II.2.1 Le ciment.....	49
Surface spécifique (BLAINE) (cm²/g)	49
1.1 II.2.2 Eau de gâchage	50
II.2.3 Adjuvant	50
II.2.4 Les granulats.....	50
II.2.4.1 Le sable	51
II.2.4.2 Le gravier.....	52
II.2.4.3 Le polystyrène expansé PSE	53
II.3 Méthodologie expérimentale.....	55
II.3.1. Compositions des mortiers allégés	56
II.3.2. Compositions des bétons testés	57
II.3.3. Mode opératoire.....	59
II.3.3.1 Le procédé de malaxage.....	59

II.3.3.2 Préparation et conservation des éprouvettes.....	60
<i>II.4 Campagne de caractérisation des composites légers.....</i>	<i>61</i>
<i>II.4.1 à l'état frais.....</i>	<i>64</i>
II.4.1.1 Ouvrabilité du mortier de PSE	64
II.4.1.2. Ouvrabilité du béton « Essai d'affaissement au cône d'Abrams »	65
II.4.1.3 La masse volumique.....	67
II.4.1.4 Air occlus	67
<i>II.4.2 à l'état durci.....</i>	<i>68</i>
II.4.2.1 Masse volumique apparente	68
II.4.2.2 Résistances mécaniques.....	71
II.4.2.2.1. Résistance à la compression	71
II.4.2.2.2. Résistance à la traction par flexion.....	72
II.4.2.3 Module d'élasticité dynamique	72
II.4.2.4. Absorption.....	74
II.4.2.4.1 Absorption d'eau par immersion	74
II.4.2.4.2 Absorption d'eau par capillarité (NE-13057).....	75
II.4.2.5 La porosité accessible à l'eau	75
II.4.2.6 Essai de retrait et gonflement	76
II.4.2.7 Essais d'approche de durabilité.....	77
II.4.2.7.1 Essai de résistance des composites au contact d'une eau acide.....	77
II.4.2.7.2 Essai de carbonatation accélérée	79
II.4.2.7.3 La résistance au feu (ASTM E 2032-09).....	79
<i>II.5 Caractérisation de la microstructure.....</i>	<i>81</i>
<i>II.6 Caractéristiques thermiques</i>	<i>82</i>
<i>II.7 Conclusion</i>	<i>83</i>
Chapitre III.....	85
Résultats et Discussions	85
Caractérisation physico-mécanique	85
Chapitre III : Résultats et Discussions Caractérisation physico-mécanique	86
<i>I. Introduction.....</i>	<i>86</i>
<i>III.1 Étude des mortiers légers à l'état frais.....</i>	<i>86</i>

<i>III.1.1 La maniabilité.....</i>	<i>87</i>
<i>III.1.2 Air occlus.....</i>	<i>88</i>
<i>III.2 Étude des mortiers légers à l'état durci.....</i>	<i>89</i>
III.2.1 Densité	89
III.2.2 Résistances mécaniques	90
III.2.2.1 Résistance à la compression.....	90
III.2.2.2 Résistance à la traction par flexion	91
III.2.2.3 Module dynamique d'élasticité.....	91
III.2.3 La porosité accessible à l'eau.....	92
III.2.6 Relations entre les propriétés des composites de PSE.....	93
<i>III.3 Étude des bétons légers.....</i>	<i>94</i>
III.3.1 Effet de la variation du pourcentage de PSE en fonction du rapport E/C	94
<i>III.3.2 Variations de la masse volumique des bétons de PSE.....</i>	<i>95</i>
<i>III.3.3 Variations des résistances à la compression des bétons de PSE.....</i>	<i>97</i>
<i>III.3.4. Variations des résistances à la traction par flexion des bétons de PSE.....</i>	<i>98</i>
<i>III.3.5 Variations des vitesses des ondes sonores à travers les bétons de PSE.....</i>	<i>99</i>
<i>III.3.6. Le module d'élasticité dynamique des bétons de PSE.....</i>	<i>101</i>
<i>III.3.7 Variations de l'absorption par immersion des bétons de PSE.....</i>	<i>102</i>
<i>III.3.8 Variations d'absorption capillaire des bétons de PSE.....</i>	<i>103</i>
<i>III.3.9 Variations retrait des bétons de PSE.....</i>	<i>104</i>
<i>III.3.10 Variations du gonflement des bétons de PSE.....</i>	<i>105</i>
<i>III.3.11 la porosité.....</i>	<i>106</i>
<i>III.4. Résistance des BPSE dans un milieu acide.....</i>	<i>106</i>
III.4.1 la perte de masse	107
III.4.2 la résistance à la compression	108
III.4.3 Examen visuel Avant traitement HCL Après traitement HCL.....	109
<i>III.5 Carbonatation.....</i>	<i>111</i>
<i>III.6 Résistance au feu</i>	<i>112</i>
III.6.1 Tenue des billes de PSE au feu	113
III.6.2 L'effet de l'élévation de température sur la perte de masse des composites.....	114
III.6.3 L'effet de l'élévation de température sur la masse volumique des composites	116
III.6.4 L'effet de l'élévation de température sur la vitesse de propagation du son	116

<i>III.6.5. L'effet de l'élévation de température sur la résistance à la compression.....</i>	<i>117</i>
<i>III.7. Observations visuels des dégradations des différents composites après le refroidissement... 118</i>	<i>118</i>
<i>III.8 Caractérisation de la microstructure.....</i>	<i>120</i>
<i>III.9 Conclusion.....</i>	<i>121</i>
Chapitre IV : Résultats et Discussions Caractérisation Thermique	125
<i>IV. 1 Introduction.....</i>	<i>125</i>
IV.2.1 Isolation thermique dans le bâtiment	126
IV.2.2 Phénomènes de transfert de chaleur.....	127
IV.2.3 Modes de transfert de chaleur	127
IV.2.3.1 Le transfert de chaleur par conduction.....	128
IV.2.3.2 Le transfert de chaleur par convection.....	128
IV.2.3.3 Le transfert de chaleur par rayonnement.....	129
IV.2.4 Propriétés thermiques des matériaux	130
IV.2.4 Mesure des propriétés thermiques	130
IV.2.4 .1 Méthode du fil chaud	131
IV.2.4 .2 Méthode de Hot-disk	132
<i>IV.3 Pouvoir thermique d'isolation des mortiers de PSE étudié</i>	<i>133</i>
IV.3.1.1 L'impact de teneur en billes de PSE	133
IV.3.1.2 L'impact de l'état hydrique.....	134
IV.3.1.3 L'impact de masse volumique	135
IV.3.2 La capacité thermique volumique Cv	136
IV.3.3 La diffusivité thermique.....	138
IV.3.4 La résistance thermique	139
<i>IV.4 Pouvoir thermique d'isolation des bétons de PSE.....</i>	<i>140</i>
IV.4.1 Conductivité thermique.....	141
IV.4.1.1 L'impact du dosage en billes de PSE.....	141
IV.4.1.2 L'impact du rapport E/C	142
IV.4.1.3 L'impact de masse volumique	143
IV.4.1.4 L'impact de la porosité des bétons de PSE	144
IV.4.2 La chaleur spécifique	144
IV.4.3 La diffusivité thermique.....	145
IV.4.4 La résistance thermique	146
<i>IV. 5 Conclusion</i>	<i>147</i>

Chapitre V: Résultats et Discussions Caractérisation Acoustique	149
<i>V.1 Introduction.....</i>	<i>149</i>
<i>V.2. Rappels sur les ondes acoustiques</i>	<i>149</i>
V.2.1. Définitions.....	149
V.2.2 Paramètres de l'onde ultrasonore.....	150
V.2.2.1 Célérité de l'onde acoustique (V).....	150
V.2.2.2 Impédance acoustique (Z)	150
V.2.2.3 Le coefficient d'absorption acoustique (α).....	151
<i>V.3 les propriétés acoustiques des composites de PSE.....</i>	<i>152</i>
<i>V.3. 1 Le coefficient d'absorption acoustique (α).....</i>	<i>152</i>
V.3.1.1 L'influence du dosage en billes de PSE	152
V.3.1. 2 L'influence du Porosité	154
V.3.3 l'influence de la masse volumique	156
<i>V.3.2 L'impédance acoustique.....</i>	<i>157</i>
<i>V.3.3 Les coefficients de réflexion & transmission.....</i>	<i>157</i>
<i>V.3.4 Relation entre le coefficient (α) et la vitesse du son</i>	<i>158</i>
<i>V.3.5 La relation entre le coefficient d'absorption (α) et R_c</i>	<i>160</i>
<i>V.3.6 La relation entre le coefficient d'absorption α et E_d.....</i>	<i>162</i>
<i>V.4 Conclusion.....</i>	<i>162</i>
Conclusion générale.....	164
Références bibliographiques	172

Introduction générale

Depuis plus de 10 ans, l'Algérie a traversé un long chemin de développement dans beaucoup de secteurs économiques, engendrant la naissance à plusieurs projets stratégiques pour le pays. Le marché de l'habitat a connu un intérêt particulier et crucial dans la politique du pays, le ministère de l'Habitat, de l'Urbanisme et de la Ville a relancé un nouveau programme d'un (1) million de logements pour la période 2020-2024.

Dès le début de l'industrie moderne, le confort dans l'habitat a pris une place au centre du développement comme objectif principal. Le confort et le bien-être dans un logement, c'est qu'il soit désirable pour ceux qui y résident, pourra être à la fois satisfaire les conditions de chauffage, de climatisation, d'aération..etc. Ce développement doit être compatible avec un contrôle de dépenses énergétiques, tout en étant prudent lors de l'exploitation des ressources naturelles, donc un comportement éco-responsable, pour satisfaire le concept du développement durable.

Dans le contexte du développement durable, le ministre de l'habitat et de l'urbanisme algérien a interdit l'exploitation du sable des oueds et de la mer, une mesure justifiée par la préservation de l'environnement qui est considéré un défi majeur face au besoin croissant du sable dans la construction. Dans le but de faire un équilibre entre les besoins du pays en matière de sable et la préservation de l'environnement, les chercheurs commencent à exploiter de nouvelles idées afin de générer des solutions novatrices à ce problème complexe. Par ailleurs, l'amélioration des performances thermiques et acoustiques du béton s'avère intéressante, car elle va apporter à l'habitant plus de confort, notamment pour réduire la consommation de l'énergie destinée au chauffage et la climatisation des locaux.

Parmi les mesures que les chercheurs préconisent, celle de vulgariser le processus de fabrication du sable de carrière issu du concassage de roches calcaires, et d'évaluer l'économie de la filière granulats. Toutefois, cette démarche ne peut pas satisfaire seule la demande croissante des programmes de développement. Cependant, la recherche d'autres alternatives afin de faire face au manque de matériaux et spécialement le sable, demeure nécessaire plus que jamais.

Actuellement, d'énormes travaux de recherche consistent à employer de nouveaux matériaux de construction à travers la valorisation des matériaux locaux pour la confection des bétons performants de point vue mécanique et économique ainsi que sur le plan durabilité. Parmi ces matériaux, le sable de dune, un matériau occupant plus de 60% du territoire algérien essentiellement mais inexploité jusqu'à ce jour malgré la multitude des travaux de recherche effectués sur l'utilisation du sable de dune dans le domaine de la construction en Algérie. (Benmalek & Riad, 2003; Guennoun.R, 2003; Hocine, 2009; Khetab. R, 2006)

En outre, la technologie du béton de granulats légers peut répondre au défi de la protection de l'environnement et au développement durable, notamment dans les pays en voie de développement, et ce en réduisant la consommation d'énergie destinée au chauffage et la climatisation des locaux qui ne cesse d'augmenter d'une année à l'autre. Des recherches ont été menées exploitant les granulats légers naturels, artificiels et

recyclés dans le but de valoriser leurs importances dans la construction moderne. Le polystyrène expansé PSE figure parmi les granulats légers, artificiels, fabriqué en Algérie, présentant donc un grand intérêt pour les recherches. Le polystyrène permet une économie d'énergie dans l'habitat, les pertitions d'énergie sont évaluées à 41% de la consommation énergétique totale. Les économies d'énergie sont réalisées en supprimant la plupart des ponts thermiques, en particulier ceux qui sont situés à la jonction entre les cloisons internes et les façades. La consommation en énergie (chauffage et ventilation) cout de plus cher pour les ménages.

L'Algérie est un pays chaud. En été les constructions ont besoin de matériaux d'isolation thermique. Le polystyrène expansé c'est un matériau climatiseur, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable : il élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs. Ce matériau est aussi respectueux de l'environnement, le polystyrène est un produit écologique, il n'est certes pas biodégradable mais il est recyclable. D'ailleurs, grâce à sa capacité de retenir la chaleur, il est souvent utilisé sous forme des panneaux l'isolation notamment dans les plafonds et les combles, dans le but de réaliser d'importantes économies d'énergies dans le bâtiment.

En effet, cette thèse est une tentative pour inciter le constructeur Algérien à fabriquer et à utiliser le sable de dune et le polystyrène expansé PSE comme alternative afin de préserver l'environnement et réduire le besoin aux granulats naturels d'une part, d'autre part de réduire la consommation d'énergie.

Le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences de développement durable, par son excellent rapport poids/résistance et par sa bonne isolation, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction. Toutes ces performances changent avec le type de matrice et la qualité du granulat.

L'objectif de ce recherche est d'élaborer des composites (mortier/béton) à base du sable de dune (fin) corrigé par le sable de carrière utilisant la méthode d'Abrams, par la suite, on passe à l'allégement de ces composites par la substitution volumique du sable corrigé par des perles de polystyrènes expansé (PSE) d'une part. Et d'évaluer expérimentalement l'effet de la substitution volumique du sable corrigé par les billes de PSE sur les propriétés du béton de granulats légers (physico-mécaniques et de durabilité, l'effet des hautes températures, thermique et acoustique) d'autre part. Dans ce contexte six pourcentages de polystyrène expansé sont utilisés : 5, 15, 25, 35 45% et 100% par le remplacement volumique des granulats naturels dans les composites (mortier/béton). Puis, une étude de l'effet des hautes températures (200°C, 400°C et 600°C) sur ces composites formulés afin d'améliorer la compréhension du comportement des bétons de polystyrène expansé exposés à des températures élevés.

Cette thèse est constituée de cinq chapitres, d'une introduction générale et d'une conclusion.

Le Chapitre 1 présente une revue de la littérature sur la situation énergétique dans le domaine de la construction soit mondiale et Algérienne. Ainsi, nous exposons un

aperçu détaillé sur les composites légers en tant qu'alternatives au matériau classique. Puis, interprétation des résultats existants dans la littérature, relative aux bétons légers.

Le Chapitre 2 décrit et discute la campagne expérimentale sur les matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, le programme des essais réalisés, la méthode de formulation et explique brièvement les essais à l'état frais et durci.

Le Chapitre 3 comporte des discussions sur les résultats physico-mécaniques et des approches de durabilité caractérisant les mécanismes de dégradations atteignant ces composites dans de différentes conditions environnementales (attaques chimique par acide chlorhydrique, haute température, absorption d'eau).

Le Chapitre 4 Commence par un rappel théorique sur le transfert de chaleur, puis traite l'aspect thermique de différentes formulations élaborées par les mesures expérimentales à la fois sur matériau sec et sur matériau conservé dans des conditions de température et d'humidité relative variables.

Le Chapitre 5 est consacré au comportement acoustique du matériau au travers de l'étude de l'absorption acoustique α . Cette partie de l'étude vise principalement à comprendre le comportement de ces composites à travers des tests ultrasonore afin de vérifier leurs propriétés acoustiques.

Chapitre I

Revue bibliographique

Chapitre I : Revue bibliographique

I.1 Introduction

Actuellement, le développement technologique dans le domaine de la construction, comme dans tout autre secteur, est lié par trois facteurs d'innovation essentiels: l'économie, le confort et l'environnement. Le récent développement de la technologie du béton mène toujours plus fréquemment à l'emploi de bétons spéciaux ayant un poids différent de celui du béton normal. Ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de la partie fine du granulat. L'utilisation d'un béton de masse volumique plus faible peut être bénéfique en termes d'éléments portants de sections plus petites et de la réduction correspondante aux fondations aussi de construire sur un sol de faible capacité portante. Ainsi les bétons légers, ils ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

Le polystyrène expansé est un matériau ultra léger, climatique, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable, il élimine l'humidité qui peut condenser sur les murs. Ce granulat artificiel est notre choix dans cette étude basée sur ses caractéristiques intéressantes. Alors on a formulé une série des bétons de granulats légers BGL de polystyrène expansé suivant un plan d'expérience bien déterminé divisé en deux phases. Ce premier chapitre présente le contexte général de l'étude ainsi que les bases scientifiques du comportement physico-mécanique, thermique et acoustique des bétons de granulat léger. Dans un premier temps, la réglementation thermique du bâtiment et les techniques d'isolation thermique seront abordées. Dans un second temps, différentes méthodes de mesure des propriétés thermiques ainsi que les paramètres extrinsèques affectant ces propriétés, comme la température ou l'humidité relative, seront considérés. Des résultats expérimentaux publiés par plusieurs auteurs sur les granulats légers et le béton de granulat léger seront exposés. L'objectif est de synthétiser l'influence positive ou négative des différents facteurs sur le comportement thermique (conductivité thermique) et sur le comportement mécanique (résistance en compression et module d'élasticité). Cette synthèse constitue une bonne base pour définir la campagne expérimentale permettant l'étude du comportement des bétons de structure de granulat léger.

I.2 Situation énergétique

Au niveau mondial, la croissance démographique, l'augmentation du niveau de vie et des mobilités, les dynamiques de la mondialisation, tout cela concourt à une dépense effrénée d'énergie. Charbon, gaz naturel et surtout pétrole, ces trois sources d'énergie fossile couvrent environ 80 % des besoins universel. Notamment la Chine et à moyen terme l'Inde compte tenu de sa démographie, elle pourrait doubler à l'horizon 2050. Cette situation marque la dépendance mondiale aux énergies carbonées et pose la

question de sa durabilité, tant sur le plan environnemental que sur celui de l'approvisionnement en matières premières. La demande d'énergie primaire mondiale était satisfaite en 2013 à plus de 87% par les énergies fossiles. Le pétrole est la première source d'énergie, assurant 33% des besoins mondiaux, suivi par le charbon 30% et le gaz 24%. Les énergies renouvelables satisfont quant à elles 13 % de la demande, dont 6 % pour l'hydraulique. La part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire s'établit à 4%. Figure (I.1). (British Petroleum, 2014).

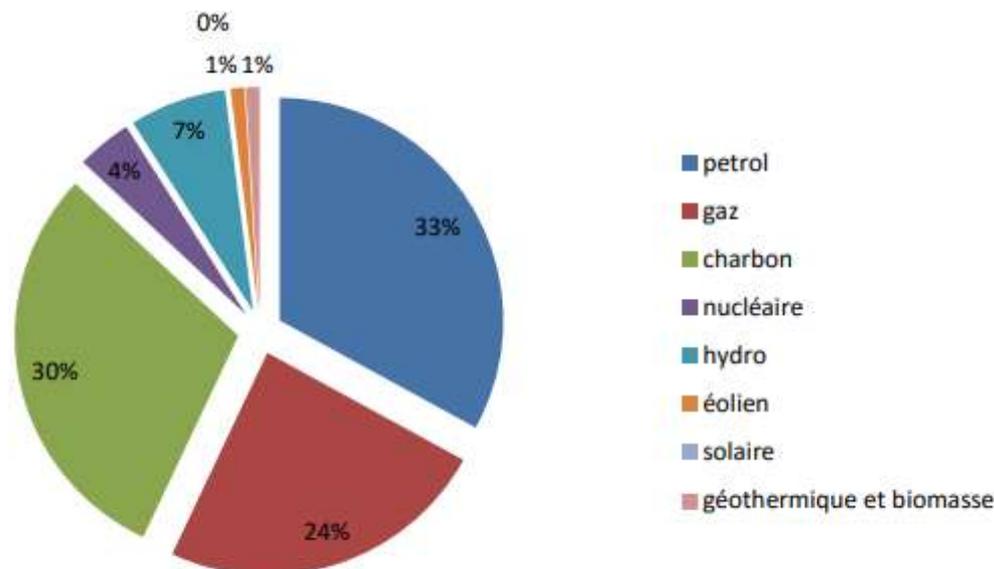


Figure I.1: Répartition de la consommation énergétique mondiale (British Petroleum, 2014).

I. 3 La consommation de l'énergie dans le monde

L'économie mondiale est fondée sur une croissance dopée aux énergies, au premier rang desquelles les énergies fossiles. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la demande mondiale en énergie va connaître une forte augmentation serait de 40% sur la période 2009-2035. L'AIE souligne que le secteur de l'énergie est responsable de deux tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Selon ses dernières estimations, les émissions mondiales de CO₂ liées à la production d'énergie vont augmenter de 19% sur la période (2011-2035) pour atteindre 37,2 Gt CO₂ en 2035 (contre 31,3 Gt CO₂ en 2011), ce qui correspondrait à une hausse des températures mondiales moyennes de 3,6°C à long terme. La 21^{ème} conférence des parties de la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) sont réunis à Paris en décembre 2015, pour l'objectif d'adopter un nouvel accord mondial pour limiter les émissions des gaz à effet de serre. (Limam, 2016).

Une simple observation sur la figure (I.2), à eux seuls, les pays développés, qui représentent de 20% de la population mondiale, consomment presque la moitié de l'énergie, et, par voie de conséquence, rejettent la moitié des émissions de gaz à effet de serre.

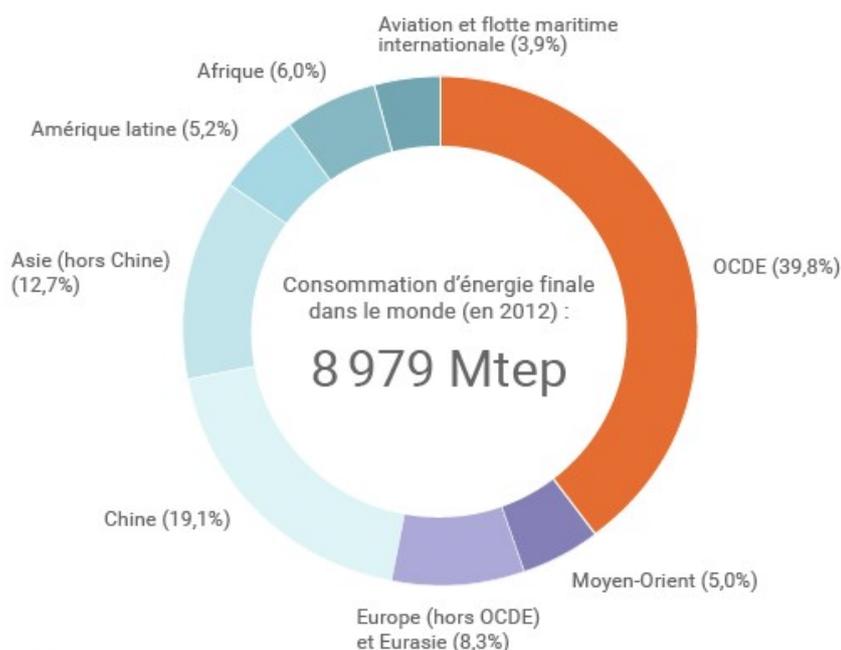


Figure I.2 : La consommation d'énergie finale dans le monde en 2012 avoisine 9 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (d'après Key World Energy Statistics 2014, AIE)

Le secteur de construction et de bâtiments représentaient 36% de la consommation d'énergie finale mondiale et près de 40% des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en 2017 selon le Bilan mondiale. Ce secteur représente donc la plus grande part de la consommation énergétique et des émissions, même en excluant l'énergie liée à la construction utilisée pour le transport de matériaux de construction sur les chantiers. (Figure I.3).

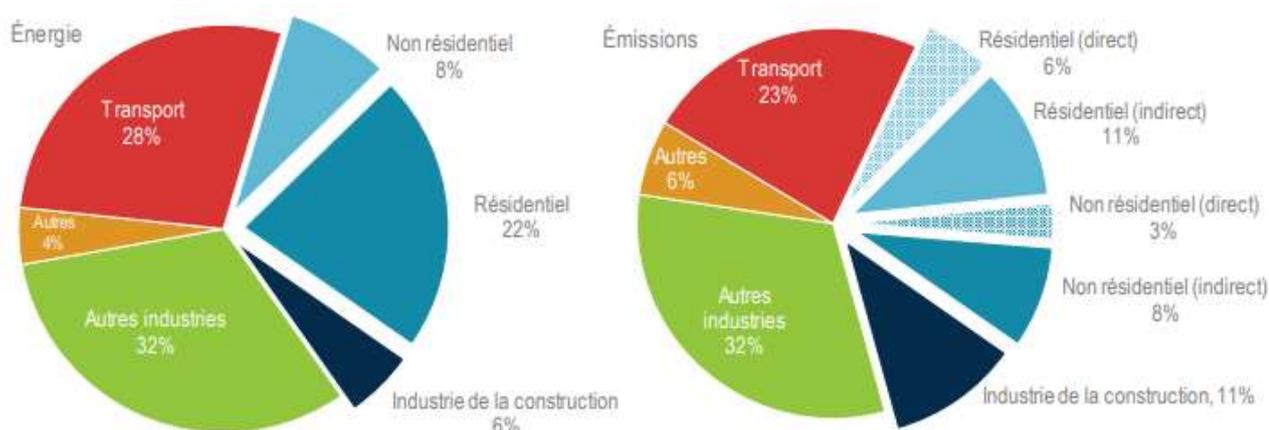


Figure I.3: Part de la consommation d'énergie finale et d'émissions mondiales des bâtiments et de la construction, 2017 (Bilan mondiale, 2018).

L'exploitation des combustibles fossiles contribue pour plus de 65 % aux émissions de gaz à effet de serre. Ces émissions sont responsables des changements climatiques aux conséquences potentiellement catastrophiques pour l'ensemble de la planète. Devant cette situation, le monde a besoin d'un bouleversement du système énergétique

basé sur les combustibles fossiles vers un avenir énergétique propre et durable. La transition énergétique prévoit leur remplacement progressif par des sources d'énergies renouvelables pour la quasi-totalité des activités humaines (transport, industrie, éclairage, chauffage, etc.). Le développement technologique a le potentiel de redéfinir l'utilisation de l'énergie dans le secteur des bâtiments. Il s'agit aussi d'éviter la surproduction et les consommations superflues pour mieux économiser l'énergie, et bénéficier d'une meilleure efficacité énergétique.

I. 4 La consommation de l'énergie en Algérie

D'après le bilan énergétique de l'année 2019, par secteur d'activité, l'évolution de la consommation finale, montre un accroissement de la consommation des «Ménages et autres» de 5,0% à 23,5 MTep, tirée par le sous-secteur résidentiel (2,9%), à la faveur de la hausse du nombre des clients de Sonelgaz (notamment BP) et de leurs besoins et légère hausse (0,8%) de la consommation du secteur des 'transports' à 15,4 M Tep en 2019, tirée par celle des carburants routiers. Pour le secteur «Industries et BTP», l'augmentation de la consommation énergétique est de 9,3%, à 11,4 M Tep, tirée par les sous-secteurs de l'ISMME (41%), des BTP (84%) et des matériaux de construction (+5%). Le tableau (I.1) indique le détail de la consommation finale par secteur d'activité.

Tableau (I.1) : Détail de la consommation finale par secteur d'activité.

Unité : K Tep	2018	2019	Evolution	
			Quantité	(%)
Industrie et BTP, dont :	10 450	11 424	974	9,3
Matériaux de construction	4 659	4 888	229	4,9
ISMME	1 283	1 805	522	40,7
BTP	486	892	406	83,5
Industries Manufacturières :	1 122	1 167	45	4,0
(Dont : Agroalimentaires)	1 011	1 048	37	3,7
Chimie	541	483	-58	-10,8
Autres industries	2 359	2 189	-170	-7,2
Transport, dont :	15 281	15 405	124	0,8
Routier	14 342	14 388	46	0,3
Aérien	608	495	-113	-18,5
Ménages et autres, dont :	22 414	23 529	1 115	5,0
Résidentiel	17 637	18 140	503	2,9
Agriculture	362	374	12	3,2
Total	48 146	50 359	2 213	4,6

D'après la figure (I.4), le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore. Sa consommation représente plus de 41% de la consommation finale. Environ 80% de la dépense énergétique nationale dans ce secteur est lié au chauffage et/ou à la climatisation afin de maintenir une température ambiante agréable dans les habitations, souvent, pas isolées thermiquement. Ce constat alarmant conduit à porter un regard

nouveau et objectif sur la nécessité d'isoler thermiquement les habitations. (Touloum, 2016)



Figure I.4 : Consommation d'énergie finale en Algérie (APRUE 2009).

Devant cette situation, il est primordial de mettre en place de mesures d'efficacité énergétique appropriées afin de réduire cette consommation d'énergie et protéger l'environnement, sans influencer le confort des occupants. Sur le plan technique, les solutions et les produits technologiques sont favorisés, tant pour diminuer la consommation d'énergie que pour réduire la déperdition d'énergie dans les bâtiments. D'ailleurs, l'Algérie a élaboré un programme national d'efficacité énergétique.

I.5. Isolation thermique dans le bâtiment

La construction actuelle des habitats et des bureaux en Algérie, ne prend pas en considération l'isolation thermique de l'enveloppe comme solution pour réduire la consommation excessive de l'énergie (électrique/gaz) utilisée pour assurer un certain confort thermique à l'intérieur de ces établissements. La déperdition d'énergie provient essentiellement de la chaleur traversant l'enveloppe du bâtiment (énergie consommée pour le chauffage/ climatisation). La déperdition d'énergie se manifeste à plusieurs endroits du bâtiment : mur, toit, sol, fenêtre, plancher...

L'origine est la mauvaise isolation avec l'extérieur. Selon Necib et al, la toiture, est responsable de 70.62% des gains thermiques globales, 27.11% de gain est reçu par les quatre murs et 2.27% par les fenêtres. L'étude a montré aussi qu'une isolation combinée de toiture et des murs avec liège et polystyrène de 5cm d'épaisseur, peut réduire jusqu'à 59.09% le gain thermique globale et atteint une réduction jusqu'à 69.96% pour une épaisseur de 10cm.

Dans le bâtiment, les murs qui représentent de 16% à 25% des déperditions de chaleur sont souvent traités par l'isolation intérieure ou extérieure. Les déperditions thermiques sont limitées en recouvrant les éléments de maçonnerie du bâtiment d'une ou plusieurs couches d'isolant. L'isolation thermique par l'extérieur est beaucoup développée dans les pays du nord de l'Europe. Elle est considérée comme la plus efficace parce qu'elle permet d'éliminer presque tous les « ponts thermiques ».

L'isolation par l'intérieur, très répandue en France, est souvent accompagnée d'une isolation des combles pour traiter les déperditions par la toiture. Les ponts thermiques représentent de 10 à 40% de la perte totale de chaleur d'un bâtiment (www.cstb.fr). La majorité des immeubles en France ayant une isolation thermique par l'intérieur, le traitement des ponts thermiques devient nécessaire pour améliorer la performance thermique des bâtiments. Une des solutions est d'utiliser des rupteurs thermiques au niveau du raccordement entre le voile de façade et la dalle. La jonction classique est remplacée par un élément constitué de matières isolantes. Selon Lafarge (www.ductallafarge.fr), cette solution permet de réduire jusqu'à 70% la déperdition de l'énergie au niveau des ponts thermiques.

Une autre solution technique qui permet à la fois de traiter les déperditions au niveau des murs et des ponts thermiques est l'isolation répartie. Le principe de l'isolation répartie consiste à conserver le bénéfice des dispositifs de chauffage le plus longtemps possible grâce à la performance de l'inertie thermique de l'air. Elle repose principalement sur une maçonnerie en béton cellulaire ou en brique isolante de terre cuite dotée d'un réseau d'alvéoles. Les propriétés isolantes de ces matériaux reposent sur une forte présence d'air. Le matériau, ayant en même temps la fonction porteuse et la fonction isolante, permet de construire un mur extérieur à « isolation répartie ». La déperdition au niveau du pont thermique reste basse en raison de la capacité isolante du mur. L'intérêt de l'isolation répartie conduit à imaginer des éléments structurels des bâtiments au niveau du mur et en même temps au niveau du plancher. Cela exige un matériau ayant une bonne performance mécanique avec des propriétés d'isolation thermique améliorées.

I.6. Béton léger dans le domaine du génie civil

Les bétons légers, c'est à dire ceux dont la masse volumique à l'état sec est inférieure à 1800 kg/m³, sont employés dans le génie civil depuis le début du 20^{ème} siècle, dans les pays développés d'Europe (France, Allemagne), d'Amérique (USA) et d'Asie (Japon et ex URSS). Depuis lors, les applications ne cessent de se multiplier à cause des avantages que présente ce produit tant sur le plan économique que technique. Ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en réduisant la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton. Pour développer un tel béton, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières premières. En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction.

I.7 Les bétons de granulats légers

Le béton de granulat léger, BGL, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation du béton de granulat léger (BGL). Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scoria, etc.... Les Sumériens ont employé ceci dans le bâtiment Babylone dans le 3ème millénaire. Les Grecs et les Romains ont employé la ponce dans la construction des bâtiments. Certaines de ces magnifiques structures de l'antiquité existent toujours, comme la cathédrale de Sainte Sofie « ou le Hagia Sofia », à Istanbul, Turquie, construite par deux ingénieurs, Isidore de Miletus et Anthemius de Tralles, commissionné par l'empereur Justinian au 4ème siècle A.D. ; le temple romain, Panthéon, qui a été érigé en années A.D. 118 à 128 ; l'aqueduc prestigieux, Pont du Gard, ca établi. A.D.14 ; et le grand amphitheatre romain, Colosseum, construit entre A.D. 70 et 82. En plus de la construction des bâtiments, les Romains ont utilisé les agrégats naturels légers et les vases creux à argile afin de réduire le poids. Ceci a été également employé dans la construction des pyramides pendant la période maya au Mexique (Chandra, 2002).

Des briques poreuses d'argile ont été produites longtemps avant l'époque chrétienne, pendant la civilisation de Vallée Indus à peu près 2500 av. J.-C. Ceux-ci ont été employés dans la construction de deux villes, Mohenjo-Daro et Harappa. Ces briques poreuses ont été écrasées et ont employé en tant que agrégats de poids léger dans la maçonnerie. En Allemagne, au 19ème siècle, des morceaux poreux d'argile ont été produits par évaporation rapide de l'eau. Kukenthal de Brunswick a obtenu un brevet en 1880. L'utilisation industrielle des agrégats légers normaux en Allemagne a été commencée en 1845 par Ferdinand Nebel à partir de Koblenz qui a produit des blocs de maçonnerie à partir de la rénovation, avec la chaux brûlée comme reliure. En Islande, la ponce a été employée dans des industries du bâtiment locales depuis 1928. (Chandra, 2002).

La faible densité de la matière engendre une bonne isolation thermique et permet à la réduction de poids des structures. Aussi, l'épaisseur des toitures et des murs extérieurs peut être réduites. Par conséquence, si on garde la même épaisseur, un degré plus élevé d'isolation thermique sera réalisé. La densité, par exemple, peut s'étendre de 300 à 3000 kg/m³ ; la conductivité thermique de 0.1 à 3 W/mK; et la résistance de 1 à 100 MPa ou même plus. La densité est la plupart du temps commandé par le type d'agrégat utilisé. La résistance dépend également du type d'agrégats utilisés pour faire le béton léger.

I.8 Les granulats légers

I.8.1 Définition

Les granulats sont des substances granulaires formées d'un ensemble d'éléments solides, on peut définir trois catégories de granulat du point de vue densité, courants si la masse volumique réelle est comprise entre 2000 et 3000 kg/m³ et lourds au-delà de 3000 kg/m³ et légers lorsque elle est inférieure à 2000 kg/m³. Les granulats légers c'est l'ensemble de grains de dimension comprise entre 0 et 125mm, ce sont des matériaux inertes spéciaux caractérisés par une structure poreuse (structure alvéolée) qui mène à la réduction de la densité.

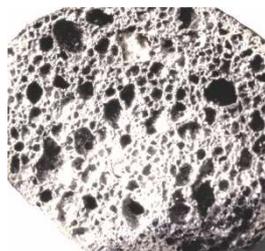


Figure I.5: structure alvéolée d'un granulat.

D'origine naturelle ou synthétique, en passant par des sous-produits de l'industrie et des traitements qu'elles ont subis, soit minérale dont la principale ressource naturelle est la matière volcanique, ou organique tels que polystyrène expansé, liège, copeaux, balle de riz, ect. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, la masse volumique. Toutefois, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance mécanique notamment à la compression, de ce fait, ils ont été utilisés particulièrement pour leurs propriétés thermiques plutôt que mécaniques.

I.8.2 Classification

Les granulats légers recouvrent une grande variété de produits, leur légèreté dont ils tiennent est le résultat du taux élevé des pores qui sont caractérisés par une structure interne alvéolée. Cette structure poreuse peut être naturelle ou artificielle par l'application d'un traitement thermique. Selon les caractères génétiques des matières premières, Arnould et Virlogeux (Arnould et al., 1986) ils ont classifié les granulats légers en deux grandes divisions naturelles et artificielles et quatre subdivisions communément, :

1. Matières premières naturelles,
 - Sans traitement thermique
 - Avec traitement thermique ;
2. Matières premières artificielles,
 - Sans traitement thermique
 - Avec traitement thermique.

I.8.2.1 Les granulats légers naturels sans traitement

Il s'agit des granulats légers naturels qui ne subissent aucune transformation autre que mécanique. Ce sont les agrégats naturels d'origine minérale, ils proviennent généralement de roche d'origine volcanique ou sédimentaire caractérisé par une structure interne poreuse. Tout comme les granulats usuels, diverses transformations mécaniques appliqués dans le but de rendre le produit approprié à la taille recherchée.

Parmi les matériaux naturels utilisés pour la production de granulats légers GL sont : le granulats de pierre ponce, de pouzzolane, vermiculite, de diatomite de tufs volcaniques etc. L'Algérie, possède une grande quantité de matériau pouzzolane naturelle d'origine volcanique, qui s'étend sur 160 kilomètres entre la frontière Algéro-marocaine et le sahel d'Oran. Le gisement de diatomite est situé à 5 Kms au Sud de Sig (ville de Mascara, Algérie), les réserves géologiques sont estimées à 6 500 000 t selon entreprise nationale des produits miniers non ferreux et des substances utiles. L'utilisation de la diatomite et de la pouzzolane en Algérie n'est encore utilisée que dans la fabrication du ciment.

I.8.2.2 Les granulats légers naturels ayant subi un traitement thermique

Ce sont les agrégats d'origine volcanique ou sédimentaire subis un traitement thermique pour augmenter le taux de porosité et donc soit plus légers que les granulats classiques avec une masse volumique sèche ρ_{granulat} inférieur à 1200 kg/m^3 .

On cite l'argile, schiste, d'ardoise, et la perlite ect, l'opération de traitement thermique rends les particules extrêmement légères (masse volcanique apparente inférieur à 150 Kg/m^3), en conséquence, ils sont employés principalement pour réaliser des composites ultralégers avec excellent critère d'isolation.

I.8.2.3 Les granulats légers artificiels ne subissant pas de traitement spécial

Le granulats léger artificiel ce sont les résidus d'un procédé industriel sans modifications thermiques. Il s'agit des granulats du mâchefer, sous production, résidu de la combustion du charbon ou des ordures ménagères. Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts-fourneaux, ainsi la cendre volante frittée qui est obtenue à partir de cendres volantes, résidus de la combustion du charbon pulvérisé.

I.8.2.4 Les granulats artificiels subissant divers traitements spéciaux

Ce sont des sous-produits de l'industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granulats légers. Parmi ces granulats, le laitier expansé ou granulé un sous-produit de la fabrication de la fonte dans les hauts-fourneaux. Les cendres volantes que l'on peut fritter, et le verre que l'on peut également l'expansé. Des

granulats d'argile, de schiste, d'ardoise, et de perlite expansés on de vermiculite exfoliée.

La perlite expansée s'obtient par traitement thermique de verres volcaniques de structure perlitique contenant une certaine quantité d'eau (rhyolite perlitique par exemple). Ce granulats n'est pas produit en Algérie, mais principalement aux USA et en Ex-URSS. En plus, la vermiculite fait partie des minéraux argileux comportant à l'état naturel deux couches de molécules d'eau entre deux feuillets élémentaire. Le traitement par la chaleur provoque l'écartement des différentes lamelles et l'on appelle ce phénomène l'exfoliation. Il faut enfin noter que ces deux types de granulats sont extrêmement légers (masse volcanique apparente inférieur à 150 Kg/m³) et son donc principalement employés pour réaliser des bétons isolants mais non porteurs.

I.8.2.5 Les matériaux organiques

Ce sont des matériaux organiques, soit d'origine végétale ou bien synthétique, cette catégorie présente une source très intéressante pour fabriquer les granulats légers. On peut citer les copeaux de bois (pin, sapin, bouleau), la tige de maïs, le chanvre, la coque de noix de coco, le bambou, et granulats de liège ce sont les produits végétaux les plus utilisés comme des granulats légers, tandis que les polystyrènes et les caoutchoucs ainsi les plastiques représentent les polymères d'origine synthétique. Enfin ces granulats contiennent de nombreux capillaires, entraînant une porosité élevée.

I.8.3 L'expansion des granulats

L'expansion est une opération importante pour la fabrication des granulats légers. Elle est définie par l'augmentation du volume d'une matière expansible par la création d'un gaz à l'intérieur généralement sous l'effet d'un traitement thermique. Selon Arnold, les procédés de fabrication usuels des granulats légers sont l'expansion en four rotatif ou la cuisson sur grilles (Arnould, 1986).

La première utilisation de la technique d'expansion était dans l'unité de production située à kansas-city par l'inventeur S.J. HAYDE qui déposa un brevet le 12 février 1918 pour la technique d'expansion de l'argile, de l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif (Arnould et al., 1986). L'expansion est influencée par plusieurs facteurs tels que la composition chimique de la matière première, la température de cuisson et la taille des granules, cette expansion est obtenue par cuisson à haute température (1000°C à 1400°C) dans des fours rotatifs ou des grilles de cuisson après un préformage des grains, la structure poreuse est conservée par le refroidissement rapide. L'expansion repose sur des dégagements gazeux à la température de grésage qui déforment le matériau. La structure poreuse est ensuite conservée par un refroidissement rapide (Arnould et al., 1986). L'expansion repose sur le phénomène d'alvéolage d'un matériau minéral, il a lieu lorsque deux conditions sont réunies (Arnould et al., 1986):

- Grésage prononcé qui rend le matériau déformable;

- les dégagements gazeux à la température de grésage qui déforment le matériau.

La phase essentielle de l'expansion exige une synchronisation parfaite entre le développement du caractère pyroclastique et les dégagements gazeux, sur une plage de température importante. En ce qui concerne les matériaux organiques, en plus des conditions citées pour les matériaux minéraux, la teneur d'un agent d'expansion est primordiale pendant la fabrication de granulats expansés (polystyrène expansé, caoutchouc,.....).

I.8.4 Propriétés des granulats légers

I.8.4.1 Porosité et absorption

Par définition les granulats légers sont des matériaux poreux caractérisés par une porosité totale beaucoup plus importante que celle des granulats de masse volumique normale. Ces pores, soit naturels ou générés artificiellement par l'opération d'expansion, sont caractérisés par sa surface caractéristique, sa tortuosité géométrique, et la distribution au sein du solide. Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité (entre 25 et 75 % du volume apparent)(Shink, 2003). Trois types des cavités sont générés en surface et à l'intérieur des particules expansé :

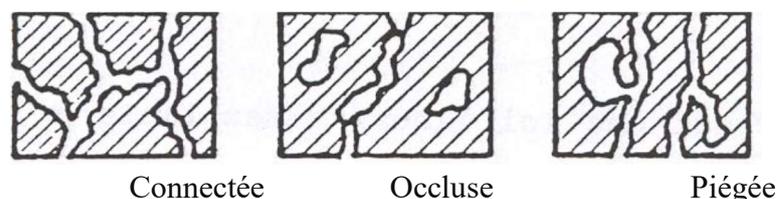


Figure I.6: Trois types de porosité présente dans les granulats (Cérézo, 2005)

On trouve de nombreux exemples de matériaux poreux, naturels ou artificiels dans la vie courante. Les granulats légers peuvent être considérés constitués d'un squelette solide et de l'espace poreux (Nguyen, 2013). Dans les granulats légers, on distingue trois types d'espace poreux (figure I.2): les pores ouverts et les pores fermés. Certains pores sont à l'intérieur du granulat, d'autres s'ouvrent à la surface libre. Comme les granulats légers contiennent des pores ouverts et interconnectés, l'eau peut rentrer à l'intérieur de ces pores. Par contre, les pores fermés sont isolés et ne participent évidemment pas à la pénétration de l'eau. Le volume et la vitesse de pénétration de l'eau dépendent principalement de la taille, la distribution, la connectivité et le volume des pores [Neville, 2000], [Clark, 1993]. Les données de la littérature montrent que l'absorption soit de l'humidité, soit de l'énergie thermique et acoustique est liée particulièrement à la taille, à la distribution et aux taux des pores. Elle joue un rôle capital pendant la fabrication des bétons légers.

Plusieurs recherches remarquent pendant la fabrication du béton à base des granulats légers qu'une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par ces granulats. Sur la figure (I.7), Zhang & Gjorv montrent l'absorption d'eau et le taux

d'absorption de quelques granulats légers (l'argile expansé et cendre volante frittée), d'ailleurs le taux d'absorption initial est très élevé : plus de 50 % de l'absorption est souvent complétée dès les toutes premières minutes. Cette absorption d'eau dépend toutefois de l'interconnexion des pores dans les granulats, du degré de saturation initial des granulats et du rapport eau/ciment de la matrice cimentaire (Shink, 2003). Par conséquent, une perte rapide de maniabilité se manifester sur ces bétons, néanmoins ces quantités absorbées par les granulats légers peut contribuer par suite à améliorer la microstructure de la matrice cimentaire aux interfaces pâte granulats par un effet de filtration ((Fagerlund, 1978) ; (Zhang & Gjrv, 1990) ; (Punkki & Coll,1996)). En effet, l'eau absorbée par ces granulats constitue une réserve pour l'hydratation subséquente de la matrice cimentaire ((Bentur & Coll, 2001) ; (Bentz & Snyder, 1999) ; (Kohn & Coll, 1999)).

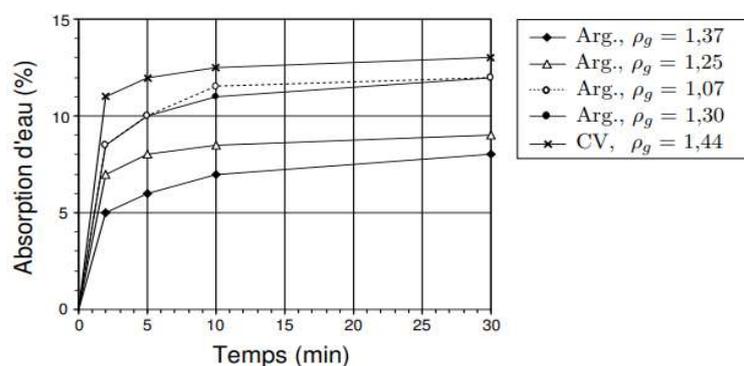


Figure I.7: Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g , d'après Zhang & Gjrv

Dans l'ouvrage d'Arnold, les granulats minéraux légers présentent, par rapport aux granulats traditionnels, la particularité d'absorber de l'eau. Un granulat léger utilisé sec pour la confection du béton a tendance à absorber une quantité assez importante d'eau de gâchage. Cependant, l'utilisation de ces granulats à l'état saturé d'eau il ne se produit évidemment aucune absorption des granulats légers (figure I.8). Alors, le traitement de surface des granulats légers s'avèrent très efficaces pour contrôler l'absorption l'humidité ((Virlogeux, 1986).

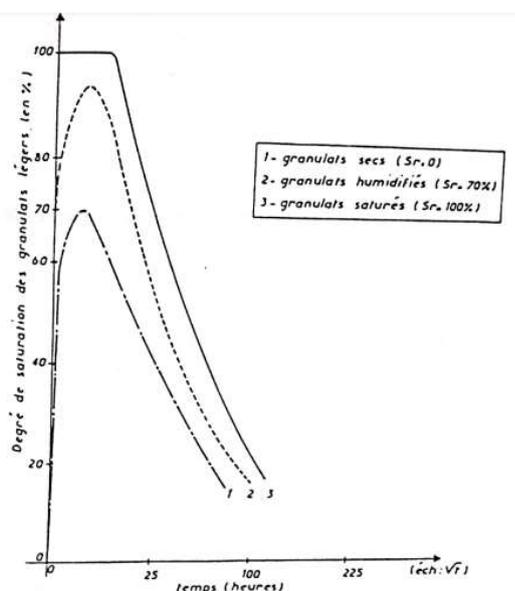


Figure I.8 : Evolution dans le temps de la quantité d'eau contenue dans les granulats légers (Virlogeux, 1986)

Par ailleurs, la porosité des granulats manufacturés varie proportionnellement à la taille des grains. Par conséquent, plus la taille des granulats diminue, moins ils sont poreux et plus leur densité apparente augmente. La porosité peut également dépendre du préformage avant l'expansion (Shink, 2003).

I.8.4.2 Légèreté

La masse volumique apparente en vrac d'un granulat léger est sa caractéristique la plus fondamentale, car elle a des conséquences directes et importantes sur les performances des bétons fabriqués. La majorité des granulats usuels ont des densités comprises entre 2,40 et 2,90 tandis que celle des granulats légers est inférieure à 1.200 environ. Ce type de granulat présente une structure poreuse. Ils ont employé comme gros ou fin granulats dans les composites cimentaires. Le volume des vides varie généralement de 30 à 45 % pour les gros granulats et de 40 à 50 % pour les granulats fins.

Tableau I.2: Masse volumique des granulats légers (Coquillat et al., 1986)

Granulat	Masse volumique apparente en vrac (Kg/m ³)	Masse volumique du grain (Kg/m ³)
Leca 3/8	520	950
Argi 16(4/12)	510	850
Isol « S »	660	1210
Surex 675	700	1190
Galex 3/8	830	1610

Selon les données de la littérature, emploi des granulats légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons classiques.

Grâce à ses légèretés, les granulats légers trouvent plusieurs applications dans les travaux de bâtiment et de génie civil. Plusieurs recherches ont été concentrée sur l'exploitation des granulats légers afin de concevoir un béton de granulat léger ((Arnold et al., 1986); (S. Chandra, 2002) ; (M. Shink, 2003) ; (V. Cérozo, 2005).....).

Dans le cas de remplacement du sable alluvionnaire par du sable léger, selon Nguyen une augmentation de la porosité des bétons a été induite et donc une diminution de la masse volumique de ces derniers. La Figure (I.9) montre la relation entre la masse volumique des bétons et le taux de remplacement du sable.

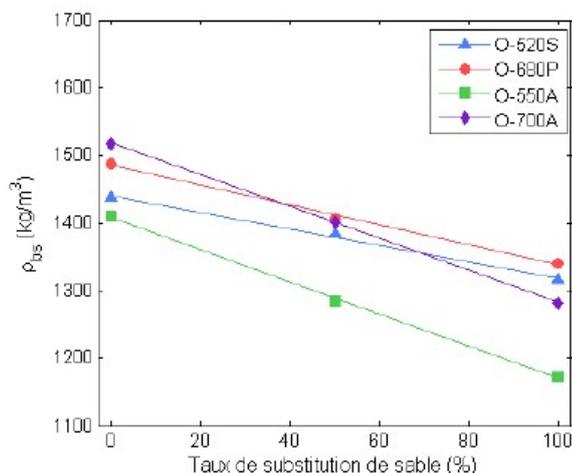


Figure I. 9: Évolution de la masse volumique des bétons en fonction du taux de substitution du sable naturel par du sable léger (Nguyen, 2013).

Les bétons de granulats légers à 0% de sable léger ont une masse volumique variant entre 1410 et 1520 kg/m³ pour les bétons BO. La substitution totale du sable naturel silico-calcaire par du sable léger permet d'atteindre des masses volumiques sèches comprises entre 1170 et 1340 kg/m³. La densité du sable de schiste expansé étant plus élevée (1,6) que celle de l'argile expansée et la ponce (1,4 environ), la substitution par du schiste expansé diminue dans une moindre proportion la densité du béton. Nguyen affirme que L'utilisation des gravillons de masses volumiques équivalentes (520S (schiste expansé) vs 550A (l'argile expansée) et 680P (Pouzzolane) vs 700A) permet d'obtenir des bétons de masses volumiques comparables.

En 2007, Bouabdallah et al., ont étudiés l'effet du taux de remplacement des déchets de bois comme granulat de substitution dans la masse du composite cimentaire. Ils rapportent que l'effet de la substitution d'un pourcentage qui varie entre 10% et 20% des classes de granulats (0/3, 3/8 et 8/15) par les déchets de bois non traité et traité qui donnent un béton bois léger, montre une diminution de la masse volumique qui augmente avec l'accroissement de la quantité des granulats substitués (figure I.10).

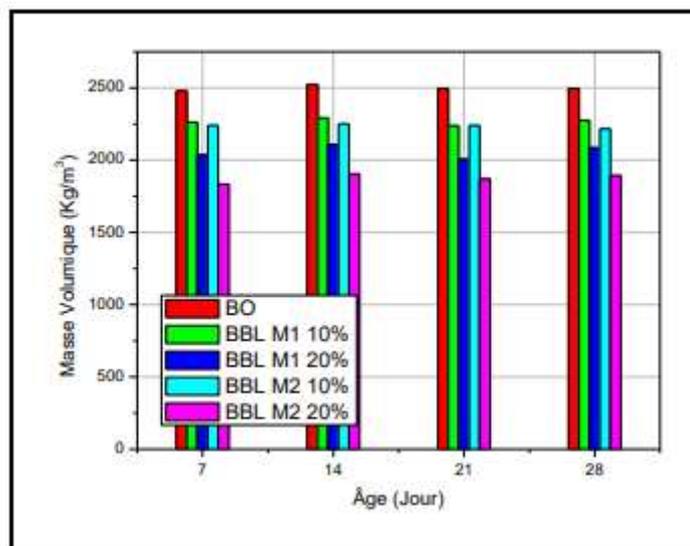


Figure I.10: Masse volumique en fonction d'âge (Bouabdallah et al., 2007)

I.8.4.3 Comportement et performances mécaniques

Généralement la résistance mécanique d'un béton repose essentiellement sur les caractéristiques la résistance des granulats. La caractérisation mécanique est basée sur les essais de compression et de traction, malheureusement ces essais sont inappropriés de les appliquer sur les granulats car ils exigent une géométrie régulière et fixe. Les essais classiques « routiers » (Los Angeles, fragmentation dynamique, micro-Deval, ...) sont imprécis et peu représentatifs notamment pour les produits fragiles (granulats légers). Compte tenu de la variabilité qui existe entre chaque grain (porosité, densité, forme, dimensions, irrégularités, etc.), la caractérisation des propriétés mécaniques des granulats légers exige plus des méthodes qui doivent s'adapter à la spécificité des granulats légers.

À ce jour, on ne trouve que peu de recherches caractérisent efficacement la résistance des granulats légers. P. Gaudon et R. Struillou citent trois essais en vue d'une meilleure compréhension du rôle de divers paramètres de la résistance des granulats légers. L'essai le plus classique est l'essai « au pot » dérivé directement de la norme soviétique GOST 9758-68. D'après Virlogeux, il est le plus facile à réaliser, et le plus utilisé. Toutefois, ses résultats ne sont pas représentatifs de la résistance des granulats confinés au sein du béton (Arnould et al., 1986). Il se réalise par mesure de la pression nécessaire pour enfoncer de 20 mm un piston dans un récipient rempli de granules (figure I.11). Pour fournir un chiffre représentatif de la résistance mécanique moyenne des granules utilisés, il doit se faire sur des fractions granulométriques très serrées et vibrées; sinon le résultat reflète en grande partie l'étalement de la courbe granulométrique et l'arrangement des grains. Son résultat est, en général, appelé «résistance conventionnelle au pot».



Figure (I.11) : Essai de résistance conventionnelle au pot des granulats légers. (Arnold et al., 1986).

Ensuite, le CTTB a mis au point un autre essai dit de «compression isostatique» consistant 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 (figure I.12).

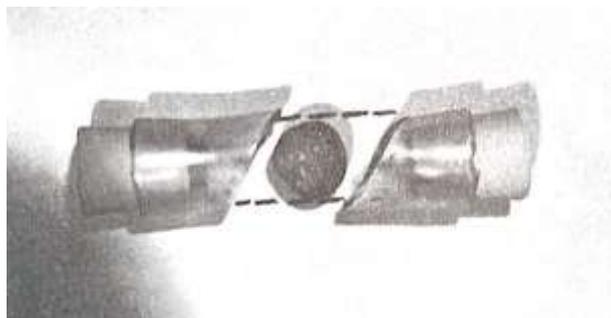


Figure (I.12): Essai de résistance des granulats légers à la presse hydrostatique (Arnold et al., 1986).

ARMINES aussi mis au point un essai nouveau dit «de rupture au fil», consistant à rompre les granules par serrage dans la boucle d'un fil (figure I.13). Chaque granule 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: $f_{tg} = F/S$.

Des essais sur cylindres ont montré que f_{tg} vaut environ le tiers de la résistance f_{tb} à la traction indirecte brésilienne : $f_{tb} \approx 3 f_{tg}$. D'ailleurs, l'essai au fil coupe chaque granule en deux parties très nettes, idéales pour les observations et les caractérisations complémentaires. En plus, l'essai est très rapide et facile à mettre en œuvre même sur chantier. Cet essai au fil permet donc une étude particulièrement fine des paramètres de la résistance mécanique des granules légers. (Gaudon et al., 1986).

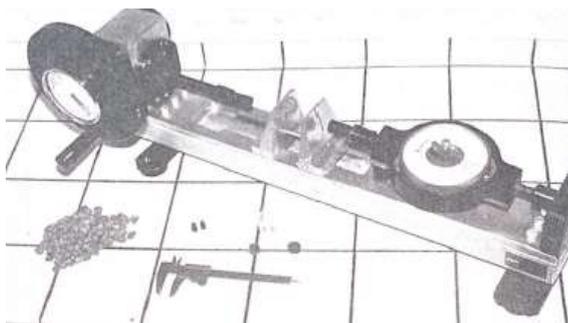


Figure I.13 : Essai de résistance des granulats légers au fil d'Armines. (Arnold et al., 1986)

La détermination de déformabilité des granulats légers est difficile, Muller-Rochholz a développé une méthode dynamique permet d'évaluer le module élastique des granulats légers par des mesures de vitesse de propagation d'ondes à ultrasons (Shink, 2003). Cette méthode nécessite toutefois des équipements particuliers qui sont peu disponibles. Dans l'ouvrage d'Arnold, le manuel « lightweight concrete » édité par la FIP et CEB donne une évaluation du module de déformation dynamique des granulats (Figure I.14), notée E_g , en fonction de la densité apparente des granulats légers ρ_g :

$$E_g = 8000 \cdot \rho_g^2 \quad \dots\dots\dots (I.1)$$

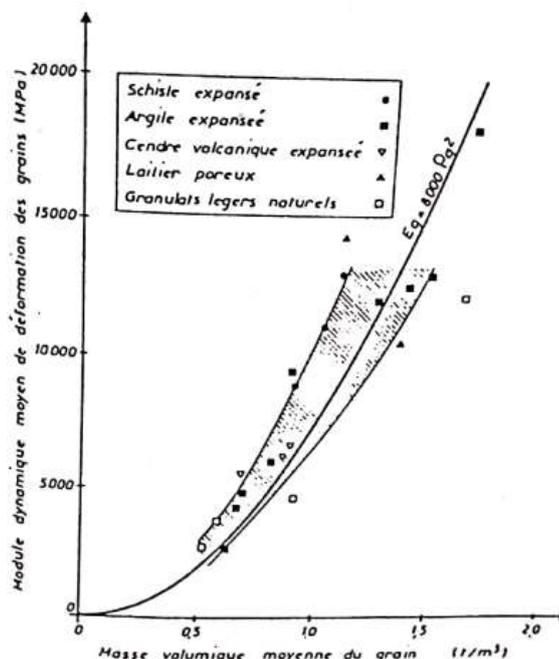


Figure I.14 : évaluation du module de déformation en fonction de la masse volumique des grains (M. Virlogeux, 1986)

Le module dynamique des granulats rigides est beaucoup plus élevé par rapport à celle des granulats légers. En effet, le module d'élasticité d'un béton léger atteint la proportion de $\frac{1}{2}$ à $\frac{3}{4}$ de celui d'un béton traditionnel de même résistance (ACI213, 2003).

Le tableau (I.3) présente le module de cisaillement, G_g , le coefficient de Poisson, ν_g , et le module élastique, E_g , en fonction du diamètre, D , et de la densité apparente des granulats, ρ_g , pour quelques granulats d'argile expansés.

Tableau I.3 : Propriétés élastiques des granulats d'argile expansés,

(Muller-Röschholz, 1979).

Granulats	D (mm)	ρ_g	G_g (GPa)	ν_g	E_g (GPa)
Liapor F3	4-8	0,7	2,1	0,21	5,2
	8-12,5	0,6	1,9	0,18	4,4
Liapor F6	4-8	-	4,5	0,22	10,9
	8-12,5	1,1	5,7	0,19	13,5
Liapor F8	4-8	-	7,4	0,16	17,1
	8-12,5	1,5	7,5	0,16	17,3

I. 9 Zone d'interphase « granulat-pâte cimentaire »

La liaison qui se crée à l'interface granulat / pâte de ciment connue par la zone d'interface de transition entre les granulats et la matrice cimentaire. Elle est définie comme étant la zone de pâte située dans le voisinage immédiat des gros granulats. Même si la zone inter-faciale la plus importante est celle qui se développe en bordure des gros granulats, une telle zone existe également en bordure des granulats fins, mais son épaisseur est plus faible (Neville, 2000). Dans le cas du béton à base des granulats rigides, la résistance est plus élevée que celle de la pâte cimentaire. De plus, les contraintes imposées au béton, entraînent des déformations importantes dans la pâte et négligeables dans le granulat, et la microfissuration dans le béton provient généralement de la zone inter-faciale et que, à la rupture, le réseau de fissuration passe par ces interfaces. Par conséquent, l'adhérence de la pâte cimentaire aux granulats joue un rôle capital à la résistance à la traction et à la fragilité du béton.

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides. Dans le béton de granulat léger, Ke et al. (2010) ont observé les propriétés de la zone d'interface entre les granulats légers et la pâte cimentaire pour différents types de bétons légers quand les propriétés de la pâte sont modifiées. Ces observations ont montré que l'épaisseur de cette zone augmente dans le cas d'une pâte ordinaire et peut atteindre 100 μm . Cependant, la zone inter-faciale est presque inexistante quand une pâte à haute performance est utilisée. De plus, la qualité microstructurale des interfaces pâte-granulats rigide est inférieure à celle des bétons de granulats légers. La figure (I.15) identifie les différents mécanismes d'interaction physique, chimique et mécanique, sans compter l'influence du faible module élastique des granulats sur la microfissuration des interfaces (Shink, 2003).

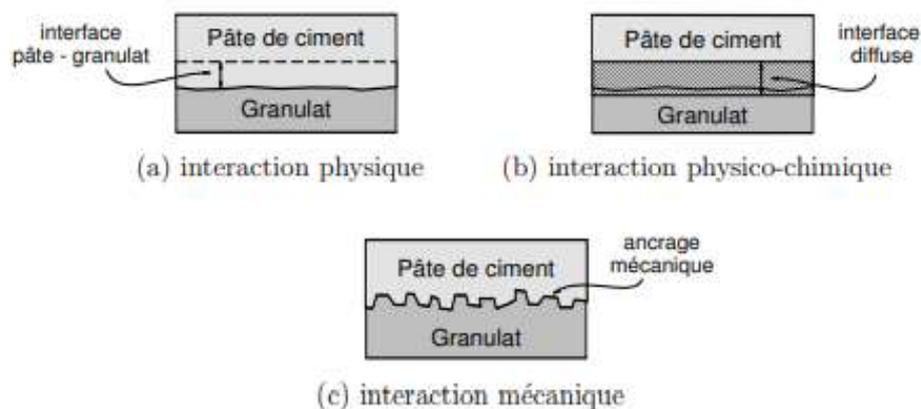


Figure I.15: Interface pâte-granulats et mécanismes d'interaction (Zhang et al, 1990).

Selon la littérature, plusieurs granulats légers préformés sont recouvert d'une mince couche plus ou moins rigide qui isole la structure poreuse des granulats. Dans le cas où cette couche est très dense, la microstructure des interfaces est alors semblable à celle observée dans les bétons de granulats rigides et qu'elle peut contenir de larges cristaux de portlandite et des aiguilles d'ettringite. (Shink, 2003). Cependant, dans le cas dont la couche protectrice des granulats est moins rigide la microstructure de la zone d'interface est plus dense et plus homogène. La densification de la matrice est associée au processus physique d'absorption d'eau des granulats qui diminue localement le rapport eau/ciment de la matrice cimentaire (figure 15.a). L'absorption de l'eau de gâchage dépend toutefois du degré de saturation initial des granulats. (Shink, 2003).

La figure (I.15.b), présente le schéma du phénomène d'interaction physico-chimique entre pâte cimentaire et la phase granulaire. Dans la recherche de Shink, Wasserman et Bentur ont remarqué des interactions chimiques se produisent entre les différentes phases au cours du processus d'hydratation peut contribuer à augmenter la résistance à long terme des bétons avec granulats de cendres volantes frittées. Ainsi, une très faible activité pouzzolanique semble possible entre les granulats légers (argile expansés et cendres volantes frittées) et la matrice cimentaire ((Zhang et al., 1990), (Sarkar et Coll, 1992)). Enfin, la rugosité et la cavité de la surface sont deux paramètres capitaux définis l'état de surface des granulats. D'ailleurs, l'effet de l'état de surface peut être expliqué par la théorie de l'ancrage mécanique (Farran, 1956). Cette théorie consiste en un ancrage mécanique de l'adhésif dans les cavités, les pores et les aspérités de surface du solide. Cet ancrage mécanique, qui améliore l'adhérence des granulats à la matrice cimentaire, dépend de la texture des granulats, de la taille des grains de ciment et de la viscosité de la matrice (figure I.15.c). L'absence de portlandite améliore également la résistance de l'interface (Zhang et al., 1990). Ainsi, les caractéristiques minéralogiques des granulats fins et les granulats ayant une couche externe poreuse ont une influence sur la microstructure de l'auréole de transition, ils entraînent la formation d'une zone plus dense (Neville, 2000).

I.10 Béton de polystyrène expansé (PSE)

I.10.1 Généralités

Le polystyrène expansé (PSE) est un matériau de construction ultraléger qui est capable de concevoir un béton léger et d'améliorer certaines de ses propriétés, notamment celle de l'isolation. Depuis sa reconnaissance en tant que matériau isolant conventionnel dans les années 1950, PSE a connu des progrès rapides dans d'autres nouvelles mises en œuvre. Actuellement, le polystyrène expansé est utilisé dans de nombreuses parties de bâtiment en raison de son avantage en termes de durabilité et d'amélioration en termes d'efficacité énergétique, de durabilité et de qualité de l'environnement intérieur.

Les bétons à base de polystyrène expansé sont utilisés à partir de 1978 notamment pour la réhabilitation, et aussi pour des ouvrages neufs (forme de pente, terrasse, panneaux légers, remplissage). Ainsi, pour fabriquer également des enduits légers à base de billes de polystyrène expansé. Bien utilisé, ce type de béton permet d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction. Le béton léger de polystyrène expansé se caractérise par sa faible masse volumique peut atteindre 300 Kg/m³, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermo-acoustique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction.

Grâce à la légèreté du polystyrène expansé on peut atteindre à des densités très basses. En outre, grâce à l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance, ces bétons de polystyrène peuvent avoir des résistances de bétons de structure. Par conséquent, ils représentent, grâce à leur légèreté, une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art et d'offshore. Par ailleurs, les bétons légers de polystyrène ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments (Milled, 2005).

Actuellement, des millions de tonnes de déchets de polystyrène sont produites dans le monde. Le concept de développement durable exige les réglementations nationales et internationales en matière d'environnement à devenir de plus en plus rigides, ce qui a rendu l'élimination de ce déchet obligatoire. Toutefois, le polystyrène est respectueux de l'environnement, est un produit écologique, il n'est certes pas biodégradable mais il est recyclable à l'infini. Alors, la valorisation du polystyrène expansé est intéressante notamment aux secteurs du bâtiment, que le polystyrène soit neuf ou issu de bâtiments existants. D'ailleurs, les billes PSE peuvent être utilisées pour produire des bétons de faible densité requis pour des applications de construction telles que des panneaux de revêtement, des murs-rideaux, un système de plancher composite et des blocs de béton

porteurs. Ainsi, de meilleures propriétés d'isolation thermique et acoustique. Dans ce sens, les résultats trouvés par Bogdan Rosca montrent qu'il est possible de produire du béton léger de qualité structurale à base des billes de polystyrène expansé PSE qui assure la légèreté et en utilisant comme particules grossières des agrégats de briques recyclées et en appliquant un procédé similaire de mélange, de manipulation, de placement et de compactage.

I.10.2 Propriétés physico-mécaniques des bétons de PSE

Tout comme les bétons légers, plusieurs paramètres influencent la structure interne du béton de PSE (matrice / granulats). Du fait des hétérogénéités matricielles, des différences de porosité et de composition chimique, les bétons de polystyrène expansé peuvent présenter des propriétés physiques et mécaniques très variables. Les facteurs de cette variabilité sont: la taille et la fraction volumique des billes de PSE dans le composite, la composition de la matrice cimentaire, les additions minérales, l'agressivité du milieu et la haute température.

I.10.2.1 Effet de fraction volumique en billes de PSE

Le comportement mécanique du béton de granulats légers est différent de celui des bétons de granulats classiques dont les granulats de densité courante. La fraction volumique des granulats joue un rôle primordiale dans la résistance mécanique du béton de granulats légers comme la résistance des granulats légers est inférieure à celle de la matrice (Clarke et al., 1993 ; Midess et al.,2003). Dans ce sens, Mindess et al. ont proposé une méthode pour relier la résistance en compression σ_c du béton avec celles des granulats légers σ_a et de la matrice cimentaire σ_m et leurs fractions volumiques, pour les bétons fabriqués à partir de sable de rivière :

$$\sigma_c = \sigma_a^n \times \sigma_m^{1-n} \dots\dots\dots(I.2)$$

Virlogeux a proposé d'utiliser le rapport du volume absolu de granulats légers, G, au volume de sable, S, ce rapport G/S joue un rôle considérable pour contrôler la masse volumique et la résistance en compression du béton de granulats légers. Plus G/S augmente, plus la proportion de granulats légers augmente, et plus la résistance diminue. Ainsi, il a trouvé que le rapport G/S devrait être compris entre 1,5 et 1,8 afin d'avoir une faible masse volumique et une forte résistance,

Comme on s'y attendait, pour tous types de composite cimentaire à base de billes en PSE, l'augmentation de la fraction volumique de ces billes a influencé positivement la diminution de la masse volumique apparente et négativement la diminution de la résistance à la compression. Ceci est logique étant donné que la résistance des granulats légers est inférieure à celle de la matrice cimentaire. Selon Cook (1983), le béton de polystyrène expansé, connu par sa faible résistance, est utilisé principalement pour les panneaux non porteurs préfabriqués, les blocs creux et solides, les panneaux sandwich légers et dans la construction routière comme partie de la couche de base. Donc, son

utilisation est donc limitée aux éléments non structuraux. Dans ce contexte, plusieurs chercheurs s’y sont approfondis ((Ravindrarajah et al., 1993) ; (Kuhail , 2001) ; (Babu et al., 2003) ; (Herki et al.,2013) ; (Ferrandiz et al., 2014) ; (Aasif et Shree, 2018) ; (Vakhshouri et al., 2018) ; (Askar et al., 2019) ; (Dixit et al., 2019) ; (koksal et al., 2020)).

L’influence de la fraction volumique de billes de PSE sur la résistance en compression du béton a été étudiée par Y. Xu et al., (2012). Ils ont choisi la méthode de Taguchi, qui était une approche statistique et systématique, pour découvrir plus des informations sur la relation entre la composition élémentaire et les propriétés du béton de PSE. Leur but est de fabriquer les briques légères à base des billes de PSE. Par conséquent, neuf expériences ont été réalisées (Tableau I.4).

Tableau I.4: les quantités des différents mélanges (Y. Xu et al., 2012)

Levels	Factors			
	Cement (kg/m ³)	W/C	Volume of EPS (per unit volume of concrete) %	Sand ratio %
1	400	0.45	15	35
2	450	0.50	20	38
3	500	0.55	25	41

Ils ont résumé la conception du réseau orthogonal de Taguchi pour les bétons légers de PSE et les résultats de la densité et de la résistance à la compression dans le tableau (I.5).

Tableau I.5: Réseau orthogonal L9 et résultats expérimentaux (Y. Xu et al., 2012).

Mix number	Cement	W/C	Volume of EPS	Sand ratio	Density ρ (kg/m ³)	Compressive strength f_c (MPa)	
	A	B	C	D		7 days	28 days
1	A 1	B 1	C 1	D 1	2060	15.22	20.77
2	A 1	B 2	C 2	D 2	1890	11.15	14.79
3	A 1	B 3	C 3	D 3	1720	8.17	11.22
4	A 2	B 1	C 2	D 3	1880	13.02	17.86
5	A 2	B 2	C 3	D 1	1800	7.31	7.85
6	A 2	B 3	C 1	D 2	1930	10.33	15.68
7	A 3	B 1	C 3	D 2	1730	10.48	13.52
8	A 3	B 2	C 1	D 3	1950	13.21	18.56
9	A 3	B 3	C 2	D 1	1790	8.91	12.98

Selon le tableau (I.5), la densité du béton léger de PSE variait d'environ 1700 kg/m³ à 2100 kg/m³. Donc, il y a une économie de poids mort entre 10% et 30%, si la densité du béton de poids normal conventionnel est considérée comme 2400 kg/m³. Ils ont déclaré, après ces résultats, que le paramètre le plus efficace et le plus dominant qui affecte la densité est le volume des billes de PSE, puis le rapport eau-ciment et la teneur en ciment, tandis que le rapport sable joue un rôle comparativement moins important. Les principaux rôles des paramètres par rapport à la densité du béton léger de PSE sont dessinés à la Figure I.16. Les valeurs de densité des bétons produits sont clairement ont

montré une diminution presque linéaire à mesure que le volume des billes de PSE augmentait.

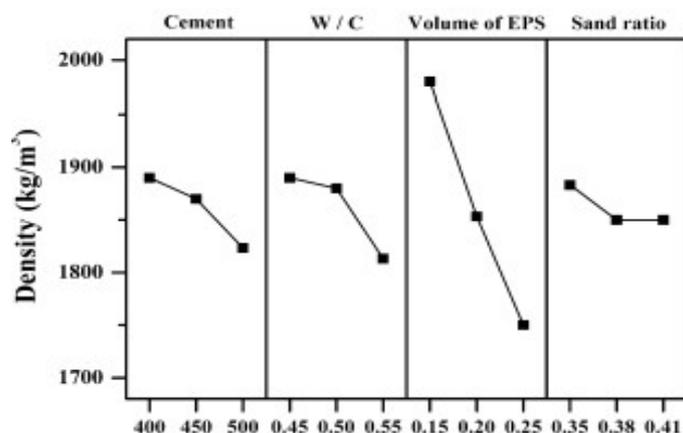


Figure I.16: Effet des facteurs sur la densité (Y. Xu et al., 2012).

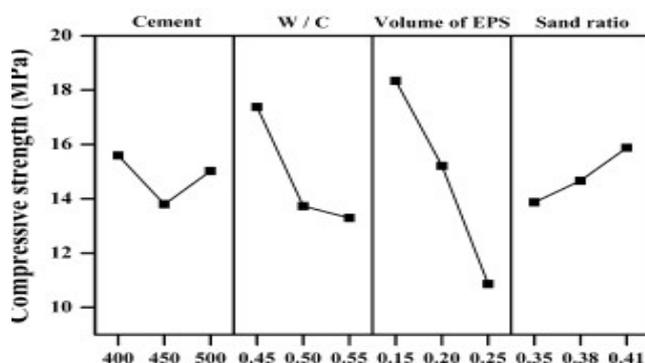


Figure I.17 : Effet des facteurs sur la résistance à la compression à 28 jours (Y. Xu et al., 2012).

Selon la Figure (I.17), l'augmentation du volume de PSE et du rapport E/C diminue la résistance à la compression, tandis que l'augmentation de la valeur du pourcentage de sable augmente la résistance à la compression du béton léger PSE. Enfin, Y. Xu et al mentionne que le béton à base des billes de polystyrène peut être utilisé comme matériau isolant thermique structurel ou pour produire des blocs de maçonnerie ((Y. I. Xu et al., 2012);

Makhmud Kharun, Alexander P. Svintsov (2017) , ils ont développé un mélange de béton de polystyrène armé qui comprend du polystyrène expansé, du polystyrène broyé, du ciment portland de type I, du gypse, de la gaze, de la fibre d'amiante chrysotile, une solution aqueuse de plastifiant de polyacrylamide, de la carboxyméthylcellulose, de l'acide tartrique, de la résine de bois saponifiée et de l'eau pour le mélange. Ils ont trouvé que cette composition développée permet d'obtenir un mélange de béton de polystyrène dans une méthode simple avec une distribution uniforme des granules en volume et avec des déformations de retrait minimales, sans exfoliation et sans prise dans le temps prévisible suffisant pour le transport du lieu de

production au chantier de construction. La figure (I.18) montre la vue générale des échantillons produits à partir du mélange de béton de polystyrène.

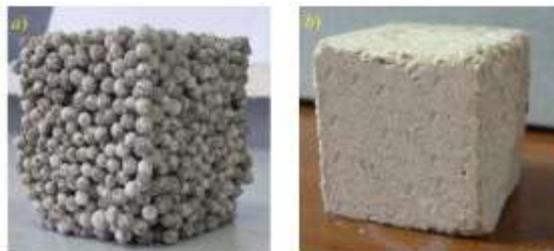


Figure (I.18) : Échantillons de mélange de béton de polystyrène (a) Densité moyenne de D200 sur les billes de polystyrène expansé ; b) densité moyenne de D600 sur le polystyrène broyé).

Ils ont analysé les résultats de la résistance à la compression en fonction de la densité du matériau élaboré. La figure (I.19) montre le diagramme de résistance à la compression, basé sur les données expérimentales, en fonction de la densité de béton de polystyrène conçue. Cette analyse a montré la présence d'un couplage non linéaire de la résistance à la compression avec la densité du béton polystyrène. Avec l'augmentation de la densité du béton de polystyrène, la résistance à la compression augmente de façon exponentielle avec le coefficient de détermination $R^2 = 0,994$. L'augmentation de la résistance du béton de polystyrène est causée non seulement par la quantité de liant minéral, mais aussi par la quantité d'additifs structurants et minéraux, ainsi que par la fibre de renforcement résistante aux alcalis de l'amiante chrysotile.

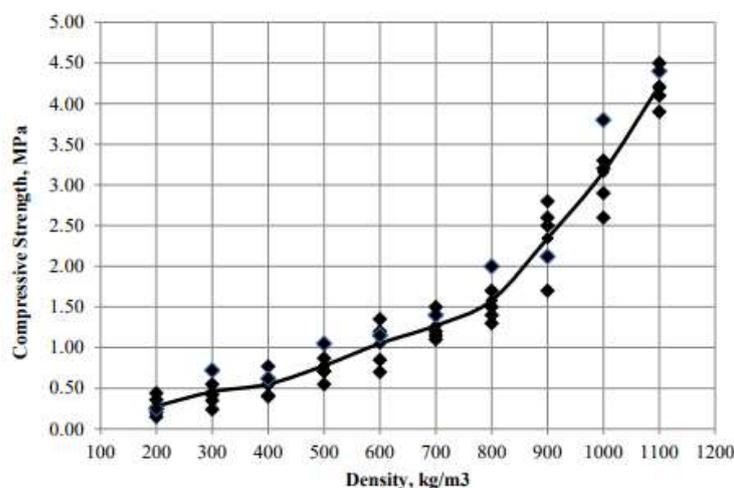


Figure I.19 : Changements dans la résistance à la compression du béton de polystyrène en fonction de différente densité. (Kharun, 2017).

Pareillement, Aasif et Shree ont aussi examiné l'influence de la fraction volumique de billes de PSE sur la densité et la résistance des bétons de PSE. Ils ont fabriqué un béton léger par le remplacement de différentes proportions en polystyrène avec des granulats grossiers 5%, 10%, 15%, 20%, 25% dans un mélange en béton de classe 20 MPa (M20). Les résultats obtenus ont été comparés à ceux du béton conventionnel. Ces

résultats ont montré que la quantité de billes de polystyrène incorporées dans le béton influence les propriétés du béton durci.

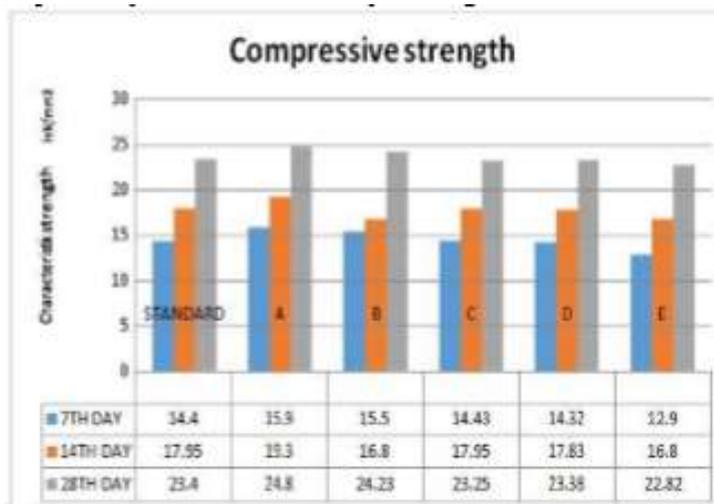


Figure I.20: la résistance à la compression des différents teneurs en billes de PSE (Aasif et al., 2018).

À 28 jours, il a été constaté que la résistance à la compression de 5%, 10%, 15%, 20% et 25 % PSE incorporés, les résistances du béton étaient de 91 %, 77 %, 71 %, 63 % et 57 %, respectivement, par rapport au béton sans billes de PSE (Figure I.20). L'utilisation du remplacement partiel d'agrégats grossiers par de billes de polystyrène dans le béton offre une solution prospective à l'industrie de la construction. (Aasif et al., 2018).

I.10.2.2 Effet de taille des billes de PSE

À l'échelle mésoscopique, l'effet de taille se manifeste, il caractérise la dépendance des performances mécaniques des matériaux à la taille de leur microstructure. À travers la littérature (Parant, 1999; Saradhi Babu, 2002; Le Roy et al., 2005; Laukaitis et al., 2005) il a été constaté que la taille des billes de PSE influe de façon importante sur les propriétés mécaniques du béton de polystyrène expansé. Ces chercheurs mentionnent que la résistance en compression du béton de PSE diminue sensiblement lorsqu'on augmente la taille des billes de polystyrène. Parant et Le Roy ont observé une chute d'environ 50% de la résistance du béton léger en remplaçant des billes de diamètre 1mm par des billes de diamètre 6mm (Figure I.21). Ils ont observé aussi que cet effet de taille diminue lorsqu'on augmente la porosité du béton (la fraction volumique en polystyrène) jusqu'à devenir négligeable pour les bétons présentant une très forte porosité.

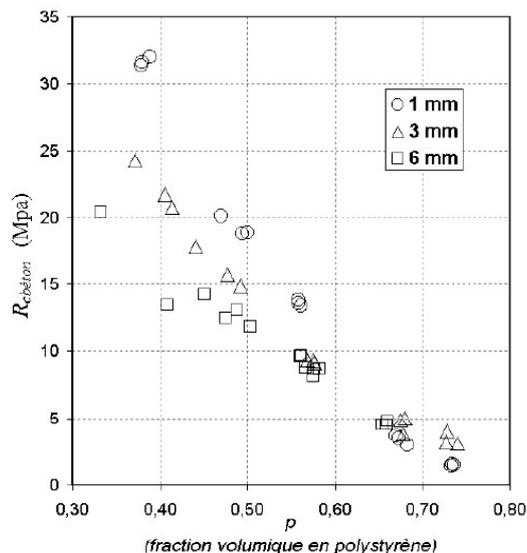


Figure I.21 : Effet de taille sur la résistance en compression du béton léger de polystyrène expansé (Le Roy et al., 2005).

L'effet de taille sur la résistance en compression du béton de polystyrène a été confirmé par Ganesh Babu et Saradhi Babu (2002) sur des bétons légers de structure ayant des densités comprises entre 1850 kg/m³ et 1440 kg/m³ et renfermant deux tailles des billes (4:75 et 6:3mm). Dans leur article (Ganesh Babu et Saradhi Babu, 2002), ces auteurs ont juste mentionné la présence de cet effet de taille sans donner une explication à son origine physique.

De plus, Laukaitis et al. (Laukaitis et al., 2005) ont aussi confirmé la présence d'un effet de taille dans un ultra léger béton de densité comprise entre 300 kg/m³ et 150 kg/m³ et constitué d'une matrice mousse (pâte + polystyrène émietté) et de billes de polystyrène expansé. En effet, pour une densité égale à 275 kg/m³, ils ont observé une augmentation dans la résistance en compression de ce béton de 40%, en remplaçant des grosses billes (diamètres compris entre 5 et 10 mm) par des petites billes (diamètres compris entre 2.5 et 5 mm). Laukaitis et al. ont expliqué l'effet de taille par le fait que les petites et grosses billes de polystyrène expansé n'ont pas la même morphologie, ce qui implique des propriétés mécaniques différentes au niveau de l'interface entre ces billes et la matrice mousse.

Enfin Milled et al., ont confirmé la présence de l'effet de taille des billes de PSE sur la résistance mécanique à la compression dans les bétons de PSE. Cet effet de taille dépend aussi de la macroporosité du béton puisqu'il diminue progressivement lorsque la porosité du béton augmente, jusqu'à devenir quasiment absent pour les très fortes porosités (Milled et al., 2005). Donc la résistance à la compression du béton léger en polystyrène expansé (PSE) augmente significativement avec une diminution de la taille des billes de polystyrène, pour la même densité de béton.

I.10.2.3 Effet du dosage en ciment (matrice cimentaire)

Les propriétés mécaniques d'un composite cimentaire sont souvent reliées au dosage en ciment. Neville (2000) a montré que l'augmentation du dosage en ciment influé de façon bénéfique sur les caractéristiques mécaniques pour plusieurs types de bétons de granulats légers jusqu'à un optimum. Dans la figure (I.22), les courbes convergent vers une valeur proche de 70 MPa pour les teneurs dépassent 600 Kg/m³. Il s'agit donc d'une résistance plafond du béton léger : à partir d'un certain seuil, une augmentation du dosage en ciment ne conduirait plus à une amélioration de la résistance (Neville, 2000).

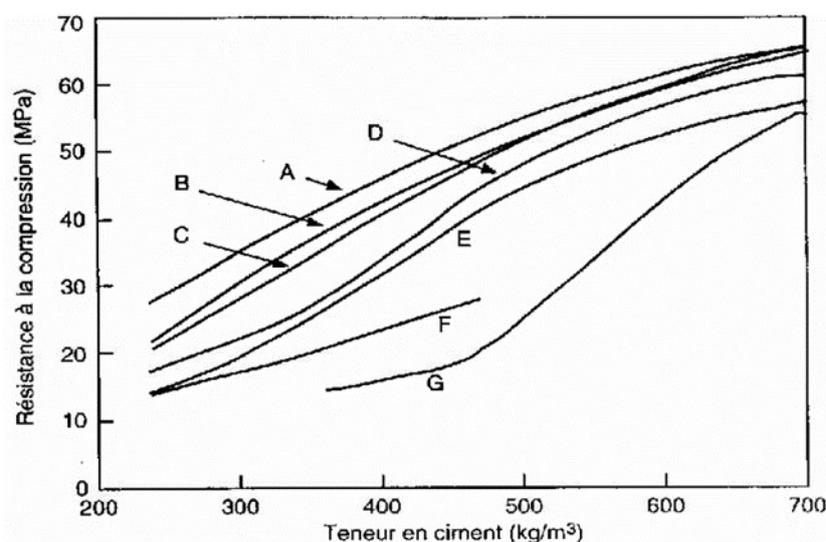


Figure I.22 : La résistance à la compression en fonction de la teneur en ciment ((Neville, 2000).

Kuhail (2001) a formulé plusieurs classes de mortiers à base de polystyrène expansé. Il déclare que lorsque la teneur en ciment est élevée, la résistance mécanique est élevée ainsi. D'ailleurs l'effet de la teneur en ciment se voit clairement à partir des lignes de tendance indiquées sur la figure (I.23).

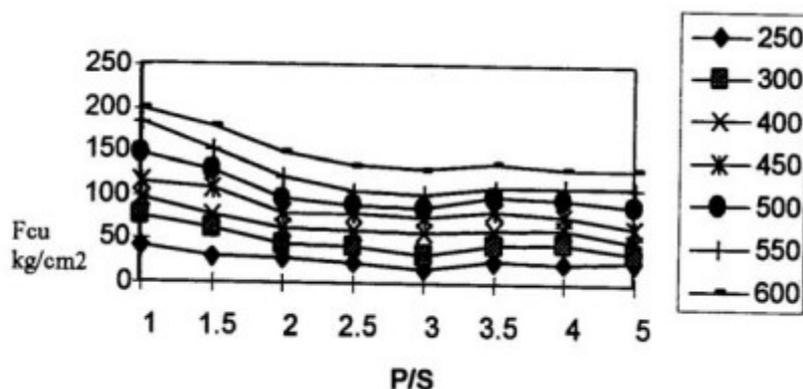


Figure I.23 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport polystyrène/sable pour les différentes quantités du ciment. (Kuhail, 2001).

La résistance à la compression peut atteindre 200 kg/cm^2 lorsque la quantité de proportions de polystyrène est relativement faible et la teneur en ciment relativement élevée (600 kg/m^3), de sorte que la densité est voisine de 1550 kg/m^3 . Pour $P/S = 5$ avec une teneur en ciment = 600 kg/m^3 la résistance gagnée est de 15 N/mm^2 avec une densité de 1200 kg/m^3 . Ce qui conduit à la conclusion que ce mélange peut être utilisé pour des éléments structuraux et non structuraux et pour des éléments porteurs et non porteurs. L'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance est fondamental dans le cas l'emploi des billes de polystyrène expansé comme granulats car leur présence fait chuter brutalement sa résistance (Milled, 2005). Tandis que Ganesh Babu et Saradhi Babu (Babu, 2003) ont observé, lorsque le dosage en ciment augmente, que la résistance à la compression des composites cimentaire à base de PSE ne dépasse pas 21 MPa .

K. Ganesh Babu et D. Saradhi Babu (2004), ont orientée leur enquête vers le développement et l'évaluation des performances des composites de béton contenant des billes de PSE. D'abord, ils ont fabriqué des composites de béton léger à base de PSE par le remplacement du granulat normal, partiellement ou totalement, par des billes de PSE en fonction de la densité et de la résistance requises. L'étude porte sur l'utilisation de billes de PSE comme agrégat léger à la fois dans le béton et le mortier, contenant un remplacement de 50 % de cendres volantes dans le matériau cimentaire. Les bétons ont été conçus pour couvrir une large gamme de densités ($550\text{--}2200 \text{ kg/m}^3$), grâce à des remplacements de la bille de PSE allant de 95 % à 0 %. Les résultats ont été comparés à des composites de béton similaires, ayant essentiellement de ciment portland ordinaire comme liant.

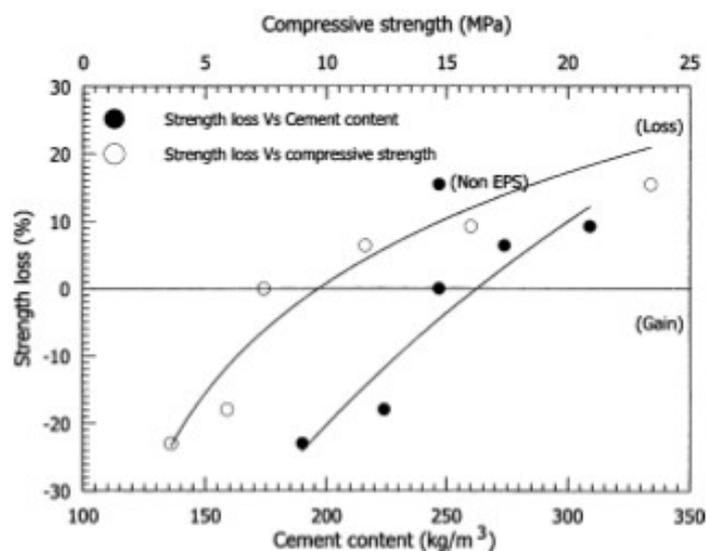


Figure I.24 : Effet de la teneur en ciment sur la perte de résistance des composites de PSE

La perte de résistance à 30 jours est illustrée à la Figure (I.24). D'après les résultats, les bétons de PSE à faible teneur en ciment montre une faible résistance à la compression. Donc, selon Babu et Babu (2004), les bétons PSE à faible teneur en ciment avec une résistance (densité) inférieure correspondante montrent un gain de

résistance même après 30 jours d'immersion, tandis que les bétons avec une teneur en ciment plus élevée montrent une perte de résistance.

I.10.2.4 Effet des additions minérales

Généralement l'emploi des additions minérales dans la confection du mortier et du béton à pour but d'apporter des améliorations de certaines propriétés notamment pour contribue à des modifications du processus d'hydratation du ciment. De plus, l'incorporation de ces additions minérales entraîne également une modification de la distribution granulaire. L'utilisation de la fumée de silice pour fabriquer des bétons à hautes performances est très répandue. Plusieurs recherches ont montré que certaines teneurs en fumée de silice dans le béton permettent d'améliorer la résistance en compression, le module d'élasticité et les propriétés mécaniques du béton au jeune âge. Bing Chen, Jie Liu et Long-zhu Chen (2010), ont utilisé les perles de polystyrène expansé comme totalement ou préplacement de l'agrégat fin ou grossier, ils font cela pour développer un nouveau béton léger, les perles utilisées étaient de 1,2,5 et 6,3 mm de taille, également la fumée de silice et des fibres de polypropylène ont été utilisés pour améliorer les propriétés du béton. Les résultats des tests montrent que la fumée de silice augmente la liaison entre la pâte de ciment et les billes de polystyrène. Ils ont également conclu que la résistance du béton de polystyrène diminue linéairement avec l'augmentation de la fraction volumique des billes de PSE dans le béton.

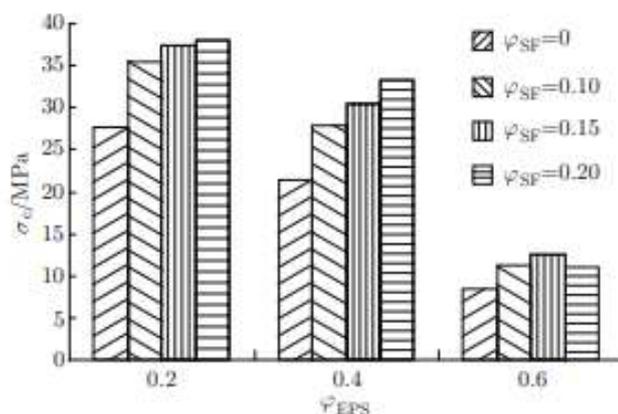


Figure I.25 : Effet du fumé de silice (SF) sur la résistance à la compression du béton de PSE avec différents volumes des billes de PSE (Chen et al., 2010).

La figure I.25, illustre les effets du fumé de silice (SF) sur la résistance à la compression du béton de PSE avec différentes fractions volumiques des billes PSE. On peut voir qu'avec une taille des billes de PSE identique, SF peut augmenter significativement la résistance à la compression. L'ampleur de l'augmentation de la résistance augmente avec une augmentation de la quantité de SF. Pour le béton de PSE avec $\phi_{PSE} = 0,20$, par rapport au béton PSE normal, les résistances à la compression du béton PSE avec $\phi_{SF}=0,10, 0,15$ et $0,20$ augmentent respectivement de 24 %, 37 % et 43 %. La figure 3 montre également que le SF peut améliorer la dispersion des billes de PSE dans la pâte de ciment et la liaison interfaciale entre ces billes et la pâte de

ciment. Ainsi, il convient de noter que l'augmentation de la plage de résistance diminue avec l'augmentation de la quantité de (SF). Avec l'augmentation de la fraction volumique des billes de PSE, la plage croissante avec le pourcentage de (SF) augmentant dans le mélange de béton est réduite. Pour le béton de PSE avec $\varphi_{PSE}=0,60$, les résistances à la compression du béton de PSE avec $\varphi_{SF}=0,10, 0,15$ et $0,20$ n'augmentent que de 37 %, 50 % et 44 %, respectivement. Cela indique qu'un pourcentage élevé de fumée de silice ne convient pas pour améliorer la résistance du béton de PSE avec une fraction volumique élevée d'EPS. Enfin, ils ont trouvé aussi que tous les bétons de PSE contenant du (SF) présentent une bonne maniabilité et peuvent être facilement compactés et finis.

Ganesh Babu et Saradhi Babu (Babu, 2003) ont observé l'influence de la fumée de silice sur le béton de polystyrène expansé. Ils ont fabriqué 3 séries de bétons avec différents dosages en ciment, différents taux de substitution du ciment par de la fumée de silice et différents rapports E/C. La résistance de ces bétons à 28 jours varie de 10 à 21 MPa. Ces auteurs ont démontré qu'une augmentation du dosage en fumée de silice conduit à une amélioration plus importante de la résistance en compression à 7 jours que celle à 28 et 90 jours, i.e. la fumée de silice a accéléré l'hydratation du béton. Alors, devant le fait que la perte de résistance du béton de PSE due à l'inclusion de granulats de polystyrène, les fumées de silice ont été ajoutées pour améliorer la résistance de ces bétons.

Au contraire, les études sur les cendres volantes en substitution partielle du ciment prouvent que ses gains sont limités. Costin Andrei Cadere et al.(2018) ont étudié l'influence de l'inclusion de cendres volantes (10 %) et de granules de polystyrène comme substitut d'agrégats sur la densité et les propriétés mécaniques du béton (compression, flexion et résistance à la traction). Ils ont conclu que les granulés de polystyrène diminuent la densité du béton et diminuent également tous les types de résistances du béton, à l'exception de la résistance à la traction. Ils ont trouvé que la masse volumique du béton avec cendres volantes et les billes de polystyrène varie entre 1880 et 2131 kg/m³. Toutes les valeurs sont inférieures à l'état initial du mélange témoin qui était de 2250 kg/m³.

Tableau I.6 : La densité des BPSE (Costin et al., 2018)

Concrete mixes	Density [kg/m ³]
CC1	2250
FACC1	2134
FACC2	2076
FACC3	1997
FACC4	1942
FACC5	1880

Avec l'augmentation du dosage de polystyrène en remplacement de l'agrégat minéral, la résistance à la compression diminue par rapport au mélange témoin, comme le montre la Figure I. 26. Les valeurs les plus élevées de résistance à la compression pour tous les types de béton avec cendres volantes et polystyrène ont été obtenues pour

le béton de type FCCP1, mais il est inférieur à celui de le mélange de contrôle. La diminution de force varie entre 47,7% pour FACCP1 et 75,4% pour FACCP5.



Figure I.26 : Variation de la résistance à la compression du béton avec du polystyrène et le cendre volante (Costin et al., 2018).

I.10.3 caractéristiques thermiques des bétons de PSE

La conductivité thermique d'un matériau est une grandeur thermo-physique qui caractérise son aptitude à diffuser la chaleur dans les milieux sans déplacement macroscopique de matière. C'est le flux de chaleur par unité de surface isotherme et de temps sous un gradient de température unitaire. C'est une propriété inhérente au matériau qu'elle caractérise et est fonction de la température et la pression de mesure. Elle est exprimée en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Sa valeur permet de quantifier le pouvoir du matériau à conduire la chaleur (en termes d'amplitude). Plus elle est faible, plus le matériau est isolant (conduction faible). En effet, dans les milieux poreux, la conductivité thermique est une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure. Elle doit prendre en compte certains paramètres tels que les conductivités thermiques des phases solide et fluides, leurs fractions volumiques, la structure de la phase solide, et les zones de contacts entre particules.

Les bétons de polystyrène expansé (BPSE), sur le plan thermique, apportent un confort remarquable en toute saison et limitent efficacement les déperditions thermiques. Ils ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments (à l'instar du Béton Isolant Porteur (BIP) du Centre Bâtiment CSTB). De nombreux paramètres de formulation du béton de granulat de PSE entraînent des différences de structure interne du béton. Du fait des différences de porosité et de composition chimique, ces bétons peuvent présenter des propriétés thermiques très variables. Plusieurs études antérieures ont traité le pouvoir d'isolation des de PSE. D'ailleurs, ils ont démontré que la faible densité de la bille de PSE avait un effet direct sur la conductivité thermique. L'utilisation de granulats légers de polystyrène expansé, en remplacement des granulats minéraux classiques, permet d'abaisser significativement la conductivité thermique des bétons (Kismi et al., 2012). Le tableau I.6 présente les résultats de conductivité thermique des bétons de PSE.

Tableau I.7 : La conductivité thermique du béton cellulaire de PSE

Type de béton	Dosage en bille PSE(%)	Densité (kg/m ³)	Conductivité (W/mK)
PFC150	82	150	0.084
PFC200	73	200	0.086
PFC250	67	250	0.0927
PFC400	45	400	0.156

Chen et Liu (2013), ont étudié le concept de remplacement partiel des billes de PSE par de la mousse avec un diamètre de bulle de 25 à 100 μm . Le béton mousse à base de PSE résultant avait une microstructure cellulaire qui rendait le produit extrêmement léger. Des granulats de PSE d'un diamètre de 1 mm ont été utilisés comme agrégat, tandis que l'agent moussant a joué un rôle important dans la formation des pores d'air. Ils ont constaté que ce béton cellulaire de PSE a des densités de 400 kg/m³ et 800 kg/m³, avec des résistances de 3,0 MPa et 0,009 W/mk, respectivement, et des conductivités thermiques de 13,0 MPa et 0,25 W/mk, respectivement. La figure (I.27) présente l'effet de la teneur en mousse sur la conductivité thermique du béton de PSE. Comme le montre la figure, la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la teneur en mousse. Pour le béton cellulaire PSE de densité 400 kg/m³, la conductivité thermique du mélange F400–0 est de 0,15 W/m kg, soit le double de celle du mélange F400–20 dont la conductivité thermique n'est que de 0,07 W/m kg. J

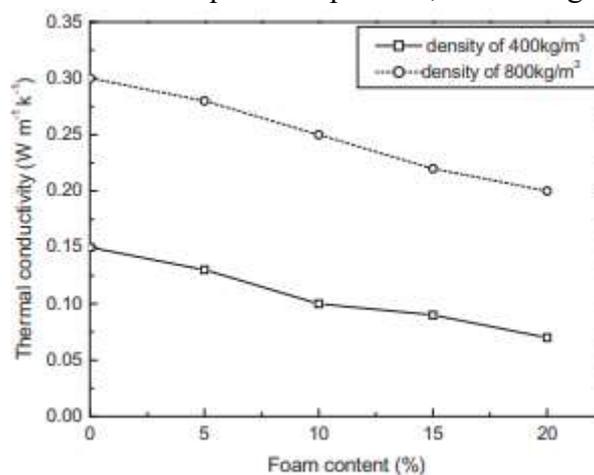


Figure I.27 Effet de la teneur en mousse sur la conductivité thermique du béton mousse PSE (Chen et al., 2013).

L'étude de Schackow et al., (2014), visait de comparer les propriétés mécaniques et thermiques du béton de granulats légers avec deux types de granulats légers, la vermiculite et le polystyrène expansé (PSE) et par l'utilisant d'un agent entraîneur d'air et un adjuvant superplastifiant. les quantité de granulats légers (55 % et 65 %) et quantité d'agent entraîneur d'air (0,5 % et 1,0 %). Les résultats ont montré que l'ajout d'entraîneur d'air rendait les bétons allégés encore plus légers, mais moins résistants. Le béton léger de PSE a une résistance plus élevée et est plus léger que la vermiculite. Le béton léger de vermiculite avait une conductivité thermique inférieure à celle du

PSE. La meilleure teneur en agrégats légers était de 55 %. De plus, le béton léger de PSE et vermiculite a montré une conductivité thermique jusqu'à 7 fois plus faible qu'un béton conventionnel (3,5 W/mK). Le béton avec 55 % de granulats légers avait une conductivité thermique plus élevée que le béton avec 65 % de granulats légers, comme prévu. En comparant le béton léger avec PSE et vermiculite, on constate que le béton avec vermiculite avait une conductivité thermique plus faible (0,50 W/mK à 55 % de granulats légers et 0,34 W/mK à 65 % (Tableau I.7). Ainsi, la vermiculite peut être utilisée comme granulats légers pour les bétons nécessitant plus d'isolation thermique.

Tableau I.8 : Résultats de conductivité thermique des bétons légers (Schackow et al., (2014)

Mixture	Volume of lightweight aggregate (% of volume of concrete)	Air-entraining agent (% weight)	Thermal conductivity (W/mK)
V3	55	1.0	0.50
V4	65	1.0	0.34
E3	55	1.0	0.56
E4	65	1.0	0.50

Kharun et al., (2017), ont exprimé que l'un des problèmes majeurs dans la production d'un mélange de béton de polystyrène et dans la formation de ces produits est la propriété d'exfoliation due au poids différent des composants inclus. Pour pallier cet inconvénient, divers matériaux de renfort, additifs plastifiants et entraîneurs d'air sont ajoutés dans le mélange de béton polystyrène. Dans ce sens, ils ont développé un mélange de béton de polystyrène armé qui comprend du polystyrène expansé, du polystyrène broyé, du ciment Portland de type I, du gypse, de la gaze, de la fibre d'amiante chrysotile, une solution aqueuse de plastifiant de polyacrylamide, de la carboxyméthyl cellulose, de l'acide tartrique, de la résine de bois saponifiée et de l'eau pour le mélange. Kharun et al., (2017).

Ils ont déclaré que la composition développée permet d'obtenir le mélange de béton de polystyrène dans une méthode simple avec une distribution uniforme des granules en volume et avec des déformations de retrait minimales, sans exfoliation et sans prise dans le temps prévisible suffisant pour le transport du lieu de production au chantier de construction . Ainsi, ils ont établi que les résistances à la compression des éprouvettes (D200, D300, D400, D500, D600, D700, D800, D900, D1000, D1100 kg/m³) sont de l'ordre de 0,28 MPa à 4,22 MPa en moyenne, et la conductivité – 0,073 à 0,3 W/(m.°C) selon la densité moyenne du béton de polystyrène. (Figure I. 28).

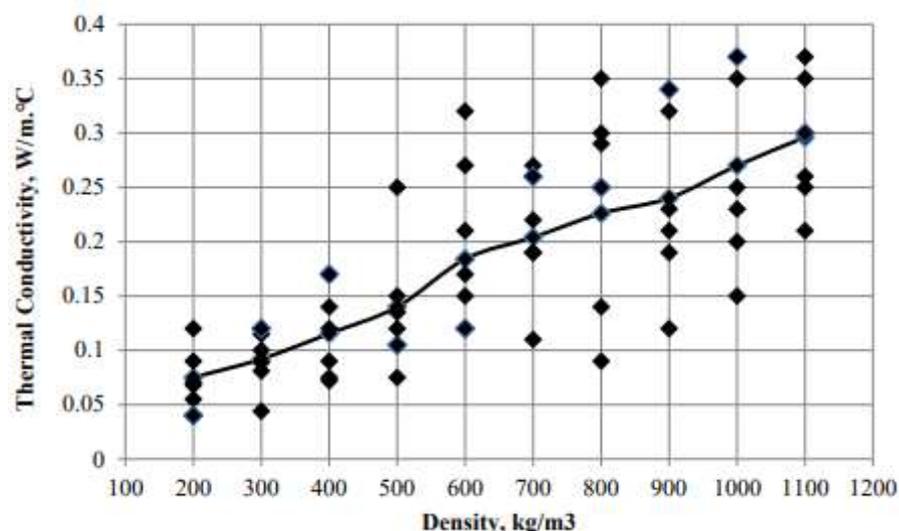


Figure I.28 : Changements dans la conductivité thermique du béton de polystyrène en fonction de la densité différente. (Kharun et al., 2017).

Le mélange de béton de polystyrène développé peut être utilisé pour la production de matériaux d'isolation thermique et d'isolation thermique structurelle de bâtiments à diverses fins (Kharun et al., 2017).

Dixit et al., (2019), ont concentré sur le développement d'un composite de ciment léger-PSE (LECC) ayant une capacité isolante améliorée, bien que le PSE affiche une isolation élevée (conductivité thermique $\approx 0,04$ W/m-K), ainsi qu'une résistance à la compression satisfaisante pour des applications structurelles. D'ailleurs, ils ont utilisé une matrice à ultra haute performance (UHPC) pour atténuer l'effet de préjudice des billes de PSE sur la résistance, Ces billes de PSE de 3 à 5 mm de diamètre sont mélangées dans la matrice ultra haute performance en cinq proportions en volume de 0, 16, 25, 36, 45 %. Ils ont déclaré que le choix de la proportion d'ingrédients UHPC s'avère efficace pour atteindre un équilibre entre une viscosité optimale et une maniabilité satisfaisante pour une dispersion uniforme de billes de PSE. Le composite léger (LECC) développé affiche une résistance de 45 MPa avec une masse volumique correspondante de 1677 kg/m³ et une conductivité thermique de 0,58 W/m-K. le tableau (I.8) regroupe les propriétés mécaniques et thermiques des composites élaborés.

Tableau I.9: Propriétés mécaniques et thermiques du mélange E0-E4. (Dixit et al., 2019),

Mix	Density (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)	Thermal Conductivity (W/m-K)	Strength-TC ratio (MPa.m.K/mW)
E0	2301	149.8	45.4	2.14	69.5
E1	2045	94.0	36.2	1.69	55.7
E2	1828	56.9	32.5	1.39	40.8
E3	1677	44.7	16.8	0.58	76.9
E4	1463	27.2	14.1	0.49	55.0

La figure (I.29) présente les résultats des tests de conductivité thermique. Ils ont été encourageants, avec l'augmentation de la teneur en bille de PSE, de E0 à E4, la valeur

de conductivité thermique est passée de 2,14 W/m.K à 0,49 W/m.K, soit une baisse substantielle de 77 % du TC.

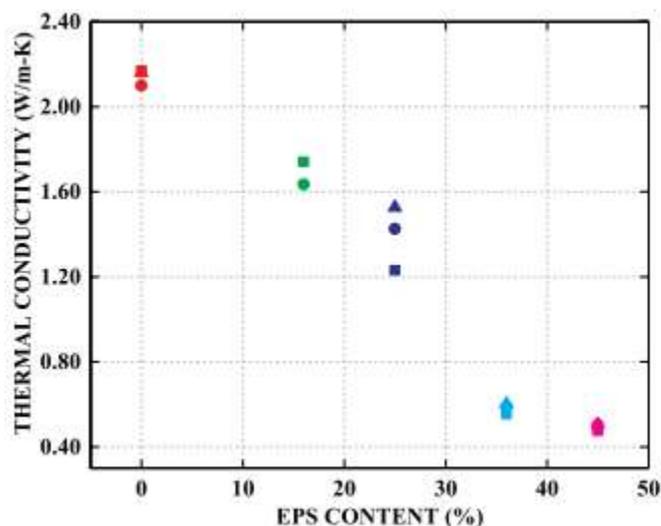


Figure I.29 : La variation de la conductivité thermique en fonction des billes de polystyrène expansé (Dixit et al., (2019).

De plus, même avec un volume de 45 % de PSE, la résistance à la compression mesurée dans le mélange E4 est de 27 MPa, ce qui le rend adapté à une application structurelle. Alors que sur la base le rapport résistance-conductivité thermique (TC), mélange E3 avec une résistance à la compression de 44,7 MPa, une densité de 1677 kg/m³ et une conductivité thermique de 0,58 W/m-K est la combinaison la plus optimale de résistance et d'isolation parmi les mélanges étudiés. Finalement ils ont conclu que la résistance ultra-élevée de l'UHPC est un outil efficace pour contrer l'effet dégradant de PSE sur la résistance du béton.

La conductivité thermique du béton diminue souvent avec la porosité. Dans ce sens Moraes et al., (2019), ont utilisé les déchets solides industriels issus du processus de coulée en céramique (source de mullite) pour produire des mousses céramiques. Ils ont engendré les billes de PSE ($d_{50} < 1 \text{ mm}$) afin de satisfaire des applications d'isolation thermique et acoustique. Des mélanges contenant de la poudre de coquille de céramique bien mélangée ($d_{50} < 2 \text{ mm}$), des billes de PSE, dans différentes proportions (de 10 à 70 % en volume), et BonderPlus (solution de Na_2SiO_3) ont été pressés uniaxialement à 20 MPa, séché et cuit dans des conditions contrôlées. Les résultats de l'investigation montrent que les mousses de coque en céramique (contenant 70 % en volume de billes de poudre EPS) présentaient des porosités allant jusqu'à 77 %, une conductivité thermique de 0,061 W/mK (figure I.29), et une excellente résistance à la compression de 5,4 MPa. De plus, ils ont conclu que l'utilisation de déchets de coques en céramique pour la fabrication d'isolants thermiques avec des caractéristiques microstructurales appropriées est une grande opportunité durable, car avec l'utilisation de ces déchets réfractaires, il est possible d'éviter le rejet dans l'atmosphère d'environ 3,1 kg de CO_2 par kg de matière fabriquée. (Moraes et al., 2019),

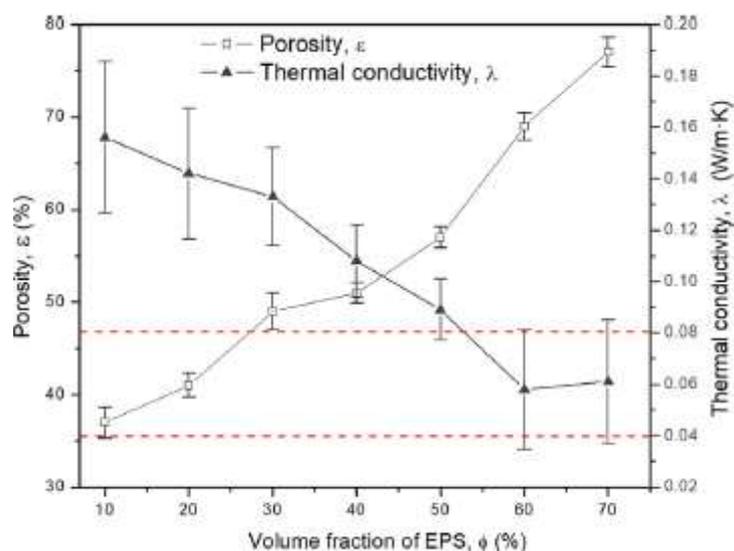


Figure I.30 : Influence de la fraction volumique des billes de poudre de PSE (de 10 à 70 vol%) sur la porosité et la conductivité thermique des mousses céramiques cuites. (Moraes et al., 2019)

En conséquence (Moraes et al., 2019), à partir d'un mélange contenant des particules de coque en céramique recyclées et polystyrène expansé (contenant 10 à 70 % en volume de PSE), ont fabriqué avec succès des mousses de coque en céramique innovantes avec une combinaison appropriée de porosité interconnectée (37 à 77%) et de tailles de pores (allant de 115 μm à 1200 μm), réparties de manière homogène dans une matrice sans fissures, ont été produites avec succès. Outre l'effet de porosité, les propriétés mécaniques de ces mousses céramiques variant de 5,4 à 23,8 MPa, résultent généralement d'un ensemble de variables telles que la formation de la phase cristalline, la morphologie (répartition de la taille des pores et entretoises denses), ainsi que la présence de fissures lors de traitement. Les mousses de coque en céramique présentent une conductivité thermique de 0,061 W/mK, ce qui convient à l'isolant thermique.

I.10.4 caractéristiques acoustiques des bétons de PSE

Généralement les constructeurs accordent plus d'importance à l'isolation thermique comparée à l'isolation acoustique car la première occasionne une grande consommation d'énergie alors que la seconde considérée comme un luxe supplémentaire. Elle est pourtant essentielle car c'est prouvé que le bruit est une source de stress. Par l'effet de masse, le béton et le mortier sont des excellents isolants phoniques aux bruits aériens. Selon ses structures ou la texture de ses surfaces, ils deviennent également des matériaux à caractère absorbant acoustique. Pour améliorer ses propriétés d'absorption acoustique, il faut les coupler avec des matériaux absorbant tels que la laine de verre, la laine de roche, la laine de mouton, polystyrène expansé, liège expansé, les fibres en polyester et la mousse ; ceux-ci peuvent jouer la fonction d'amortisseur contre les bruits extérieurs, et d'ailleurs la complémentarité du béton et du mortier avec les autres

matériaux est infinie, et peut assurer la réalisation d'un matériau isolant qui « piègera » et amortira le bruit. En outre, les meilleurs isolants phoniques doivent être à la fois :

- suffisamment **souples** pour jouer le rôle de ressort et amortir les ondes sonores,
- suffisamment **rigides** pour assurer un bon comportement mécanique des parois.

Sur le plan d'isolant acoustique, le polystyrène expansé est le plus utilisé dans le domaine du bâtiment, il présente des performances acoustiques. D'ailleurs, le comportement acoustique des plaques de 100% polystyrène limite le passage des bruits de l'extérieur vers l'intérieur ou vice versa. Mais qu'ils soient sous forme des billes expansés pour les utiliser comme substance dans les composites cimentaires, la performance acoustique des polystyrènes reste à étudier. Toutefois, peu de recherches ont été menées jusqu'ici pour déterminer l'efficacité des billes de PSE dans le mélange du béton et mortier envers les critères d'isolation acoustique. Ces études antérieures ont montré que les principaux facteurs influant sur la performance d'absorption acoustique du béton léger sont la porosité, l'épaisseur de l'élément, la taille et le type des granulats. Gaun et al. (Guan et al., 2007) ont envisagé d'utiliser des sources électromagnétiques ou acoustiques à une fréquence comprise entre 8 et 18 GHz pour évaluer les effets sur les bétons EPS. D'ailleurs, Guan, et al., (2007), ont étudiés des pâtes de ciment incorporant des billes de PSE avec des taux de remplacement volumique de 40, 50 et 60%. Deux tailles de ces billes ont été employées (1 et 3mm) et trois différentes épaisseurs des spécimens ont été testées (10, 20 et 30 mm) (Tableau I. 8).

Tableau I. 10 : Proportion de mélange et densité apparente de chaque échantillon (Guan, et al., (2007))

No.	Filling material (mm)	Volume (%)	Thickness (mm)	Bulk density (g cm^{-3})
1#	Nothing	0	20	2.129
2#	EPS 1	40	20	1.487
3#	EPS 1	50	20	1.244
4#	EPS 1	60	20	1.108
5#	EPS 3	50	20	1.113
6#	EPS 3	60	20	1.008
7#	EPS 1	60	30	1.108
8#	EPS 1	60	10	1.108

L'investigation de (Guan, et al., (2007)) a été basée sur la propriété d'absorption électromagnétique du matériau composite à base de ciment rempli de billes de PSE, qui est normalement exprimée en termes de «perte de réflexion», a été testée dans une chambre anéchoïque en utilisant la méthode d'essai en arc Simmons et al., 1953), avec un analyseur de réseau vectoriel Agilent 8720B (VNA). Les plages de fréquences de test sont de 8 à 12 GHz et 12 à 18 GHz. Rappelons que l'investigation a été concentrée sur l'influence du dosage volumique, sur l'effet de taille de la bille de PSE et sur l'épaisseur de l'échantillon testé.

La figure (I.31), indique l'influence de la teneur volumique des billes de PSE sur la perte de réflexion des ondes du composite cimentaire. Cette figure montre que le dosage volumique des billes de PSE améliore remarquablement la perte de réflexion du matériau cimentaire.

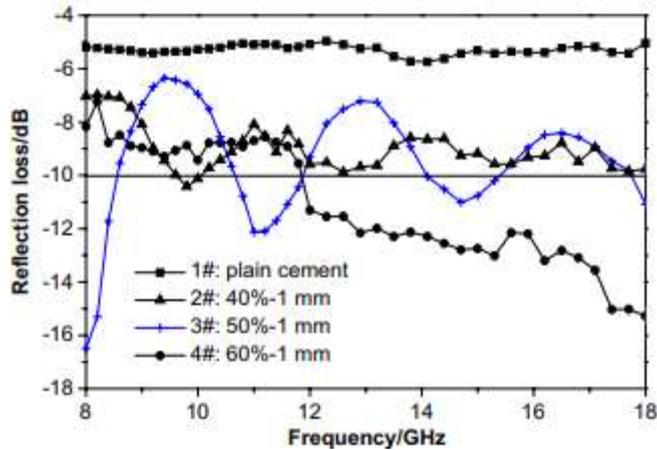


Figure I.31: Effet du dosage volumique en bille de PSE sur la perte de réflexion des ondes sonores (diamètre du bille PSE $d=1$ mm) (Guan, et al., (2007)).

Avant l'introduction de ces billes, la pâte de ciment ordinaire 1# n'a qu'une faible perte de réflexion d'environ 5 dB, et l'échantillon 2# avec une teneur en PSE à 40 % en volume n'a qu'une valeur maximale de 10,42 dB à 9,8 GHz. Mais l'échantillon 4 # avec le dosage de 60 % en volume a une perte de réflexion plus élevée que les échantillons 2 #, 3 # et 1 # avec la même épaisseur, et la perte de réflexion augmente avec l'augmentation de la fréquence. À 18 GHz, la perte de réflexion de 4 # atteint 15,27 dB et la bande passante dans laquelle la perte de réflexion est meilleure que 10 dB atteint 6,2 GHz sur toute la bande passante de 8 à 18 GHz. La perte de réflexion de l'échantillon 3 # a beaucoup de fluctuations avec plusieurs valeurs de pointe, mais ses performances globales sont toujours inférieures à celles de 4 #.

(Guan, et al., (2007) ont conclu, sur la base de ces résultats, qu'avec l'augmentation du dosage volumique des billes de PSE, le nombre des particules de PSE augmente, ce qui conduit également à l'augmentation de la diffusion et de la diffusion multiple entre les particules. De plus, l'augmentation de l'introduction de la bille de PSE dans le matériau cimentaire améliore l'adaptation d'impédance entre le matériau poreux et l'espace libre, ce qui rend l'onde incidente beaucoup plus facile à transmettre dans le matériau et atténuée par l'absorbeur d'ondes. Ainsi, l'augmentation du volume de billes PSE peut améliorer la perte de réflexion des ondes du matériau composite poreux à base de ciment. (Guan, et al., (2007)).

L'influence du diamètre de PSE sur la perte de réflexion des ondes est illustrée à la figure (I.32), à partir de laquelle Guan, et al., (2007) ont démontré qu'en ce qui concerne les échantillons avec des volumes de remplissage en PSE de 60 % en volume, l'échantillon 6 # avec la taille des billes en PSE de 3 mm a une perte de réflexion inférieure à 8 dB, tandis que 4 # avec un diamètre de PSE de 1 mm est bien meilleur

que 6 #. En ce qui concerne les échantillons avec un taux de remplissage de 50% en volume, 5# a une perte de réflexion moyenne de 8 à 11 dB à l'exception de quelques pics, tandis que 3# a de grandes fluctuations avec plusieurs valeurs de pic d'absorption. Aux fréquences inférieures à 9,5 GHz, la perte de réflexion de 3 # augmente considérablement et jusqu'à atteindre une valeur de crête de 16,5 dB à 8 GHz, ce qui est bien meilleur que celui de 5 # avec la taille PSE de 3 mm (Guan, et al., (2007).

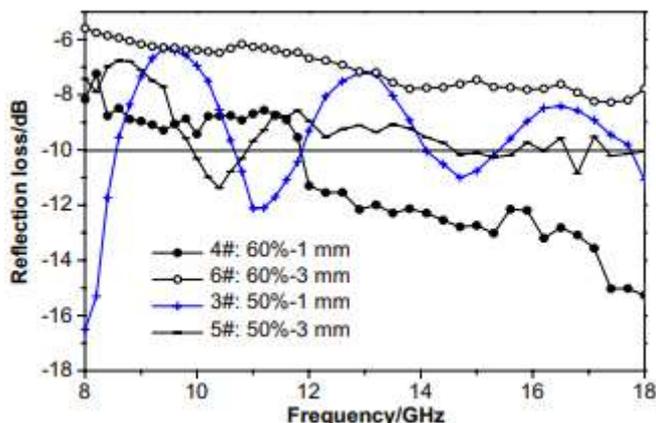


Figure I.32: Effet de la taille des billes de PSE sur la perte de réflexion des ondes sonore, 3# : 50 vol.% PSE (d=1 mm), 4# : 60 vol.% PSE (d=1 mm) 5# : 50 vol.% PSE (d=3 mm), 6# : 60 vol.% PSE (d=3mm) (Guan, et al., (2007).

En ce qui concerne le composite cimentaire à base de billes de PSE, (Guan, et al., (2007) ont constaté que à même teneur en volume de PSE la diminution de la taille des billes est en fait l'augmentation du nombre de billes et par conséquent les zones d'interaction, ce qui offre beaucoup plus de possibilités de diffusion et de diffusion multiple de l'incidence des ondes. De plus, l'augmentation du nombre de billes EPS améliore également l'adaptation entre l'impédance de surface du matériau et l'impédance de l'espace libre, ce qui conduit à une meilleure transmission de l'onde incidente à la surface du matériau composite. Ainsi, l'atténuation des ondes est augmentée en conséquence. (Guan, et al., (2007).

Finalement sur la figure (I.32), (Guan, et al., (2007) ont montré l'effet de l'épaisseur des échantillons sur la réflexion des ondes. Ils ont déclaré que l'échantillon 4# avec une épaisseur de 20 mm a une perte de réflexion nettement meilleure que 7# avec une épaisseur de 30 mm dans la gamme de fréquences 8–18 GHz. Et pour 4 # et 7 #, plus la fréquence est élevée, meilleures sont les pertes de réflexion. La perte de réflexion de 8 # avec une épaisseur de 10 mm a deux grandes valeurs de crête, dont l'une atteint même 16,45 dB, mais ses performances globales et sa bande passante de 10 dB sont encore pires que celles de 4 #.

D'après ces résultats, l'épaisseur de l'échantillon a certains effets sur la perte de réflexion électromagnétique d'un matériau absorbant les ondes, et l'épaisseur peut influencer les valeurs maximales d'absorption et la bande passante du matériau (Guan, et al., (2007). De plus, ils ont remarqué que lorsque l'épaisseur de l'échantillon dépasse

l'épaisseur correspondante dans certaines bandes de fréquences, la perte de réflexion des micro-ondes n'augmentera pas mais diminuera progressivement, comme le montre la figure (I.33).

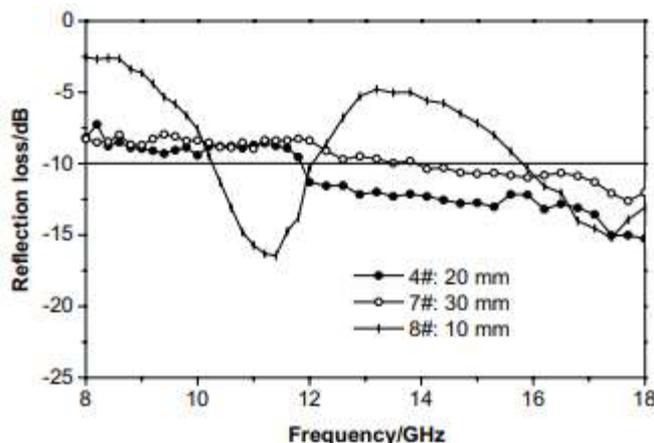


Figure I.33: Effet de l'épaisseur des échantillons sur la perte de réflexion des micro-ondes 4# : 60 vol.% PSE (20 mm), 7# : 60 vol.% PSE (30 mm), 8# : 60 vol.% PSE (10 mm). (Guan, et al., (2007)).

Finalement ces chercheurs concluent que par rapport à la pâte de ciment ordinaire, la perte de réflexion électromagnétique du matériau composite cimentaire à base des billes de PSE a été considérablement améliorée. Ainsi, le taux de la teneur en PSE, la taille des billes PSE et l'épaisseur de l'échantillon ont tous des effets importants sur la perte de réflexion. Avec une concentration volumique de PSE d'ordre 60% et un diamètre de 1 mm, ce matériau composite d'une épaisseur de 20 mm peut donner la meilleure perte de réflexion. Sa perte de réflexion dans 8–18 GHz varie de 8,17 dB à 15,27 dB et plus la fréquence est élevée, meilleure est la perte de réflexion. Sa propriété élevée d'atténuation peut être attribuée à la diffusion multiple des particules de PSE enrobées par une couche de pâte de ciment. (Guan, et al., (2007)).

Dans une autre étude menée par E. G. de Moraes et al., (2019), des échantillons à faible conductivité thermique et à coefficients d'adsorption sonore élevés ont été réalisés, par la combinaison des mousses de coques en céramique et des particules de PSE recyclées. Ils ont bien mélangé la poudre de coquille de céramique ($d < 2$ mm), des billes de PSE, dans différentes proportions (de 10 à 70 % en volume), ont été ajoutés comme agent d'allègement, et BonderPlus (solution de Na_2SiO_3) ont été pressés uniaxialement à 20 MPa puis séchés et cuits dans des conditions contrôlées. Les résultats expérimentaux trouvés, ont montré que des microstructures homogènes de pores allongés et interconnectés avec des tailles comprises entre 115 et 1200 nm peuvent être obtenues. Ces connexions présentent un impact significatif sur les propriétés d'absorption thermique/acoustique, en tant que conséquence de l'interaction entre les molécules d'air à l'intérieur des pores par le passage de l'onde thermique/sonore. Les mousses de coque en céramique (contenant 70 % en volume de billes de PSE) présentaient des porosités allant jusqu'à 77 %, un coefficient d'absorption acoustique de

0,9 (3 kHz) et une excellente résistance à la compression de 5,4 MPa (figure I.34). (Moraes et al., 2019).

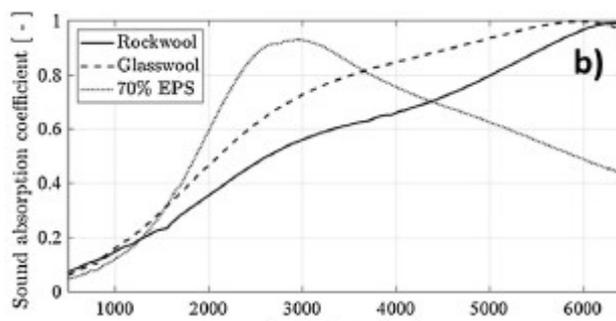


Figure de I.34 : Coefficient d'absorption acoustique: (courbe en points) mousse de coque en céramique (70 vol% de PSE); (Moraes et al., 2019).

La conclusion tiré de cette l'étude, est que la quantité de PSE 70% a un bon coefficient d'absorption proche de l'unité (100% d'absorption sonore) pour une gamme de fréquence spécifique, plus est l'atténuation sonore par le matériau. En effet, selon Moraes et al., 2019, l'utilisation de ce type de matériau pourrait améliorer l'atténuation sonore pour des applications nécessitant un contrôle du bruit.

Aussi L. Santos et al. (2021) ont testé trois types de mortier à base de PSE en laboratoire. Les masses volumiques apparentes testées étaient de 700 kg/m³ (CL7), 1 100 kg/m³ (CL11) et 1 500 kg/m³ (CL15). Le pourcentage des billes de PSE incorporé variait de 35 à 65%, et le rapport eau/ciment et la maniabilité ont été maintenus constants pour tous les bétons. Les proportions de ciment, de sable et de PSE varient selon la densité choisie pour chaque mélange. Les résultats des essais effectués en laboratoire prouvent que les mortiers de PSE avaient une performance acoustique beaucoup plus élevée que le mortier de ciment, quelle que soit la densité apparente, en particulier à des fréquences supérieures à 500 Hz (santos et al, 2021).

Ces chercheurs ont déclaré que la plus faible masse volumiques (700 kg/m³) avec une teneur de 65% en bille de PSE dans le mortier cimentaire (LCS7) a montré la meilleure performance acoustique en raison de sa capacité de déformation élevée et de son élasticité, atteignant $\pm L_w$ de 16 dB. Toutefois, l'incorporation élevée des billes de PSE (65 %) a altéré les propriétés mécaniques par conséquent, ce béton ne peut pas être utilisé parce qu'il ne répond pas aux critères minimaux. Cependant l'incorporation de 50% des billes de PSE dans le mortier (LCS11) dont la masse volumique est d'ordre de 1100 kg/m³ mène à un équilibre optimal entre la résistance mécanique et l'isolation acoustique, notamment à des fréquences supérieures à 500 Hz. (santos et al, 2021).

Pour les mortiers légers dont l'incorporation de 50% en PSE, il y a un équilibre entre la résistance mécanique et l'isolation acoustique. Donc, le meilleur résultat a été obtenu par le mortier d'une densité de 1100 kg/m³, avec une réduction pondérée du bruit de choc (L_w) de 12 dB, en plus d'une résistance à la compression comprise entre 3 et 4 MPa et d'une résistance à la traction de 0,70 MPa, les deux derniers étant adéquats

pour les éléments non structuraux. Ce qui n'est pas au niveau d'un matériau résistant mais suffisant pour résister à la faible action mécanique et absorber les vibrations. L_w du LCS11 était de 12 dB. (santos et al, 2021).

Le mortier de 35% en bille de PSE (LCS15), avec une densité de l'ordre 1500 où l'incorporation la plus faible des billes en PSE, a atteint une résistance mécanique souhaitable (8 MPa). Cependant, la teneur en PSE la plus faible a réduit sa capacité de déformation élastique, ce qui a entraîné une baisse de l'isolation acoustique d'impact, avec une valeur L_w comprise entre 9 et 10 dB (figure I.35).

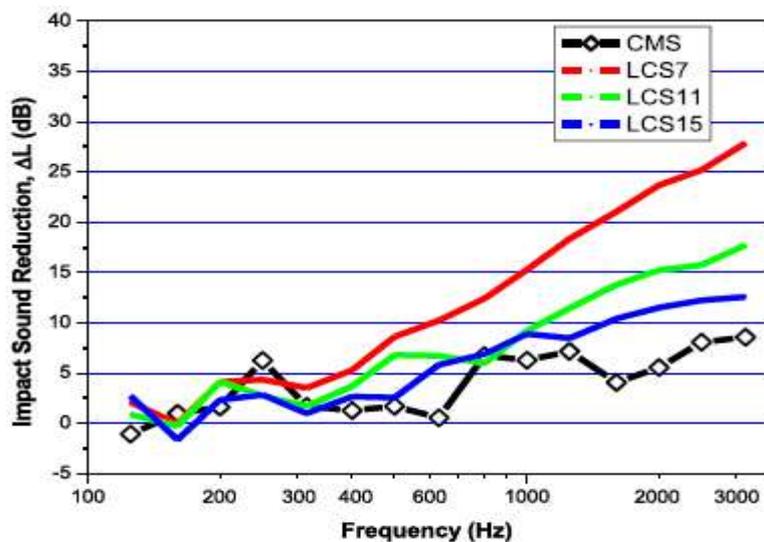


Figure I.35 : Réduction du bruit d'impact des différents mortiers (0% ; 35% ; 50% et 65% en billes de PSE. (L. Santos et al., 2021).

I.11 Conclusion

Ce premier chapitre a commencé par une synthèse de connaissances sur la situation énergétique dans le domaine de la construction que ce soit mondiale ou algérienne. Puis les principaux paramètres qui gouvernent la conception d'un béton de granulats légers ont été décrits d'une façon générale ainsi les spécificités des granulats légers destiné pour l'amélioration du comportement des bétons légers dans les trois domaines (mécanique, thermique et acoustique). De plus, ce chapitre a mis en lumière sur les spécificités du béton de polystyrène expansé et les paramètres de formulation à prendre lors de la fabrication. D'ailleurs, on a pu constater, d'après la littérature, le rôle fondamental de la porosité et l'absorption dans le comportement du matériau. En mécanique, la présence de bulles d'air a tendance à affaiblir le niveau de performance des bétons de PSE. En thermique, le transfert par conduction d'un matériau poreux est fortement influencé par le volume des pores, leurs tailles et la distribution spatiale de la porosité. Les bétons de PSE sont essentiellement caractérisés par leurs valeurs de conductivité thermique et de capacité thermique améliorées. Quant au comportement acoustique des bétons de PSE, l'augmentation de la porosité favorise l'absorption des sons. La suite du document va en particulier s'intéresser à l'étude de l'influence de la substitution du sable par le polystyrène expansé sur les performances physico-mécaniques, thermiques et acoustiques d'une série de composite (mortier et béton) allégé par les billes de PSE.

Chapitre. II
Méthodologie expérimentale
Et
Caractérisation

Chapitre. II Méthodologie expérimentale Et Caractérisation

II.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie expérimentale suivie, nous présentons en première partie les caractéristiques et les propriétés des matériaux utilisés dans la composition des composites légers (mortier, béton) à savoir : le ciment, les granulats ordinaires et légers, l'eau de gâchage et l'adjuvant. La seconde partie, décrit la procédure de fabrication des différents mélanges, de la méthode des formulations jusqu'à la caractérisation des composites élaborés à l'état frais et durci.

II.2. Caractérisation des constituants utilisés

Les caractéristiques des constituants sont décrites ci-dessous.

II.2.1 Le ciment

Le ciment employé lors de l'étude est un ciment portland composée CPJ - CEM II/B 42,5; de classe commerciale 42.5; Mais sa résistance moyenne à 28 jours (classe vraie), est estimée a 45 MP. Le ciment MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conforment à la norme NA 442, EN 197-1, dont les caractéristiques sont données au tableau (II-1).

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	CPJ-CEM II/A 42.5
Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	1.165
Masse volumique Absolue (g/cm ³)	3.150
Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)	4000
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Retrait à 28 jours (µm)	<1000
Expansion (mm)	≤3.0
Temps de début de prise (min)	150±30
Temps de fin de prise (min)	230±50
La résistance à la compression à 28 jours (MPA)	45

Les compositions chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées aux tableaux II.2 et II.3.

Tableau II.2 : Composition chimique de ciment

O	Mg	S	Cl⁻	K₂O + Na₂O	Perte au feu	Résidu insoluble
1-2.20	2-	0.01-0.05		0.3-0.75	7.5-12	0.7-2

Tableau II.3 : Composition minéralogique de ciment

Composition hypothétique du clinker (Bogue) (%)					
Type de ciment		C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
CPJ-CEM	II/A	58-64	12-18	6-8	10-12
42.5					

1.1 II.2.2 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des différents mélanges est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de MEDEA, elle est potable et exempte d'impuretés. Associé au ciment, l'eau remplit deux fonctions : D'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte.

II.2.3 Adjuvant

L'emploi de l'adjuvant a pour but d'assurer la maniabilité désirée du mortier. L'adjuvant utilisé est un plastifiant réducteur d'eau fabriqué par la société Algérienne GRANITEX commercialisé sous l'appellation 'Medafluid 104'. Il s'agit d'un adjuvant liquide marron. Selon sa fiche technique, la densité est de 1.04 ± 0.015 et son Ph est égal à 7.9 ± 1 , et d'une teneur en chlore $< 1 \text{g/L}$. La plage d'utilisation recommandée est de 0.3 à 1.5% du poids de liant selon les performances recherchées.

II.2.4 Les granulats

Les agrégats utilisés sont une combinaison de fractions des granulats grossiers et fins de nature différente naturelle et artificielle. Le choix des granulats est basé sur des raisons écologiques et économiques (éco-matériaux), et notamment la recherche de la valorisation des matériaux les plus écologiques trouvés en Algérie.

A ce propos, nous avons concentré sur la valorisation des matériaux locaux, commençant par le sable de dune (SD), un matériau avec lequel il occupe plus 60% du territoire algérien et qui est essentiellement formé de sable très fin (0/0.315) inexploité jusqu'à ce jour (Benmalek & Riad, 2003; Tafraoui, 2007). Il a été corrigé par le sable de carrière (SC) dans le but d'avoir un mélange convenable avec un module de finesse $M_f = 2,5$. Concernant les gros granulats, deux classes de pierres concassées (PC) sont utilisées ; à savoir : 3/8 et 8/16, d'ailleurs, ils sont issus du concassage d'une roche calcaire de la région de Médéa.

Le type de granulat léger utilisé dans cette étude, est un granulat ultraléger dans le but d'avoir plusieurs classes du béton léger, il s'agit du polystyrène expansé PSE. L'introduction des billes de PSE dans les mélanges réalisés à travers la substitution volumique du granulat fin (sable 0/4) par les billes de PSE (0/4), ces billes ont une forme quasi-sphérique, en plusieurs teneurs. L'aspect des granulats est présenté dans la figure (II-1).

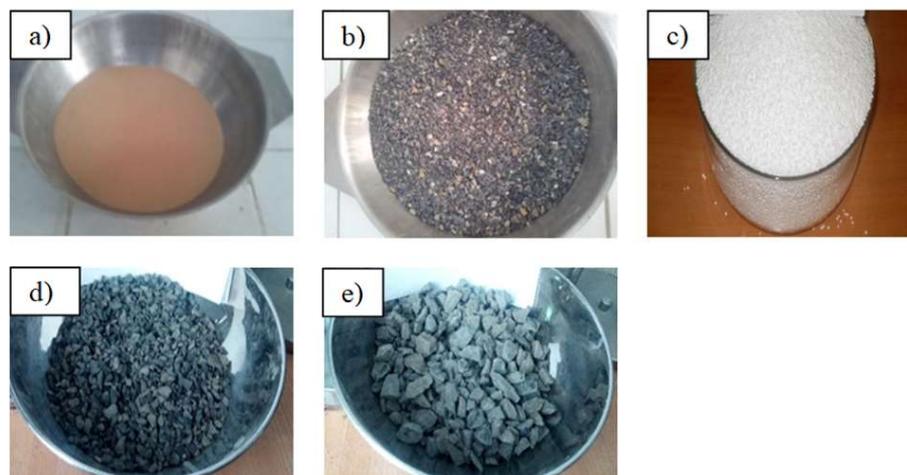


Figure II.1 : Aspects des granulats utilisés, a) sable de dune, b) sable concassé, c) polystyrène expansé PSE, d) gravier 3/8, e) gravier 8/16.

Avant de déterminer les formulations des différents mélanges, nous avons mesuré les propriétés physiques des granulats. Ces caractéristiques concernent la granulométrie, les masses volumiques en vrac absolue ainsi que la porosité et l'absorption d'eau des granulats. Chaque valeur retenue pour ces différentes caractéristiques est issue d'une moyenne calculée sur deux résultats de mesure afin d'assurer une bonne représentativité.

II.2.4.1 Le sable

Deux types de sable ont été utilisés:

A. Le sable roulé (sable de dune)

Le sable roulé utilisé dans cette étude provient de Hassi Bahbah à la région de Djelfa, située à 300 Km au sud d'Alger, sa classe granulaire est 0/0,315, c'est un sable fin (Figure II.1a), ses propriétés sont regroupés dans le tableau II.4.

B. Le sable de concassage

Le sable de concassage (Figure II.1b) de dimension 0/4, provenant de la station de concassage de MONT GORNO situé à 25 Km au sud de Médéa, est utilisé pour corriger le sable de dune. A travers des résultats de l'analyse granulométrique réalisée sur les deux types de sable, on remarque clairement que le sable (concassé) est grossier alors que le sable de dune est fin, ce qui nous mène à corriger le sable fin par le sable grossier pour avoir un mélange convenable avec un module de finesse acceptable.

C. Correction des sables

Selon la méthode d'ABRAMS (Dreux & Festa, 1998) et le module de finesse souhaité (M_f souhaité= 2.5), on calcule les paramètres S1, S2 et S suivants :

$$S1=3.88-2.5=1.38$$

$$S2=2.5-0.74=1.76$$

$$S=1.38+1.76=3.14$$

Le sable corrigé (concassé et roulé) sera composé alors des proportions suivantes :

- Le pourcentage du sable concassé $= (1.76/3.14) \times 100 = 56 \%$
- Le pourcentage du sable roulé $= (1.38/3.14) \times 100 = 44 \%$

La courbe granulométrique des sables utilisés est illustrée dans la figure 2 suivante :

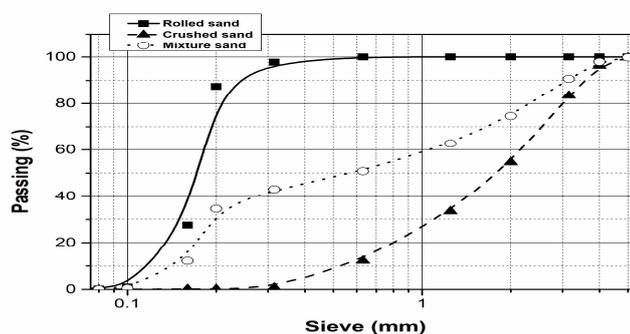


Figure II.2 : La courbe figure 2 granulométrique des sables utilisés.

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques des sables.

Caractéristiques	Sable de Hassi bahbah	Sable concassé	Sable corrigé
Module de finesse	0.74	3.88	2.5
Masse volumique apparente g/cm^3	1.435	1.530	1.526
Masse volumique Absolue g/cm^3	2.613	2.631	2.620
Equivalent de sable (Piston)	61.73	88.34	86.47
Equivalent de sable (visuel)	70.23	94.76	92.23
Taux d'absorption (%)	0.01	0.2	0.18
Compacité (%)	54.9	58.1	58.82
Porosité (%)	45,1	41	41.17
Indice des vides	0.82	0.72	0.71

II.2.4.2 Le gravier

De nature calcaire, il provient de la carrière de Mon Guorno de la région de Berrouaghia (Médéa) Algérie, avec deux fractions granulaires de 3/8 mm et 8/16 mm.

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de gravier sont présentées au Tableau II.5

Tableau II. 5 : Propriétés des graviers

Propriétés	Gravier		Observations
	Fraction 3/8	Fraction 8/16	
Masse volumique absolue, g/cm ³	2.57	2.585	
Masse volumique apparente, g/cm ³	1.380	1.350	
Coefficient d'absorption, (%)	1.33	1.35	
Coefficient Los Angeles, (%)	19.92	26.50	Dure
Compacité, (%)	61.14	52.22	
Porosité, (%)	38.86	47.77	

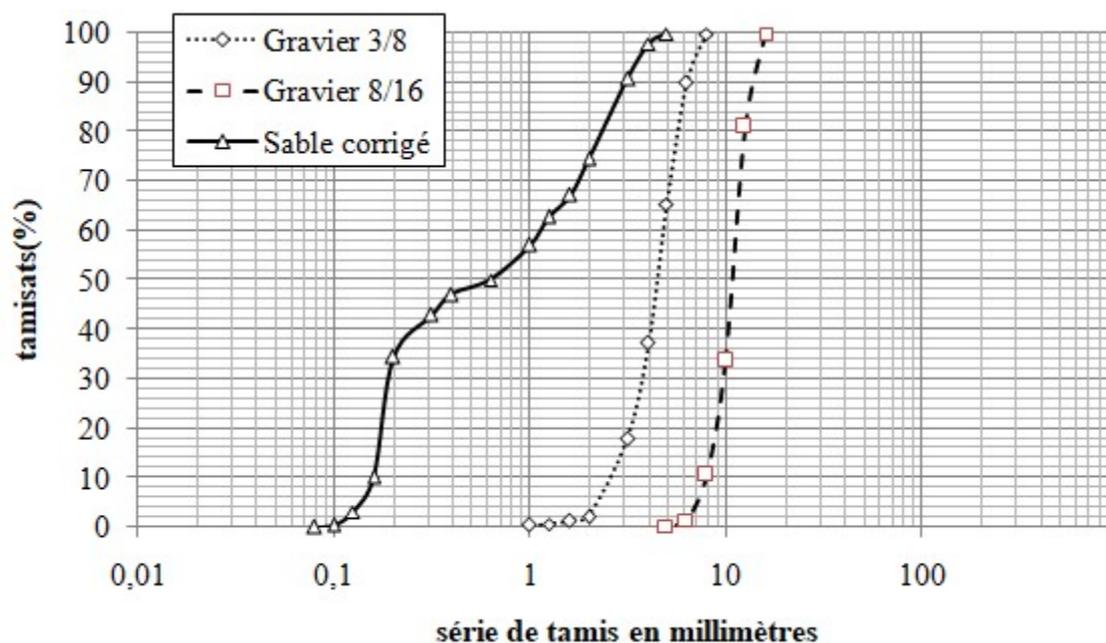


Figure II. 3 : Analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/16 et sable 0/5)

II.2.4.3 Le polystyrène expansé PSE

Dans notre étude, l'allègement des composites (mortier et béton) réalisé par le remplacement volumique du sable par des billes de polystyrène expansé PSE. Notre choix est basé sur les critères suivants:

- La masse volumique ;

- L'absorption et la conductivité thermique ;
- La taille,

Tout d'abord, la masse volumique des billes de PSE à l'état brut se varie de 10 à 32 kg/m³, c-à-d le granulat le plus léger connu au marché de matériau de construction, dont leur utilisation dans le mortier engendre une diminution de la densité de l'ordre 60% (Herihiri, 2010). La densité des billes du PSE utilisé en isolation se situe, en règle générale, aux alentours de 9 kg/m³ et 25 kg/m³, cela est souvent employé dans les remblais routiers allégés (Yvrard, 1998).

Concernent l'absorption d'eau, le polystyrène expansé présente un taux parmi les plus faibles des matériaux isolants grâce à ses propriétés hydrophobes. A long terme, cela lui permet de conserver toutes ses caractéristiques en cas d'inondations et d'infiltrations notamment. Le taux d'absorption d'eau à long terme du polystyrène expansé est inférieur à 5%. MOHELLEBI dans sa recherche prouve clairement que les billes de Polypropylène présentent 0% d'absorption d'eau (Noumowe, 1995). Ainsi, ces perles bien qu'ils sont imperméables et étanches à l'eau, ils ont la particularité de résister à une exposition prolongée à l'humidité et surtout pour ses excellentes performances thermiques avec une conductivité thermique très faible (entre 0,029 et 0,038 W/m.K).

À propos de la taille des billes de PSE, Miled dans sa recherche a observé que les résistances obtenues avec les billes de diamètre 2.5mm sont plus grandes que celles obtenues avec les billes de diamètre 6.3mm (Miled, 2005) figure (II.4).

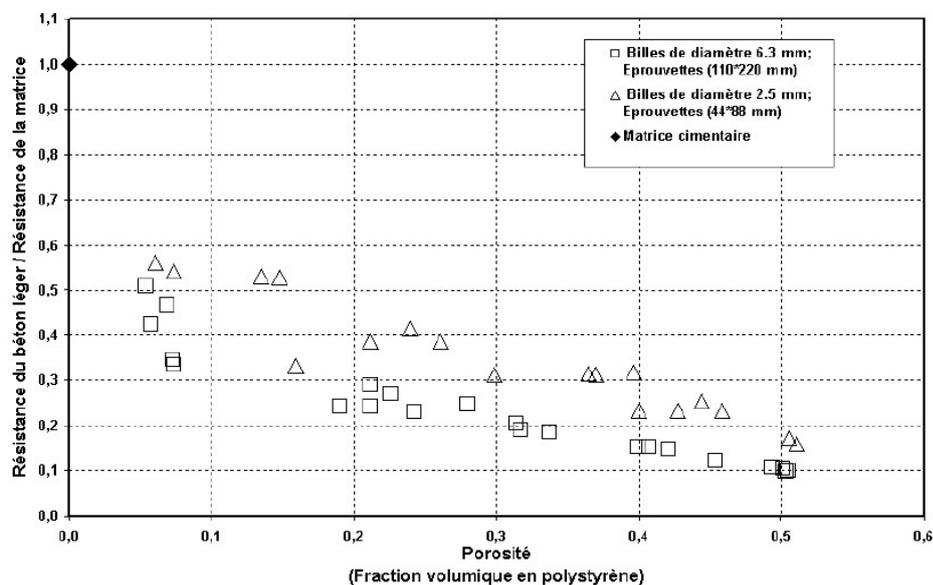


Figure II. 4 : Résistances en compression normalisées obtenues avec les billes de diamètres $\varnothing = 2,5\text{mm}$ et $\varnothing = 6,3\text{mm}$

D'ailleurs, Parant et Le Roy ont observé une chute d'environ 50% de la résistance du béton léger en remplaçant des billes de diamètre 1mm par des billes de diamètre 6mm. Les billes de polystyrènes expansés utilisés dans cette recherche, ont été fabriquées dans l'usine ENL sise à la zone industrielle d'Oued- Smar Alger. Le

polystyrène est obtenu par polymérisation du produit de base qui est le styrène, caractérisé structurellement par une forme parfaitement sphérique; l'enveloppe extérieure de ces perles est lisse et d'un grain serré ce qui les rendent hydrophobes, de diamètres variant entre 1 et 4 mm. Les caractéristiques du PSE utilisé sont résumées dans le tableau (II.6) :

Tableau II.6 : Caractéristiques du polystyrène

Nomination caractéristiques	Polystyrène expansé
Granulométrie	1 à 4mm
Masse volumique absolue	28 Kg/m ³
Masse volumique apparente	18 kg/m ³
L'absorption	0%
Conductivité thermique sèche (W/m.K)	0,045
Compacité	64.29%
Porosité	35.71%
Indice de vide	55.54%

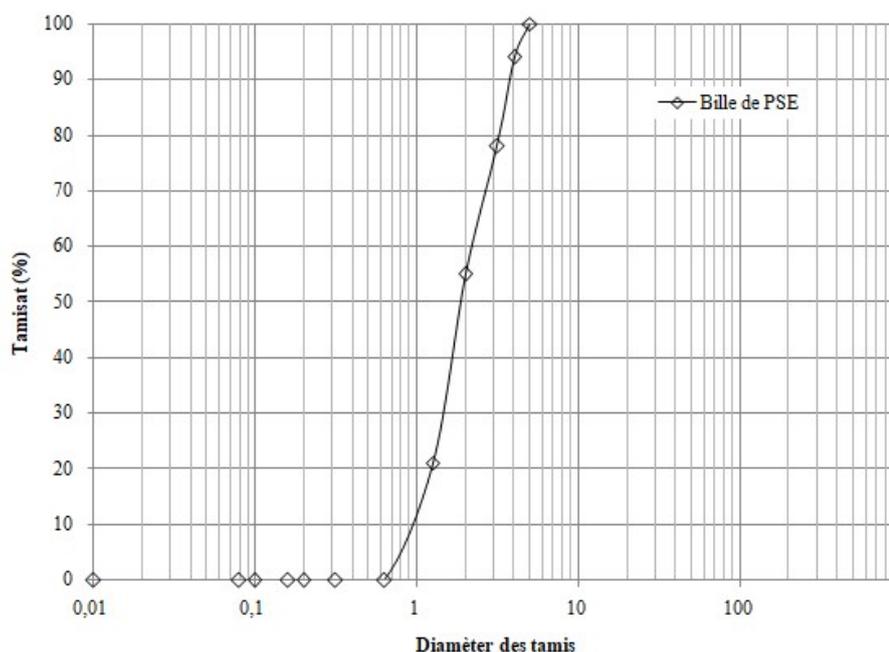


Figure II. 5 : Courbe d'analyse granulométrique des billes de PSE.

La figure II.5 présente la courbe d'analyse granulométrique des billes de polystyrène expansé 0/4.

II.3 Méthodologie expérimentale

Après avoir effectué la caractérisation des différents granulats choisis, on s'intéresse dans cette section à établir les composites de référence. Pour ce faire, deux

types de composites cimentaires fondamentaux -que nous cherchons à alléger- dans l'industrie de la construction ont été réalisés :

- Le premier type: le mortier ordinaire à base de sable corrigé;
- Le deuxième type consiste à l'étude des bétons avec le même sable corrigé et des graviers $D_{max} = 16 \text{ mm}$,

Tout d'abord, établir la composition d'un mortier ou d'un béton, consiste à déterminer les bonnes proportions des divers granulats, de ciment, et d'eau à mettre dans un mètre cube, puisque les caractéristiques que prennent ces composites à sa maturité dépendent de la nature de ses constituants. En conséquence, ils doivent faire l'objet d'un compromis: l'ouvrabilité, la résistance, la durabilité et l'économie.

II.3.1. Compositions des mortiers allégés

Le matériau élaboré est un composite à trois phases, constitué de ciment, sable corrigé et les billes de polystyrène expansé PSE. Pour étudier l'influence de la substitution des granulats classiques par des granulats de PSE, commençant par la préparation du mortier témoin ($s/c=3$) correspondant à un dosage nul en billes de polystyrène avec un dosage en ciment 450 kg/m^3 ; ainsi afin d'avoir les composites fluides sans l'ajout d'eau, un dosage en plastifiant est utilisé (1%) avec un rapport $E/C=0.5$. Ensuite le polystyrène expansé PSE est ajouté graduellement à des teneurs volumiques de 5, 15, 25, 50, 75 et 100%. Alors, sept différentes familles (M0% -M5% -M15% -M25% -M50% -M75% - M100%) de mortier sont fabriquées à base de sable corrigé et de polystyrène expansé. Pour ces mortiers, le rapport E/C est variable et correspond à la composition qui a donné une meilleure ouvrabilité. Les compositions des différents dosages sont représentées sur le tableau (II.7).

Tableau II.7 : Compositions des différents mortiers testés.

Dosage (kg/m^3)	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%	
Ciment CPJ CEM II/A 42.5	450	450	450	450	450	450	450	
Sable corrigé (0/5)	1350	1237.38	1107.13	976.88	651.25	325.63	0.00	
Polystyrène expansé (0/4)	0.00	0.820	2.450	4.090	8.170	12.260	16.34	
Rapport E/C	*	0.55	0.5	0.48	0.44	0.38	0.33	0.27
	**	0.5	0.47	0.43	0.40	0.34	0.29	0.26
Plastifiant (%)	*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	**	1	1	1	1	1	1	1

II.3.2. Compositions des bétons testés

La composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats (sable, gravier), ainsi que le dosage en ciment et en eau pour 1m^3 de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée avec la résistance mécanique voulue. Plusieurs méthodes de composition sont proposées par les spécialistes ((Dreux & Festa, 1998), (Xing, 2011)), pour la formulation de notre béton de référence (témoin) il a été retenu l'utilisation de la méthode de Dreux-Gorisse, cette dernière est utilisée avec un grand intérêt pour la confection du béton désiré à base de matériaux locaux, et d'après la recherche bibliographique elle est largement utilisée dans l'industrie du béton en Algérie.

Notre béton de référence est un béton ordinaire ayant une ouvrabilité plastique (7cm), sa masse volumique théorique est de 2427.658 kg/m^3 et une résistance mécanique visée à 28 jours égale à 25 MPa. Les données de base pour la formulation du béton de référence sont résumées dans le Tableau (II.8).

Tableau II. 8 : Données de base

σ'_n (MPa)	σ'_{28} (MPa)	A (cm)	D_{\max}	σ'_c (MPa)	G	γ_c
25	28,74	7	16	45	0,45	0,82

La figure II.19 présente les différents courbes granulométriques et ligne nécessaire afin de déduire les pourcentages des trois fractions des granulats naturels selon la méthode Dreux-Gorisse. (Dreux & Festa, 1998).

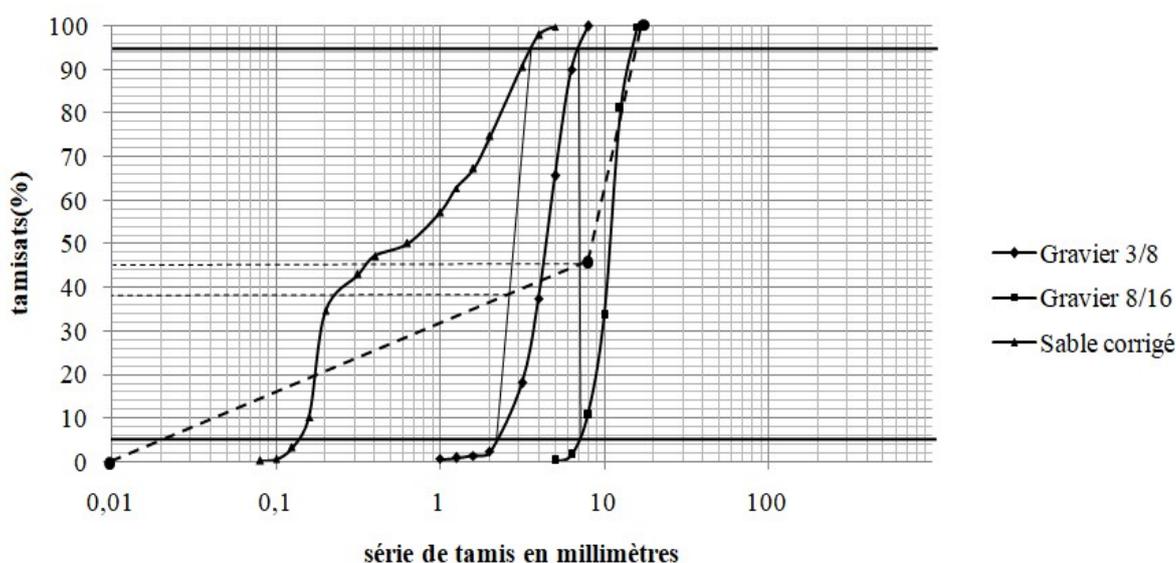


Figure II. 6: Les pourcentages volumétriques des granulats selon la méthode de DREUX GORISSE

Après avoir spécifié la composition de béton classique, l'étape suivante est de définir les dosages de béton de granulat léger BGL. A travers la recherche bibliographique, de nombreux auteurs (Arnould et al., 1986; Cérézo, 2005; Dreux & Festa, 1998; HACHEMI, 2015; Shink, 2003; Xing, 2011) affirment que les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes employées pour les bétons traditionnels à l'exception des granulats ordinaires qui ont été remplacés par des granulats légers, bien sur, sous réserve de quelques corrections expérimentales pour ajuster certaines caractéristiques (consistance, compacité, densité ou résistance) aux valeurs souhaitées (Arnould et al., 1986). Selon Shink, la particularité des granulats légers est leur porosité élevée (entre 25 et 75% du volume apparent) qui se traduit par une faible densité apparente (Shink, 2003). Cependant, l'absorption des granulats légers doit faire l'objet d'une attention particulière, cette absorption d'eau dépend toutefois de l'interconnexion des pores dans les granulats, du degré de saturation initiale des granulats et du rapport eau/ciment de la matrice cimentaire (Shink, 2003). En conséquence, lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par ces granulats ce qui peut influencer l'opération de l'hydratation du ciment. En effet, notre choix s'est porté sur les billes de polystyrène expansé car elles ont une incidence bénéfique sur le critère d'absorption des granulats dont les billes pratiquement n'absorbent pas l'eau à cause de leur critère particulière l'hydrophobe.

Dans ce travail de recherche qui a été limité à l'étude des mortiers et des bétons légers à base de polystyrène expansé, on a opté les taux de substitution volumique des granulats naturels fins (sable) par des granulats de PSE: 5%, 15, 25, 35, 45, 75 et 100%. En revanche, la quantité des gros granulats (gravier 3/8 et 8/16) reste la même pour toutes les mélanges ainsi pour la quantité de ciment. Tandis que la quantité d'eau est variable puisque nous avons fixé le même critère d'ouvrabilité à tous les bétons confectionnés en appuyant sur l'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme NF P 18-451 (Laneyrie, 2014) qui est actuellement en usage dans le monde entier ; il fournit des mesures fiables et de variabilité restreinte. En fonction des affaissements obtenus, la classe d'ouvrabilité des différents bétons est plastique avec un affaissement de l'ordre de 7 cm. Les compositions des huit mélanges de bétons sont reportées dans le tableau (II.9).

Tableau II.9: La composition des différents mélanges de béton de PSE (BPSE)

Dosage (kg/m ³)	BT	BPSE5	BPSE15	BPSE25	BPSE35	BPSE45	BPSE75	BPSE100
Ciment CEM II/A 42.5	420	420	420	420	420	420	420	420
Granulats 8/16	907,12	907,12	907,12	907,12	907,12	907,12	907,12	907,12
Granulats 3/8	189,19	189,19	189,19	189,19	189,19	189,19	189,19	189,19
Sable Corrigé 0/5	659,348	626,40	560,44	494,5	428,57	329,67	61.35	0
PSE 0/4	0	0.37	1.10	1.84	2.57	3.68	5.52	7.36
Eau	252	247.8	239.4	226.8	218.4	205.8	197.4	180.6

II.3.3. Mode opératoire

II.3.3.1 Le procédé de malaxage

Le procédé de malaxage est une tâche primordiale, c'est l'un des paramètres qui influencent les caractéristiques des bétons et affectent leur performance. KOMAR insiste que le malaxage doit assurer un enrobage complet des grains des agrégats et une distribution homogène du mortier dans la masse des gros agrégats. La durée de malaxage des mélanges secs dépend de la fluidité des préparations et de la capacité de la bétonnière employée (Xing, 2011), ce qui nous oblige de bien exposer la méthode de malaxage. La première partie est réservée à la description du malaxage du mortier, puis la deuxième partie est consacrée à la méthode de confection du béton.

A. Malaxage du mortier

Pour la confection du mortier, nous avons utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres de capacité (figures II.7). Le procédé consiste à préparer un mortier classique selon la norme (EN 196-1), les autres gâchées s'articulent au mode opératoire suivante :

Commençant par introduire 80% d'eau, puis les billes de PSE, ensuite le sable et enfin le ciment. Toutes ces opérations se réalisent en malaxeur tournant à vitesse lente puis à vitesse rapide en rajoutant le restant de l'eau selon la nécessité. Le tableau II.10, explique l'ordre chronologique des différentes étapes à suivre :

Tableau II. 10: Les différentes étapes de malaxage

Opérations	80% de l'eau + les billes de PSE	Sable	Ciment	Le reste de l'eau	Raclage de la cuve		
Durée	- 30 s	30 s	30 s	30 s	15 s	1min 15 s	60 s
Etat du malaxeur	Arrêt	Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide



Figure II.7 : Malaxeur à mortier

B. Malaxage du béton

Le malaxage des bétons élaborés au laboratoire a été effectué dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 56 L. Il sera prudent d'humidifier la bétonnière avant la première gâche, les gâches s'articulent selon la procédure de gâchage en suivant les étapes comme suit:

- ◆ Introduction du sable, du ciment et les deux classe des graviers (3/8 et 8/16) ; puis un malaxage à sec pendant 1 minute;
- ◆ Ajout de l'eau de gâchage puis un malaxage pendant 2 minutes ;
- ◆ Continuer à malaxer en introduisant le polystyrène expansé PSE jusqu'à 5 min, le malaxage est meilleur, la dispersion des constituants ainsi, et par conséquent, l'obtention d'un mélange homogène,



Figure II. 8: Le malaxage des bétons au laboratoire

II.3.3.2 Préparation et conservation des éprouvettes

Après homogénéisation du béton frais, ce dernier est mis en place par vibration, sur table vibrante, dans des moules de dimensions choisies conformément à la norme NF

P.18-400(NFP, 1981). Pour les mortiers légers, la mise en place dans les moules est effectuée sans vibration à cause de leur fluidité, d'ailleurs pour les composites fluides un simple piquage est le plus adéquat.

Pour chaque essai et une composition donnée, trois échantillons ont été préparés et conservés avant et après le démoulage. Les éprouvettes ont été recouvertes d'une plaque plastique afin d'éviter toute évaporation d'eau. Ces précautions ont permis aux éprouvettes de subir une première cure de 24 heures. Ensuite, après 24 heures, toutes les éprouvettes ont été démoulées et placées dans des bacs remplis d'eau dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 2$ jusqu'au jour de l'essai afin d'assurer l'hydratation du composite cimentaire et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation, par contre les éprouvettes de test de retrait ont été démoulées et conservées dans une salle conditionnée à 50% d'humidité et $20^{\circ}\text{C} \pm 2$.

Avant les essais physico-mécaniques et thermiques, les échantillons ont été laissés sécher dans une étuve à 50°C , pendant 6 jours jusqu'à l'atteinte d'une masse constante dans le but d'éviter les effets de la teneur en eau susceptibles de se varier d'un échantillon à un autre. D'ailleurs le choix de la température d'étuvage liée à la température de moulage des perles de PSE est compris entre 110 et 120°C afin d'éviter le changement thermique des billes de PSE, cette phase est dite aussi phase d'autoclave (Yvrard, 1998). Cette procédure a été suivie pour toutes les compositions et pour tous les essais. Pour les essais de retrait et gonflement, les échantillons ont été munis à leurs extrémités de plots métalliques.



Figure II. 9 : Conservation des éprouvettes

II.4 Campagne de caractérisation des composites légers

Nous rappelons que l'étude accentue sur deux types de composite qui sont les mortiers et les bétons. Dans un premier temps, nous avons commencé la confection des mortiers légers, pour chacun des mélanges de mortier, des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{cm}$ destinées aux essais de compression, de flexion, de traction par flexion, de porosité, d'absorption capillaire ainsi que pour les essais de retrait & gonflement. En plus, des éprouvettes $4 \times 10 \times 10 \text{cm}$ destinées pour les essais thermiques ont été confectionnées. Dans le but d'examiner les propriétés des mortiers légers, nous avons basé sur la confection des mortiers dont le nombre d'éprouvettes réalisées arrive à 294 éprouvettes. D'où le programme expérimental se décompose en deux parties: La première est consacrée à l'étude des mortiers légers quant à la deuxième partie on s'intéresse aux bétons légers. Les essais de caractérisation sur mortier et béton sont résumés dans le tableau (II. 11).

Tableau II. 11 : Quantité et programme des essais réalisés sur mortier et béton léger

	Essais	Formule	Dimension des éprouvettes	Appareils	Nombre d'essais
A l'état frais	Ouvrabilité	T (s)	30 x 15x15	Maniabilimètre	42 M
		Aff(cm)	x15	Cône d'Abrams	24 B
	Masse volumique	$\gamma = \frac{m}{v}$	1L	Moule (1L)+ Balance	42 M
					24 B
Air occlus	$Air\% = \frac{vfl}{vt}$	1L	Aéromètre	42 M	
A l'état Durci	Masse volumique	$\gamma = \frac{m}{v}$	4x4x16	Pied coulisse (1L)+ balance	42 M
			10x10x10		24 B
	Résistance à la compression	$R_c = \frac{F}{S}$	4x4x16	Presse hydraulique	84 M
			10x10x10		24 B
	Résistance à la flexion	$R_{fl} = \frac{FL^2}{8}$	4x4x16	Presse hydraulique	42 M
			10x10x40		24 B
	Résistance à la traction	$R_{tfl} = \frac{FL}{bxH^2}$	4x4x16	Presse hydraulique	42M
			10x10x40		24B
	Module d'élasticité dynamique	$E_d = \frac{V^2 \rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$	4x4x16	Ultrason	42M
			10x10x40		24B

Retrait & gonflement	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$	4x4x16	Retractomètre	24B
		7x7x28		
Absorption d'eau par immersion	$A_{im}(\%) = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$	4x4x16	Essai d'absorption par immersion	42M
		10x10x10		24B
Absorption capillaire	$A_{abs}(Kg / m^2) = \frac{M(t1) - M(t0)}{S^2}$	4x4x8	Balance	42M
		10x10x10		24B
La porosité	$P(\%) = \frac{M_a - M_s}{M_a - M_e} \times 100$	4x4x16	Dessiccateur	42M
		10x10x10		24B
La résistance à l'eau acide	Perte de masse(%); porosité (%); Rc (MPa)	10x10x10	Solution d'acide chlorhydrique 5%	24B
Carbonatation accélérée		7x7x7		24B
Résistance au feu	Perte de masse ; V ; Rc	10x10x10	Four à moufle	24B
Microstructure	Images	1x1x1cm	M.E.B	10
Les propriétés thermiques	λ, c_p Directement données par l'appareil	4x10x10	CT-mètre	126 M
				72B
Les propriétés acoustiques	V, Z, α , R et T	4x4x16	Ultrason	42M
		10x10x40		24B



Figure II. 10: Les différentes étapes de formulation, façonnage, affaissement et conservation.

II.4.1 à l'état frais

II.4.1.1 Ouvrabilité du mortier de PSE

Selon les normes (18-452, Mai 1988.)[NF P 18-452] et [NF P 15-437] le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du mortier avant prise, et classer les mortiers suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide) (DUPAIN.R et all ; CASTEILLA, 2000). Dans cet essai la consistance a été caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à mortier (figure II.11) et comporte :

- ◆ Unique un boîtier parallélépipédique métallique (30 x 15 x15 cm) ;
- ◆ Une cloison amovible ;
- ◆ Un vibreur ;
- ◆ Un chronomètre ;



Figure II.11 : Maniabilimètre à mortier

Le principe de fonctionnement du Maniabilimètre à mortier est illustré dans la figure II.12 et se résume comme suite :

- ◆ Huiler légèrement les parois internes de la cuve ;
- ◆ Remplir le mortier ;
- ◆ Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches ;
- ◆ Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piquage ;
- ◆ Araser la dernière couche ;
- ◆ La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre en même temps que la cloison est retirée ;
- ◆ 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.

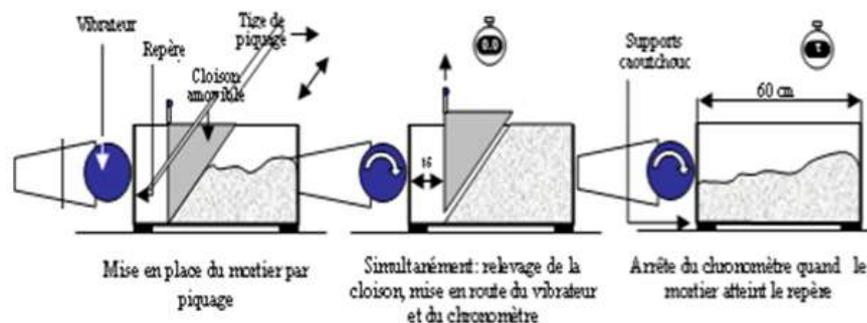


Figure II.12 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à mortier

II.4.1.2. Ouvrabilité du béton « Essai d'affaissement au cône d'Abrams »

L'évaluation de l'ouvrabilité des bétons de PSE est réalisée à travers les mesures de l'affaissement effectuée à la fin du malaxage selon la norme NFP 18-451 dans le but

de fournir un indice de la maniabilité du mélange. Cet essai, est le plus utilisé, il permet de mesurer la consistance de façon efficace.

Pour suivre les prescriptions de la norme, après avoir huilé, on remplit le mélange de béton dans un moule en tôle tronconique ($D = 20 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$), placé sur une surface métallique lisse légèrement humidifiée, serrée avec des écrous, la petite ouverture vers le haut. Le remplissage s'exécute en trois couches tassées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. Une fois le cône rempli, le béton léger en excès à la surface a été arasé. A la fin, on soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement qui est exprimé en cm. Suivant la valeur de l'affaissement A_{ff} un béton peut être ferme, plastique, très plastique ou fluide.

Nous avons limité l'ouvrabilité de nos mélanges à un seul domaine, afin de contrôler la quantité et le besoin en eau du matériau frais. Une bonne maniabilité du béton est requise en termes de fluidité, de déformabilité, de bonne capacité de remplissage et de résistance à la ségrégation pour obtenir une distribution uniforme des granulats et l'encapsulation du renforcement dans le béton (Wu et al., 2009). De ce fait, l'affaissement du béton de référence pris égal à 7cm, s'agissant d'un béton plastique. Avec l'incorporation des billes de PSE, les bétons de PSE deviennent plus plastiques, malgré la réduction d'eau (tableau II.9). Cela est justifié par la très faible capacité d'absorption du polystyrène en raison de sa structure cellulaire fermée (Tang et al., 2008b).

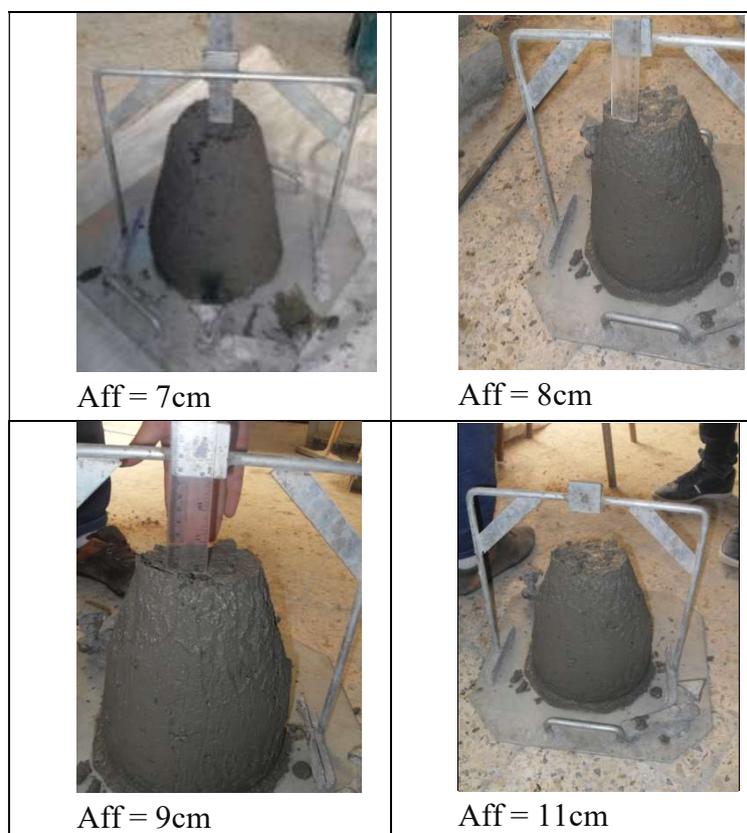


Figure II.13: Essai d'affaissement au cône d'Abrams

A travers les résultats trouvés

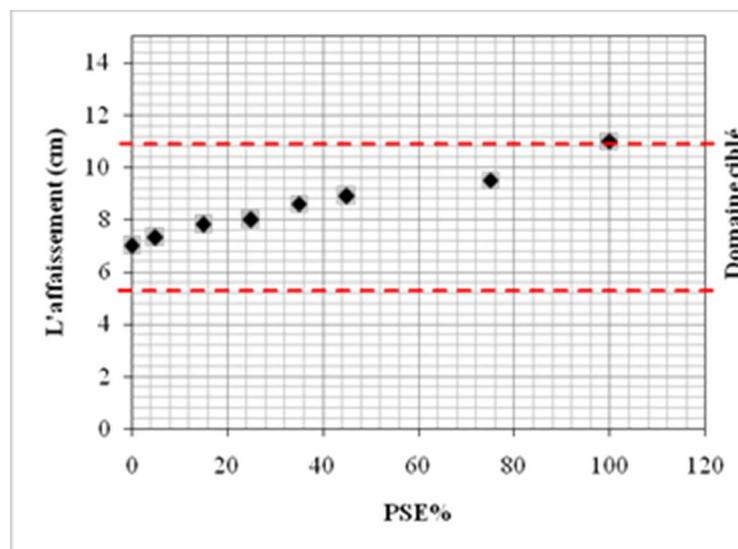


Figure II.14: Domaine ciblé de l'affaissement au cône d'Abrams

II.4.1.3 La masse volumique

La masse volumique joue un rôle capitale pour les composites légers, sa détermination est donc essentielle. Les mesures ont été effectuées conformément à la norme NA436. La méthode consiste à remplir le récipient de 1l de volume en trois couches égales, puis donner 25 coups avec la tige de picage à chacune des couches. Une fois rempli et nettoyé, il a été pesé pour déterminer la masse du béton, La masse volumique est donnée par le rapport de la masse du béton et le volume du récipient (1l).



Figure II.15 : Mesure de la masse volumique à l'état frais.

II.4.1.4 Air occlus

Selon la norme (NF P 18-353), une cuve hermétiquement close accueille un volume donné de mortier. Ce mortier contient de l'air, susceptible d'être comprimé sous l'action d'une pression (DUPAIN.R et all ; CASTEILLA, 2000). Lorsqu'on applique une pression à l'ensemble mortier / air occlus par l'intermédiaire d'un fluide incompressible, la pression se transmet intégralement à l'air occlus (on suppose les autres éléments du mortier incompressible). L'air est comprimé sous une pression permettant de négliger son volume final au regard de son volume initial. Le fluide incompressible occupe la place de l'air occlus dans le mortier. Le rapport de son volume déplacé au volume total utilisé permet de déterminer le pourcentage volumique d'air occlus.

a) Equipement nécessaire

- ◆ Une balance permettant de peser à 1g près,
- ◆ Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier,
- ◆ Un aéromètre à mortier d'une capacité de 1L (figure II.16).



Figure II.16 : Aéromètre à mortier

b) Exécution de l'essai

◆ Introduire le mortier dans la cuve de mesure en trois couches approximativement de même volume. Mettre en place chaque couche de mortier par 25 coups de tige de piquage également répartis sur toute la section, suite au piquage de chaque couche, tapoter de coups secs les parois du bol 10 à 15 fois avec un maillet, jusqu'à ce que tous les vides laissés par le piquage soient comblés et que de grosses bulles d'air n'apparaissent plus à la surface de la couche qui vient d'être mise en place par piquage ;

◆ Ajouter la couche de mortier finale de manière à éviter un trop plein excessif, araser la surface supérieure à l'aide d'une règle métallique ;

◆ Mettre en place le couvercle sur la cuve, le fixer en bloquant les attaches rapides diamétralement opposées (Figure II.16);

◆ Ouvrir les vannes rouges sur le couvercle;

◆ Par la vanne de gauche, au moyen d'une pissette remplir l'aéromètre jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air et que l'eau parvienne à la vanne de droite. A la fin du remplissage, incliner légèrement l'appareil de façon à ce que la vanne de droite se trouve plus haut que la vanne de gauche. Fermer les deux vannes ;

◆ A l'aide de la pompe à main, amener l'aiguille du manomètre en face du repère rouge sur le cadran. Laisser s'équilibrer la pression (qui peut retomber) et pomper de nouveau de sorte à dépasser légèrement le repère. Ajuster alors précisément la position de l'aiguille à l'aide du bouton poussoir noir;

◆ Tapoter légèrement sur le manomètre et l'aéromètre pour assurer que la pression ne change pas.

II.4.2 à l'état durci

II.4.2.1 Masse volumique apparente

La masse volumique sèche du composite a été évaluée par pesée, à l'aide d'une balance à 0.01 g près, on mesure les dimensions des échantillons, à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0,01 mm. Pour chaque composition, la masse volumique sèche apparente représente la moyenne de trois mesures.

$$\gamma = M/V \dots\dots\dots(\text{Eq.II.1}),$$

Sachant que : γ la masse volumique exprimé en Kg/m^3 , M la masse des éprouvettes en Kg et V le volume des éprouvettes en m^3 .



Figure II.17 : Mesure de la masse volumique des composites.

Ces mesures sont effectuées sur trois éprouvettes cubiques de 10x10x10 mm en béton, et 4x4x16 en mortier. La masse volumique sèche à 28 jours de cure présentée dans le Tableau II.13 ainsi que les écart-types correspondants.

Tableau II.12 : La masse volumique sèche et les écart-types correspondants.

Epreuves		Masse volumique	Moyenne (Kg/m3)	(Ri-Rm) ²	Ecart type
BPSE %	N°				
BT	1	2412,000	2412,667	0,444	4,041
	2	2417,000		18,778	
	3	2409,000		13,444	
BPSE5	1	2340,728	2341,185	0,209	1,493
	2	2342,853		2,782	
	3	2339,974		1,467	
BPSE15	1	2115,161	2115,163	0,000	2,009
	2	2117,173		4,039	
	3	2113,156		4,030	

BPSE25	1	2090,691	2090,370	0,103	4,750
	2	2094,951		20,986	
	3	2085,468		24,030	
BPSE35	1	2034,901	2032,070	8,013	2,631
	2	2029,700		5,618	
	3	2031,610		0,212	
BPSE45	1	2010,330	2008,017	5,348	2,040
	2	2006,475		2,379	
	3	2007,247		0,593	
BPSE750	1	1725,047	1722,455	6,720	3,035
	2	1719,116		11,147	
	3	1723,201		0,557	
BPSE100	1	1681,229	1675,698	30,592	5,623
	2	1675,878		0,032	
	3	1669,987		32,616	

On peut constater la relation directe des masses volumiques (γ) des bétons légers avec la fraction volumique des perles de PSE. γ , elle diminue quand la fraction volumique augmente. Afin de quantifier cette diminution, on a calculé l'écart entre les masses volumiques des différents composites légers dont les fractions volumiques de perles de PSE allant de 5 à 100%, à celle du béton témoin, comme présenté dans l'équation II.2 et le Tableau II.13.

$$Ecart(\%) = \frac{\gamma_{BT} - \gamma_{BPSE}}{\gamma_{BT}} \times 100 \dots \dots \dots \text{II.2}$$

Avec γ_{BT} et γ_{BPSE} les masses volumiques pour le béton témoin et le béton léger respectivement.

Tableau II.13 : Ecart des masses volumiques entre le béton témoin et les bétons légers

PSE%	Ecart (%)
0	0,00
5	2,94
15	12,31
25	13,33
35	15,75
45	16,75
75	28,59
100	30,53

Le Tableau (II.13) montre la présence d'un écart évolué dans le sens de l'évolution des teneurs en perles de PSE.

II.4.2.2 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques en compression et en traction par flexion sont déterminées suivant la norme EN 196-1 [31], à l'aide d'appareil de type PERRIER 41.04, équipé d'un système d'acquisition et de type PERRIER 68.7, d'une capacité de 300 KN sous un asservissement en force de 10 ± 4 KN/s et pendant l'essai, la vitesse de chargement est constante.

II.4.2.2.1. Résistance à la compression

La résistance mécanique à la compression a été mesurée selon la norme NF EN 196 par compression axiale sur des éprouvettes de $10 \times 10 \times 10$ en béton, et pour les éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16)$ cm³, divisés en deux après l'essai de flexion. Ces demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction par flexion seront rompus à la compression. La résistance est prise à 3, 7, 28 et 90 jours, à l'aide d'une presse hydraulique. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai. Comme indiquée sur la figure II.18, la contrainte de rupture est calculée comme suit:

$$R_c = F_c / b^2 \dots\dots\dots \text{Eq. II.3}$$

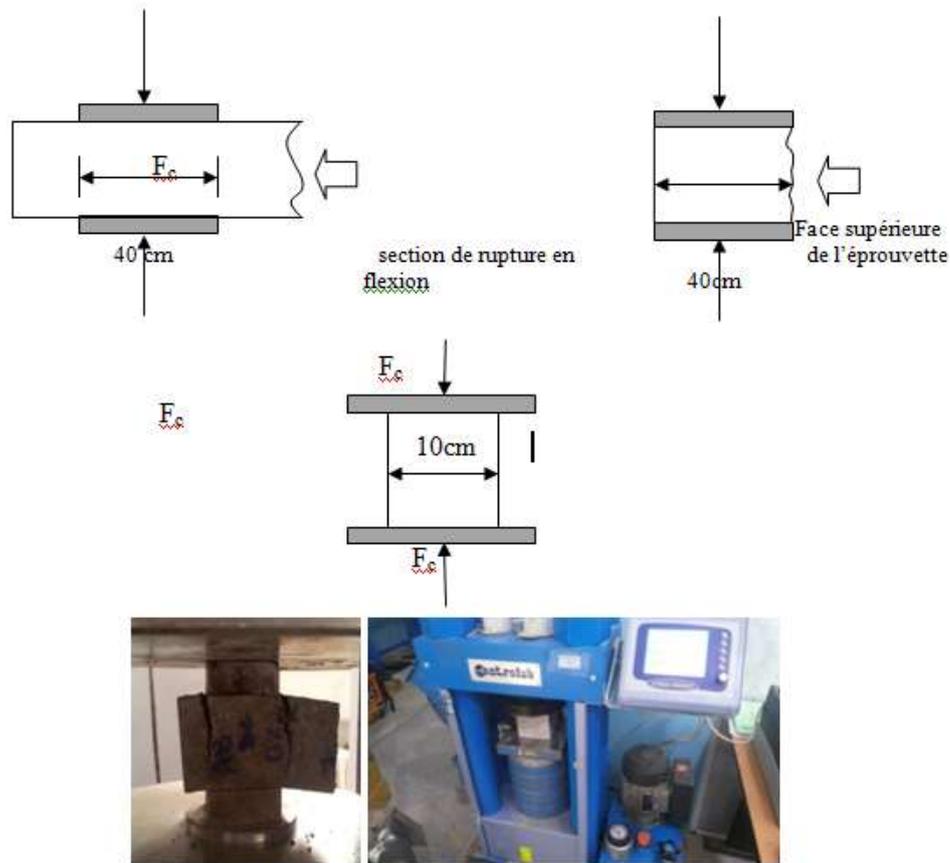


Figure II.18 : dispositif de rupture à la compression

II.4.2.2.2. Résistance à la traction par flexion

Les selon la norme EN 196-1 c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion par trois points figure II.19, une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L .

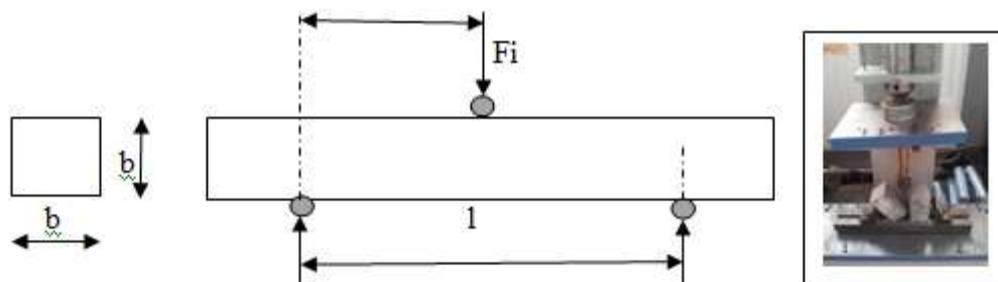


Figure II.19 : dispositif de rupture à la traction par flexion

II.4.2.3 Module d'élasticité dynamique

Le module de Young des bétons est bien évidemment extrêmement important à connaître, c'est un paramètre permet de quantifier l'avancement de l'état de dégradation

de béton à la suite de différentes pathologies comme celle de la réaction alcali-granulat et des réactions sulfatiques internes ou externes se caractérisant par un gonflement interne du béton. La mesure peut se faire par essais destructifs (essais de compression, de fendage ou de flexion) ou par examens non destructifs (examens acoustiques ou par ultrasons). En effet, la vitesse de propagation des ondes sonores ou ultrasonores dans un milieu continu dépend de l'élasticité de ce milieu, fonction elle-même de son module de Young. A l'heure actuelle, l'accent est porté sur la recherche de nouveaux matériaux possédant un module de Young élevé tout en restant léger.

Plusieurs recherches démontrés qu'il est possible de mesurer le module d'élasticité dynamique par l'utilisation des méthodes de contrôle non destructif établies sur la base de la propagation des ondes soniques. C'est notamment le cas dans le procédé qui utilise la mesure de la vitesse de propagation d'ondes sonores.

Dans notre cas, la détermination du module d'élasticité dynamique du composite a été effectuée par auscultation ultrasonore, suivant la norme NF P 18-418 (AFNOR). Le principe est basé sur la détermination de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans le matériau (célérité). Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent sous forme d'ondes, produisant un champ sinusoïdal de contraintes mécaniques. Pour un échantillon soumis à des oscillations forcées, il y a une propagation d'ondes élastiques correspondant à des déformations de traction-compression. La déformation de la matière se produit dans le sens de la propagation. A l'aide d'un appareil d'auscultation sonique des structures, type Controlab (Figure II.20). Le module élastique est déterminé à 28 jours, lors d'un essai de compression sur des éprouvettes prismatique de dimension 40 x 40 x 160(mm) en mortier et 100x100x400mm en béton mûries à l'eau, en utilisant des méthodes de contrôle non destructif établies sur la base de la propagation des ondes soniques.



Figure II. 20: Ultrason de type

Le principe est basé sur la détermination de la vitesse de propagation des ondes élastiques en mesurant exactement le temps écoulé entre l'émission et la réception d'une impulsion. Emetteur et récepteur sont en général constitués par des quartz piézo-électriques adhérant à l'éprouvette en béton et qui transforment les forces mécaniques en courants électriques et inversement. Leur écartement représente la longueur parcourue qu'il est nécessaire de connaître pour le calcul de la vitesse. Cette méthode est applicable aux mesures sur éprouvettes ou sur béton in situ. La plus grande longueur sur laquelle on puisse faire cette mesure au moyen de tels appareils est de 6 à 7 m.

La vitesse de propagation du son à travers les éprouvettes est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

Où :

V : est la vitesse de propagation du son, en km/s ;

L : est la longueur de parcours, en mm ;

T : est le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur, en μs .

Par cette méthode de mesure de vitesse d'impulsion, on détermine le module d'élasticité dynamique en utilisant la formule (II.5).

$$E_d = \frac{V^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \dots\dots\dots\text{II.5}$$

Tel que :

E_d : modules d'Young dynamiques;

V : Vitesse des ondes sonores m/s ;

ρ : Masse volumique apparente (kg/m^3)

ν : Coefficient de poisson (0.2), pour le béton légers est à peu près le même que celui du béton normal(Shink, 2003).

Selon la littérature, Le module d'élasticité d'un béton léger est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans la faible rigidité des granulats légers (< 20GPa) qui entraîne un module élastique du béton plus faible (25 GPa) que celui du béton ordinaire (37 GPa) (Calais, 2013).

II.4.2.4. Absorption

La capacité d'absorption d'eau par immersion et par capillarité, est le pouvoir d'un matériau d'absorber et de retenir l'eau par la porosité des composites, c'est un caractère fondamentale à mesurer pour les composites légers.

II.4.2.4.1 Absorption d'eau par immersion

L'essai consiste à mettre des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm³ en mortier et 10x10x10cm³ en béton) à l'étuve (50°C) jusqu'à une masse constante, ensuite en les immergeant totalement dans l'eau pendant 24h à 20°C à la pression atmosphérique (c'est-à-dire jusqu'à la saturation du matériau). D'après **A. komar (A.Komar, 1978)**, l'absorption se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé et s'exprime en pour cent de la masse d'un matériau sec. Suivant la formule suivante :

$$A_b = (M_2 - M_1)/M_1 \times 100. \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

Avec A_b : coefficient d'absorption
M1 : poids sec du matériau
M2 : poids humide du matériau

La plupart des bons bétons ont une absorption bien inférieure à 10% en masse. (Neville, 2000).

II.4.2.4.2 Absorption d'eau par capillarité (NE-13057)

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau des composites, on prend des éprouvettes de dimensions (4x4x8) pour le mortier, et en forme cubique pour le béton (10×10×10 cm) déjà séchés dans une étuve ventilée à 50°C, jusqu'à masse constante, après cette étape, les quatre faces latérales des éprouvettes sont couvertes par un film protecteur afin d'assurer que l'absorption soit uniquement capillaire. Après le séchage de ces derniers, on le pèse (m_0), ces éprouvettes sont par la suite introduites dans un bac remplis de 0.5cm d'eau, pendant 24 heures, la nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein (figure. II.6), pendant chaque intervalle de temps (60s, 5min, 10min, 20min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h, on remeasure les morceaux (m_i), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé ($m_i - m_0$) (ASTM C1585 – 11).

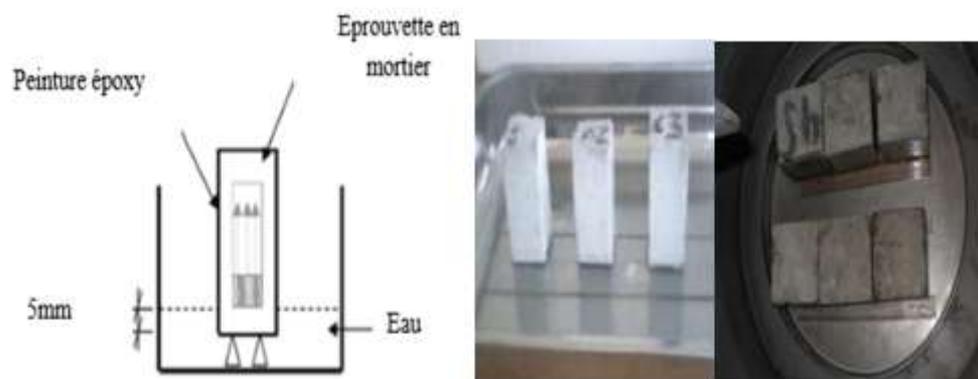


Figure II.21 : Essai d'absorption d'eau par capillarité sur mortier et béton.

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

II.4.2.5 La porosité accessible à l'eau

a- imbibition du corps d'épreuve

Placer le corps d'épreuve dans un récipient étanche, une fois le récipient fermé, faire le vide jusqu'à ce que l'on atteigne une pression constante de 25 mbars ; maintenir ce vide pendant au moins 4h. Pour s'assurer que le dégazage des corps d'épreuve est terminé, déconnecter le récipient de la pompe à vide et vérifier à l'aide d'un manomètre que la pression ne remonte pas dans le corps d'épreuve. Reconnecter le récipient à la pompe à vide et introduire progressivement l'eau d'immersion de façon qu'après 15 minutes, le corps d'épreuve soit recouvert d'environ 20 mm d'eau. Maintenir cette pression réduite pendant 20h à 20°C, puis déconnecter la pompe et ouvrir le récipient.

b. Détermination de la masse du corps d'épreuve immergé :

Suspendre le corps d'épreuve à l'aide d'un fil à partir du système de suspension de la balance hydrostatique et le peser complètement immergé dans une certaine quantité d'eau d'immersion contenue dans un bêcher. On obtient ainsi la masse M_{eau} du corps d'épreuve immergé, sachant que la pesée doit être effectuée à 0,01 g près, avec la détermination de la température de l'eau d'immersion.

c. Détermination de la masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air :

Extraire le corps d'épreuve de l'eau et l'essuyer rapidement et soigneusement, à l'aide d'une éponge ou d'une ligne humide, afin de débarrasser des gouttelettes et du film superficiel d'eau, sans toutefois retirer l'eau des pores.

Peser immédiatement le corps d'épreuve dans l'air à 0,01 g près. S'assurer que l'évaporation de l'eau d'imbibition ne provoque pas de perte de masse appréciable pendant les opérations de l'eau de pesées. On obtient, de cette manière, la masse M_{air} du corps d'épreuve imbibé.

d. Détermination de la masse du corps d'épreuve sec :

Sécher le corps d'épreuve à $50 \pm 5C^\circ$ jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives, avant et après un séjour de 24 h à l'étuve, ne diffèrent pas de plus de 0,05 %. Avant chaque pesées, placer l'éprouvette dans un dessiccateur jusqu'à ce qu'elle atteigne la température ambiante. Les pesées doivent être effectuées à 0,05 g près. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche (M_s) La porosité accessible à l'eau, exprimée en pourcentage en volume, est donnée par l'équation (II.7) :

La porosité accessible à l'eau, P, exprimé en pourcentage en volume, est donnée par l'équation:

$$P = (M_a - M_s) / (M_a - M_e) \times 100 \dots\dots\dots(Eq.II.7) ,$$

Tel que:

M_a : La masse d'éprouvette imbibée pesée dans l'air

M_s : La masse d'éprouvette au sec

M_e : La masse d'éprouvette immergée dans l'eau



Figure II. 22: Dispositifs utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau

II.4.2.6 Essai de retrait et gonflement

Selon la norme NFP 15-433, la mesure du retrait de séchage et le gonflement a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 en mortier et 7x7x28 en béton à l'aide d'un retractomètre au cours du temps. Ces éprouvettes sont équipées de

plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans le retractomètre, qui permet le suivi de la variation de longueur de l'échantillon. Le retrait et le gonflement de chaque composites sont mesurés du 1j jusqu'à 60js, selon la norme NF P (15-433).



Figure II.23 : Le Retractablemètre

II.4.2.7 Essais d'approche de durabilité

Le béton est un composite poreux. La notion de durabilité exige qu'il doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée d'utilisation. Cependant, la vitesse de dégradation dépend de nombreux paramètres comme la proportion des produits chimiques dans la solution, transport par diffusion, les réactions chimiques de dissolution-précipitation, la durée d'exposition et du niveau et de l'instabilité thermique...ect. C'est dans ce contexte que cette étude a été entreprise.

La qualité et la performance des composites élaborés sont fondamentales pour décrire leur durabilité vis-à-vis l'agressivité du milieu et le l'instabilité thermique. Trois types des essais de vieillissement accéléré sont effectués :

- ✓ Essai de résistance des composites au contact d'une eau acide ; (ASTM C 267)
- ✓ Essai de carbonatation accélérée ; (NF EN 14630)
- ✓ Essai de résistance des composites exposés aux températures élevés.

La sensibilité des bétons étudiés à ces environnements a été évaluée par la mesure de leurs propriétés physico-mécaniques et des appréciations visuelles.

II.4.2.7.1 Essai de résistance des composites au contact d'une eau acide

Un matériau durable suppose une aptitude à résister aux attaques d'agents agressifs à long terme, qu'ils soient de nature physique ou chimique. La dégradation d'un matériau en milieu chimiquement agressif se traduit physiquement par une perte de

résistances mécaniques, liée à une perte progressive de masse, du fait de la décohésion des granulats et des produits hydratés de la matrice.

La résistance du composite aux attaques du milieu acide a été étudiée en évaluant les propriétés physico-mécaniques des composites, conservé dans une solution d'acide de chlorhydrique (HCL) à 5%. On a effectué l'examen sur des éprouvettes avec des teneurs en perles de PSE de 5, 15, 25, 35 et 45% et l'éprouvette du béton témoin, donc six (06) éprouvettes prises pour réaliser cet essai de dimensions 100 x 100 x 100 mm, sont préparées et conservées, avant et après démoulage, dans une cure par immersion dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, pendant 28 jours. Après cette période de cure, les échantillons ont été conservés dans l'eau jusqu'à la saturation totale. Ensuite, ils ont été immergés dans une solution aqueuse de HCL à une concentration de 5%, acide fort, pendant 90 jours. La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans la solution est évaluée selon la norme ASTM C 267-96.

Les éprouvettes sont ensuite lavées à l'eau du robinet après chaque retrait de la solution acide, pour éliminer les matières altérées et laissées égoutter pendant une demi heure à l'air libre, puis séchées pendant vingt-quatre (24) heures dans une étuve à 50°C , afin d'accélérer leur vieillissement, ensuite elles sont pesées après chaque mouillage et séchage. Les mesures de masses et les examens visuels ont eu lieu durant trois (03) mois. Cette opération est effectuée après 1, 7, 14, 21, 28, 56, et 90 jours après l'immersion. La solution d'attaque est renouvelée chaque 07 jours, afin d'assurer la sévérité de la solution acide. Enfin la résistance chimique est évaluée par la mesure de la perte de masse des éprouvettes, de l'évolution de la porosité et par l'évaluation des détériorations produites en fonction du temps d'immersion.



Figure II. 24 : Éprouvettes immergées dans la solution de l'acide chlorhydrique (HCl).

Alors, La résistance du composite aux attaques du milieu acide consiste à évaluer la perte de masse suite à la désagrégation du composite, l'évolution de la porosité et de la résistance à la compression, pour la caractérisation de la cohésion de la matrice et la perte des résistances mécaniques ou le coefficient de résistance mécanique, après une période de d'immersion de 90 jours dans la solution acide. Ce coefficient de résistance est défini par le rapport de la résistance mécanique du composite conservé dans la solution à celle du composite conservé dans l'eau.

II.4.2.7.2 Essai de carbonatation accélérée

Les essais de carbonatation ont été conduits selon la norme NF EN 14630 «Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton par la méthode de la phénolphthaléine». Après 28 jours de conservation, les échantillons de béton sont placés dans une enceinte hermétique (voir figure II.25), dans l'enceinte hermétique le mélange gazeux régnant est composé de 50 % de CO₂ et 50 % d'air. L'humidité relative est maintenue entre 60 et 70 % à l'aide d'une solution saturée de nitrite de sodium. La température pendant la période d'essais est d'environ $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Figure. II.25 : Enceinte hermétique (c+hambre de CO₂).

Évaluation de la profondeur de béton carbonaté à partir de mesures effectuées sur des éprouvettes cubiques (70x70x70mm) en béton de PSE. Immédiatement après division des éprouvettes, pour éviter la carbonatation de surface, on pulvérise une faible quantité d'eau distillée ou déminéralisée sur la tranche pour l'humidifier. Puis après absorption de l'eau par le béton on pulvérise l'indicateur coloré de PH (selon la norme de préférence la phénolphthaléine, mais on peut aussi utiliser la thymolphthaléine). Cette solution permet de distinguer deux zones dans la surface pulvérisée :

- une zone interne de couleur rose qui caractérise la zone non carbonatée de la surface avec un PH supérieur à 9,9.
- une zone incolore externe qui caractérise la zone carbonatée de la surface pour un PH inférieur à 8,2. La mesure de l'épaisseur de cette zone caractérise la profondeur du front de carbonatation du béton.

Après environ 15 minutes, on mesure la profondeur du front de carbonatation sur les deux faces de l'éprouvette cubique chaque 2 cm. La profondeur du front carbonaté est représentée par la moyenne de ces mesures, et les mesures sont effectuées pour chaque type de béton après 30 jours passés en enceinte de CO₂.

II.4.2.7.3 La résistance au feu (ASTM E 2032-09)

L'instabilité thermique des bétons est un phénomène particulier pouvant être préjudiciable pour la stabilité d'une structure pendant et après un incendie. Les frais d'immobilisation et de réparation des structures endommagées par instabilité thermique du béton sont généralement très élevés (Mindeguia, 2009). Le béton perd graduellement ses caractéristiques physico-mécaniques lorsqu'il est exposé à la température élevée et

il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur (HACHEMI, 2015). Plusieurs chercheurs (HACHEMI, 2015; Hager & Pimienta, 2005; Laneyrie, 2014; Mindeguia, 2009) ont trouvé que le type du composite cimentaire, le type des granulats, la durée de durcissement, la température maximale et le temps d'exposition influent sur le comportement du béton classique envers la haute température. En revanche, peu de travaux de recherche effectués sur les bétons de granulats légers exposés à des températures élevées.

Dans le but d'étudier la résistance à haute température des composites élaborés, il est nécessaire de leur faire subir différents cycles thermiques. La Norme RILEM [Rilem, 2004], recommande pour un diamètre des cylindres compris entre 6 et 10 cm une montée en température comprise entre 1°C/min et 10°C/min avec un palier de 60 ± 5 min. Nous avons choisi, pour la sollicitation thermique des éprouvettes cubiques d'arrête 10cm, d'appliquer une vitesse de chauffage 10°C/min pour tous les éprouvettes.

Les éprouvettes retenues pour cette étude sont de teneurs en bille de PSE de 0%, 5%, 15%, 25%,35% et 45%. Des cubes en béton de PSE de 10×10×10cm sont préalablement préparées pour le traitement thermique, elles sont étuvées à 50°C pendant 6 jours jusqu'à la stabilisation de leurs masses. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle dont les dimensions utiles sont de 25x28x18 cm (figure 4) à différentes températures 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de chauffe égale à 10°C/min, puis maintenues en température dans le four pendant 1 heure conformément à la norme ISO 834(Ramli Sulong, Mustapa, & Abdul Rashid, 2019). Tous les d'éprouvettes sont refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis testés.

Pour chaque température trois critères sont évalués, d'abord des mesures de pertes de masse puis des mesures de la vitesse du son, et enfin l'écrasement de ces éprouvettes afin d'évaluer la résistance à la compression. De plus, à la fin de chaque cycle, des constatations visuelles sont faites afin d'identifier les endommagements produits par la température élevée.

Le degré de déshydratation (Perte de masse (%)) est évalué par la relation suivante :

$$\text{Perte de masse (\%)} = ((M1-M2)/M1)) \times 100 \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Cette perte de masse, permet de quantifier de façon globale, la quantité de matière perdue au cours des cycles de chauffage-refroidissement.



Figure. II.26 : Dispositifs de chauffage.

La figure (II.26) présente les évolutions de la température en fonction du temps au cours des trois cycles de chauffages étudiés appliqués.

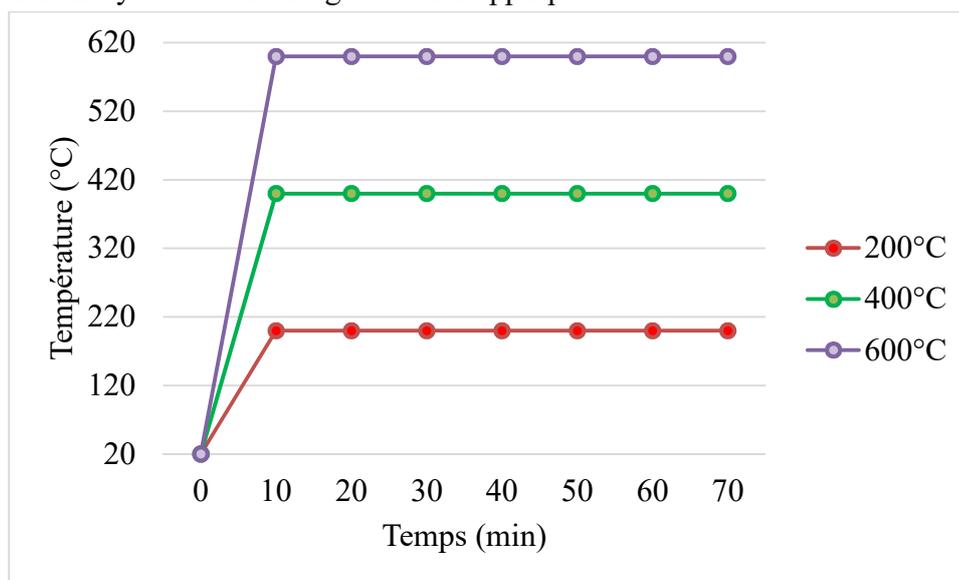


Figure II.26 : Evolution de la température - temps pour des expositions thermiques T200, T400, T600 °C.

II.5 Caractérisation de la microstructure

L'analyse de la morphologie des échantillons des différentes formulations a été effectuée à l'aide d'un microscope électronique à balayage de marque TESCAN VEGA3. Installé à l'université de Biskra (figure II.27a), il est piloté par un ordinateur grâce à un logiciel d'exploitation.

Vu la sensibilité du MEB, les surfaces à analyser doivent être soigneusement préparées, pour éviter justement toute bavure sur la surface à analyser, alors on métallise l'échantillon dans le métalliseur (figure 27b) puis on procède à le placer dans la chambre du MEB.



Figure II. 27 : Le microscope électronique à balayage.

La microscopie électronique à balayage permet qualitativement, de visualiser la zone d'interaction matrice-granulat où le changement de microstructure est mis en évidence, ainsi l'aspect de la matrice et la structure de la bille de PSE.

II.6 Caractéristiques thermiques

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou de plusieurs types d'échange thermique. Elles expriment le comportement du matériau soumis aux transferts stationnaires : conductivité thermique ' λ ', résistance thermique ' R ', émissivité, ou des transferts dynamiques : diffusivité thermique ' d ' et effusivité thermique ' e '.

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.

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur, à titre d'exemples la méthode de plaque chaude gardée, la méthode du fil chaud, la méthode flash, la méthode Hot-Disk et la méthode calorimétrie.

Dans notre cas, la technique de mesure que nous avons utilisée pour déterminer les propriétés thermiques des différents mélanges est la méthode dite du fil chaud, dont l'appareillage utilisé est figuré dans l'Image 11, c'est le CT Mètre conformément à la norme NF EN ISO 8894-1 (2010) (8894-1, 2010). Il est disponible au laboratoire du CNERIB. La durée de chauffage pour chaque mesure effectuée est estimée à 300 secondes. Chaque résultat représente la moyenne de trois mesures effectuées sur chaque échantillon.

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



Figure II.28 : Essai au CT-mètre du CNERIB

Le CT-mètre est caractérisé avec les critères suivants :

- Conductivité de $0,02$ à $5 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times \text{°C}^{-1}$;
- Température de mesure de 20 à 80 °C ;
- Échantillons : au moins $80 \times 40 \text{ mm}$, de quelques millimètres d'épaisseur pour les isolants à quelques centimètres pour les conducteurs.

Les dimensions des éprouvettes de notre étude sont de $100 \times 100 \times 40 \text{ mm}$.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons choisi les matériaux locaux, disponibles sur le marché Algérien (le ciment, les granulats, les super plastifiant, les billes de polystyrène expansé) pour fabriquer les mortiers/bétons légers. Nous avons présenté le détail des différentes caractérisations des matériaux utilisés et les formulations choisies.

Pour évaluer l'influence des propriétés et du dosage des granulats utilisés sur la qualité du composite léger, nous avons présenté un protocole expérimental ; Où en premier lieu on a testé nos mélanges à l'état frais (l'ouvrabilité, masse volumique et l'air occlue). Ensuite, on a passé aux essais à l'état durci relatifs au domaine de structure et qui ont servi pour déterminer les propriétés mécaniques (compression, flexion, traction par flexion et Module d'élasticité dynamique), les propriétés physiques (perte de masse, vitesse du son, absorption d'eau, porosité, retrait et gonflement), Ainsi que les essais de l'approche de durabilité (résistance au milieu acide, carbonatation et résistance au feu). Et à la fin, les essais pour la caractérisation thermiques des produits.

Chapitre III

Résultats et Discussions

Caractérisation physico-mécanique

Chapitre III : Résultats et Discussions Caractérisation physico-mécanique

I. Introduction

La présente recherche a pour but de contribuer d'une part à la valorisation des billes de polystyrène expansé afin d'élaborer un éco-matériau léger en substituant une fraction optimale de granulats naturels par des billes de polystyrène expansé PSE puis fabriquer plusieurs classes de béton servant à satisfaire les conceptions d'utilisation, et d'autre part l'exploitation du sable de dune.

Dans ce chapitre, sont présentés les résultats des essais conduits sur les composites frais et durci, énoncés dans le chapitre précédent, en suivant le programme des essais. Le but de l'étude expérimentale est de décrire l'évolution des propriétés rhéologiques, mécaniques et une approche de durabilité du matériau étudié incorporant certains pourcentages de PSE. Dans ce sens, nous étudions dans un premier temps, l'effet des remplacements du sable corrigé par les billes de PSE sur l'évolution de la consistance de la masse volumique, sur la résistance à la compression, et dans un second temps, l'effet des milieux agressifs sur les formulations de béton de PSE et enfin le comportement de ces composites à haute température.

L'importance de l'étude des composites de PSE que ce soit mortier ou béton est de présenter et de combiner les propriétés spécifiques qui nécessitent des études particulières, que ce soit du point de vue de son comportement mécanique ou bien le comportement vis-à-vis les agressions chimiques tels que les attaques par acides ainsi que la forte montée en température. L'objectif de ce chapitre, est donc la compréhension globale :

En premier lieu, l'effet de la substitution du sable corrigé par les billes de PSE sur le comportement physique et mécanique du mortier et béton.

En second lieu, on s'intéresse à mettre en évidence l'effet de la présence des perles de PSE dans la résistance du composite en milieu chimiquement agressif, à travers l'évaluation de la perte de masse et de la porosité et de la résistance mécanique à la compression après une période de cure de 90 jours dans la solution acide.

En troisième lieu, l'explication du comportement du béton de PSE à haute température et mettre en relation les performances mécaniques et le degré élevé de la température.

III.1 Étude des mortiers légers à l'état frais

Les caractéristiques des mortiers à l'état frais jouent un rôle primordial sur son état durci. Notamment les mortiers de polystyrène expansé, du fait de la propriété hydrophobe du polystyrène, cette propriété nous oblige à réduire la quantité d'eau dans le mélange pour obtenir un mélange homogène et éviter que les billes flottent sur la surface du mélange. D'ailleurs, devant le fait que l'ouvrabilité constitue un atout majeur du matériau en termes de mise en œuvre, l'utilisation d'un plastifiant est fondamentale pour satisfaire une ouvrabilité convenable.

Pour évaluer la rhéologie à l'état frais du mortier élaboré, nous avons basé sur des essais de la maniabilité dont le résultat est quantifié par la mesure de temps d'écoulement, et la masse volumique.

III.1.1 La maniabilité

Le temps d'écoulement pour tous les mélanges se situe entre (7 et 11s) car nous avons fixé la consistance à travers le temps d'écoulement tel que $t \leq 10s$ afin d'avoir un mortier fluide. Pendant la confection des éprouvettes, la mise en place est facile sans aucune tendance à la ségrégation ni au ressuage. Ceci est dû à l'utilisation du plastifiant et à la diminution de la quantité d'eau, ainsi à l'augmentation du pourcentage de PSE qui est caractérisé par une nature hydrophobe.

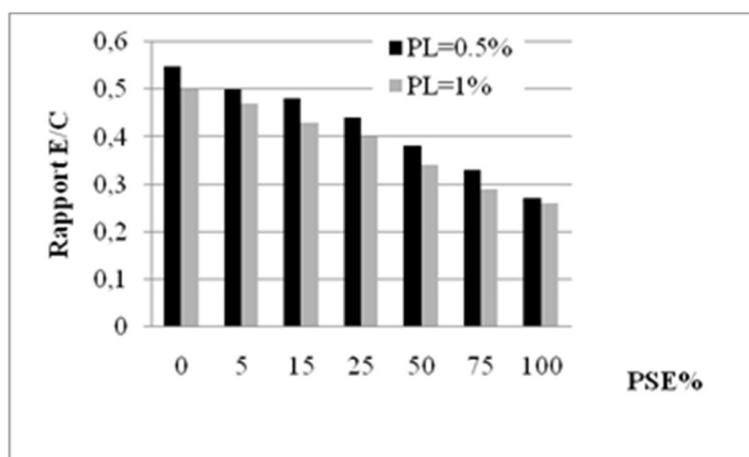


Figure III.1 Le rapport E/C en fonction du pourcentage de PSE

La figure III.1 montre que les valeurs du rapport E/C diminuent avec l'augmentation du dosage des billes de PSE, du fait des propriétés du polystyrène, c'est un matériau qui n'absorbe pas l'eau à travers une structure cellulaire fermée. Ces résultats sont confirmés par les études menées par Bengin et al (Herki, 2017). Kim et al (Kim, Jeon, & Lee, 2012) qui ont étudié l'effet du polystyrène sur la maniabilité des mortiers légers ; et ont trouvé que l'augmentation de la teneur en polystyrène provoque une augmentation de la maniabilité. Madandoust et al (Madandoust, Ranjbar, & Mousavi, 2011) ont montré que l'utilisation de PSE diminuait la demande de réducteur d'eau de gamme élevée, tandis qu'un débit d'affaissement plus élevé était atteint.

Le plastifiant a été ajouté au mélange afin d'améliorer la classe de consistance du mortier avec un temps de fluidité inférieur à 10s. L'optimisation du pourcentage de PL consiste à développer les meilleures caractéristiques du mortier à l'état frais pour assurer de meilleures performances à l'état durci. Dans cette étude, deux pourcentages de PL ont été utilisés ; 0,5% et 1% en poids de ciment.

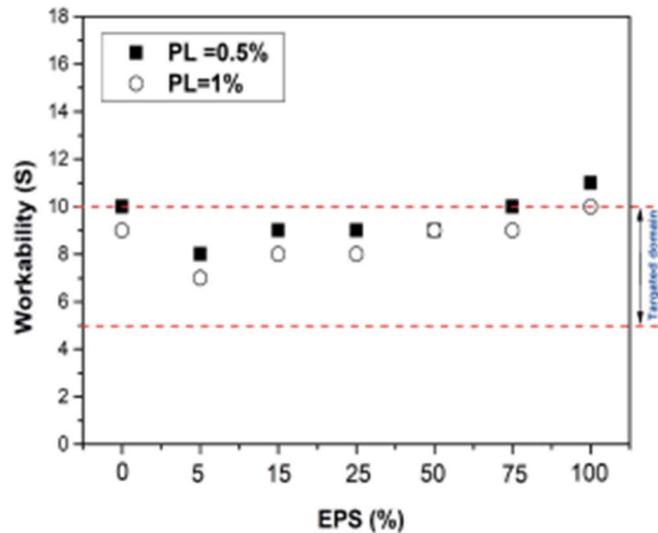


Figure III.2: L'ouvrabilité des mortiers fabriqués avec différents contenus de PSE

La figure III.2 montre la variation de la maniabilité des mortiers avec différents pourcentages de PSE. Comme le montre la figure III.2, le temps d'écoulement pour tous les mélanges était compris entre 7 et 11 s, ce qui indique une bonne consistance et le respect de la limitation du temps d'écoulement de sorte que l'exigence est inférieure à 10 s afin d'avoir une fluidité similaire. Il a été noté que les mortiers à 1 % de PL ont une fluidité élevée par rapport à ceux à 0,5 % de PL (Tasdemir, Sengul, & Tbdemir, 2017). Pour le contrôle visuel, le réglage est facile sans aucune tendance à la ségrégation ou au saignement pour les pourcentages élevés de billes PSE. Ceci est dû à l'augmentation du pourcentage de PSE, qui se caractérise par un comportement hydrophobe.

III.1.2 Air occlus

La variation de la teneur en air du composite en fonction de la teneur en PSE est illustrée à la figure 3. Selon cette figure, la teneur en air des mortiers avec PSE est plus importante que celle du mortier de référence. Pour les mélanges de (0,5%) plastifiant, à partir du spécimen de 15 % de PSE, la teneur en air augmente avec l'augmentation de la substitution en PSE de 6,2 % pour le mortier témoin à 9,1 % pour le mortier avec 100 % de PSE. Quant aux mortiers de 1% plastifiant le pourcentage d'air occlus varie de 5,6 à 8,9% , donc une progression de 37%. Cependant, les spécimens de 5% en PSE montrent une réduction de 20 % et 17,8% pour les mortiers de 0,5 et 1% respectivement.

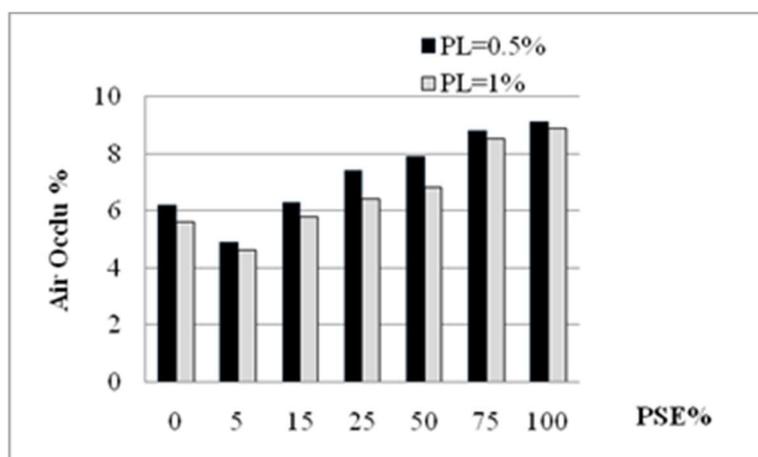


Figure III.3: L'Air Occlus en fonction du pourcentage de PSE

La diminution est due à l'augmentation de la compacité du composite, elle peut être confirmée par les résultats de l'essai de maniabilité de ce mélange. Ces résultats semblent être semblables pour les deux pourcentages de plastifiants utilisés. L'augmentation de la teneur en air s'explique par l'augmentation de la porosité qui peut être attribuée à la morphologie de PSE caractérisée par une nature hydrophobe. Cela explique que le composite PSE est moins compact, et donc plus poreux que le mortier de contrôle et que les boules PSE peuvent piéger l'air, augmentant ainsi considérablement le volume d'air dans les composites. L'augmentation de la teneur en air du mélange frais est pratiquement identique à l'augmentation de la porosité du composite à l'état durci au détriment de la résistance mécanique et de la durabilité du composite en général.

III.2 Étude des mortiers légers à l'état durci

III.2.1 Densité

L'évolution de la densité du composite avec les divers teneurs en PSE est indiquée à la figure III.4 ; la figure montre que la densité varie de 2275 kg/m³ à 962,66 kg/m³ avec une réduction de 58,5% pour les mélanges contenant 1 % de PL. Pour le mortier témoin, la densité était de 2204,98 kg/m³, et elle a diminué à 944,01 kg/m³ avec une réduction de 57,18%, en incorporant 100 % de PSE et 0,5 % de PL dans le mélange. Cette faible densité peut également faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers (Rahmani, Dehestani, Beygi, Allahyari, & Nikbin, 2013). En outre, la diminution de la densité est liée à l'augmentation de la teneur en air dans la matrice, qui augmente proportionnellement avec la teneur en PSE (Nikbin, 2018; Saikia & Brito, 2014). Par conséquent, la substitution du sable par les perles de PSE a un effet négatif sur la densité de tous les mélanges, alors que l'augmentation du pourcentage de plastifiant provoque une augmentation de la densité. Ces résultats étaient attendus parce que la densité du PSE est inférieure à celle du mélange témoin.

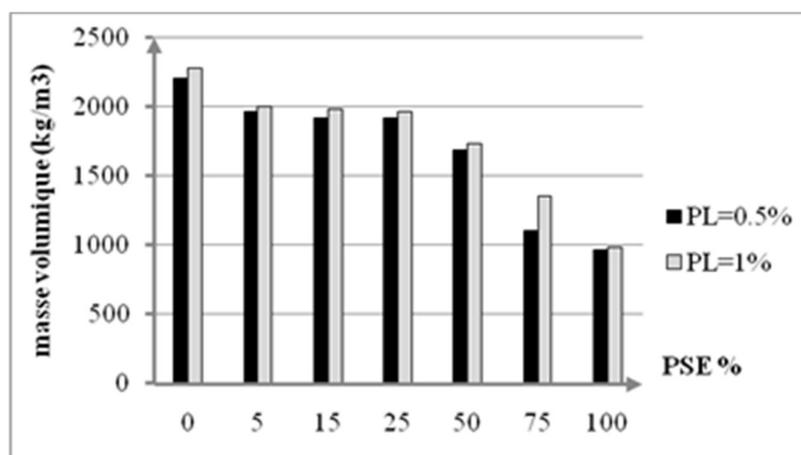


Figure III.4: La masse volumique en fonction du pourcentage de PSE

III.2.2 Résistances mécaniques

III.2.2.1 Résistance à la compression

La variation de la résistance à la compression des mélanges avec des taux de substitution différents de PSE est indiquée à la figure (III.5). On peut voir que la résistance à la compression diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en PSE, mais elle reste acceptable, même pour les mortiers ayant une teneur de 100 % de PSE utilisés dans la fabrication d'isolateurs semi-solides.

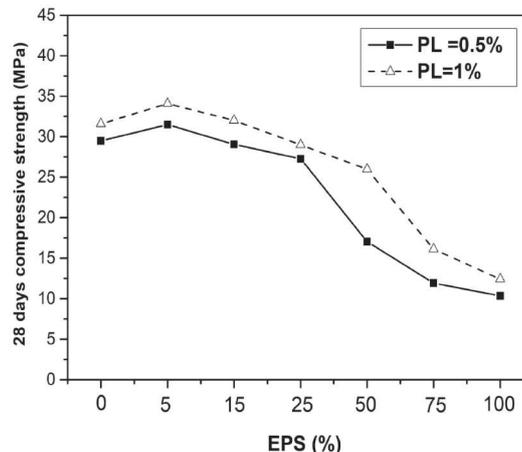


Figure III.5: Évolution de la résistance à la compression en fonction de %PSE

La résistance à la compression du mortier avec 100 % de PSE diminue de 31,58 MPa à 12,4 MPa et de 29,47 MPa à 10,34 MPa, par rapport au mélange témoin, en utilisant respectivement 1 % et 0,5 % de PL. Cette réduction de résistance est attribuée à la rigidité du polystyrène, qui est beaucoup plus faible que celle du sable de dune corrigé par le sable de carrière. D'autre part, le pourcentage de porosité des composites produits augmente avec l'augmentation du pourcentage des billes PSE (Kuhail, 2003; Sohail, 2018). Cependant, on note une légère augmentation de la résistance à la compression des mortiers avec l'incorporation de 5 % de la PSE ; ceci est dû à la diminution du rapport W/C ainsi qu'au faible pourcentage de porosité du mélange.

III.2.2.2 Résistance à la traction par flexion

La figure (III.6), montre la résistance à la traction par flexion à 28 jours des mortiers fabriqués avec différents pourcentages de PSE. Par exemple, la résistance à la flexion diminue de 4,51 à 2,79 MPa pour les mortiers dont la teneur en PSE est respectivement de 0 % et de 100 %, ce qui représente un taux de réduction d'environ 40 %, quel que soit le pourcentage de PL utilisé. Cette diminution de la résistance à la flexion est probablement due à la microstructure du mortier, qui se caractérise par une forte porosité et une faible adhérence entre les billes PSE et la pâte de ciment (Aboul-Nour, 2020; Assaad, 2020). Ces résultats sont semblables à ceux obtenus antérieurement par certains auteurs sur des mortiers légers à base de granulats (Kuhail, 2003; Sohel, 2018).

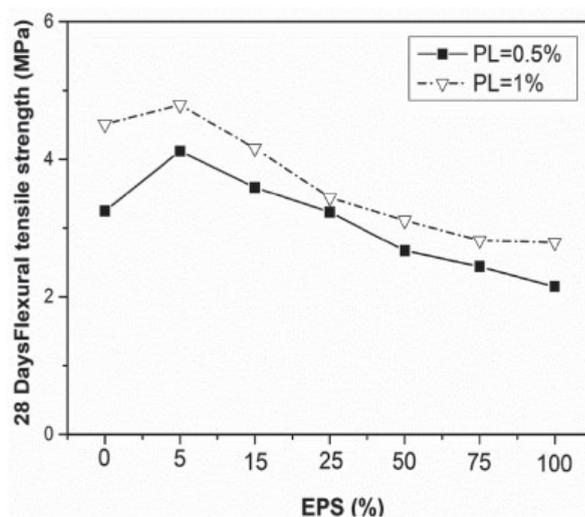


Figure III.6: Évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de %PSE

III.2.2.3 Module dynamique d'élasticité

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif permettant la détection de l'homogénéité et donc les défauts à l'intérieur d'un matériau à travers la mesure de temps d'impulsion des ondes sonores qui émis à différents points des deux faces d'une même éprouvette à tester. Pendant les essais, il a été constaté que ces mesures, varient légèrement pour le même pourcentage en bille de PSE, puisqu'on prend plusieurs mesures sur la même face espacée de 3 cm, et c'est prévisible car le trajet des ondes sonores traverse l'épaisseur de l'échantillon les billes de PSE. L'explication de ceci, est que les bétons légers obtenus, sont peu homogènes. L'auscultation sonore permet plus au moins de signaler une légère hétérogénéité dans la structure intérieure des éprouvettes testées, suite aux défauts tels que les vides ou bien des fissures à l'intérieur de la compacité.

Les variations de vitesses d'impulsion les plus importantes, ont été observées dans les bétons légers de PSE, par rapport au béton de référence. Une partie de l'énergie des ondes a pu être absorbée par les particules de PSE caractérisés par leur très grande élasticité. La mauvaise distribution des billes de PSE dans ces mélanges, traduite par la ségrégation des

mélanges, a influencé les résultats. Une partie de l'énergie des ondes a pu être absorbée par les particules de PSE caractérisé par leur plus grande élasticité.

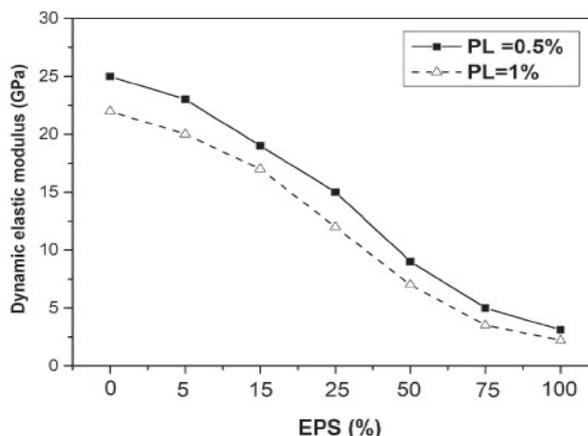


Figure III.7: Évolution du module d'élasticité dynamique à différentes formulations

La figure III.7 montre l'évolution du module dynamique d'élasticité à 28 jours des composites en fonction du contenu PSE. La figure illustre que le module d'élasticité du mortier varie de la même manière que la résistance à la traction par flexion et diminue avec l'augmentation de la teneur en PSE. Le taux de réduction du module dynamique d'élasticité est d'environ 85% en incorporant 100% de PSE en mélange, comparé à celui de 0% de PSE, quel que soit le pourcentage de PL utilisé. La faible liaison entre la matrice et les billes PSE a pu contribuer à cette réduction. En outre, la présence de bulles d'air dans la matrice peut accentuer cette réduction, ainsi la structure cellulaire fermée de la bille de PSE emprisonne l'air sous forme de petits volumes. Les ondes doivent passer à travers ces bulles d'air pour être propagées dans la pâte de ciment (Dixit, 2019). Cela met en évidence la capacité d'atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations, ce qui indique le bon comportement d'isolation sonore.

III.2.3 La porosité accessible à l'eau

La figure (III.8) montre la porosité accessible à l'eau de différents mélanges de mortier en fonction des pourcentages des billes de PSE.

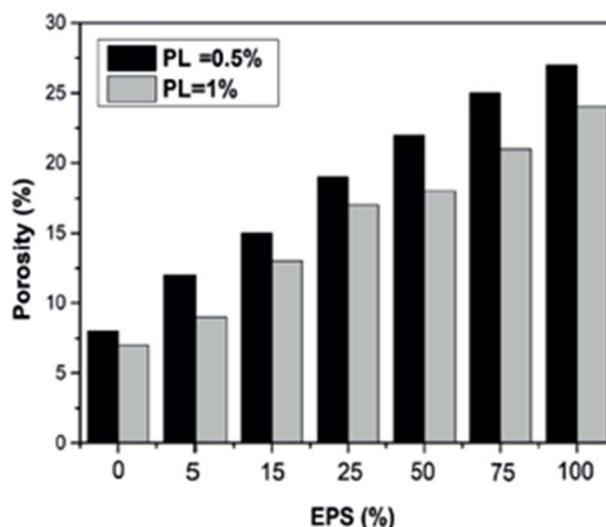


Figure III.8 : La porosité en fonction du pourcentage de PSE

À partir de cette figure, on peut remarquer que les deux séries de composites ont le même comportement de l'évolution de la porosité par rapport au volume incorporé de PSE ; la porosité des mélanges augmente à mesure que la teneur en PSE augmente. Par exemple, pour les mélanges contenant 0,5 % de PL, la porosité passe de 8 % à 27 % lorsque la teneur en PSE passe de 0 % à 100 %.

Pour les composites contenant 1 % de PL, la porosité varie de 7 % à 24 % lorsque la teneur en PSE varie de 0 % à 100 %. Cette augmentation est due à la faible adhérence entre la matrice de ciment et les perles PSE qui sont caractérisées par une nature hydrophobe dans laquelle les cellules en forme d'alvéole sont fermées et retirent une partie de la matrice entraînant une porosité plus complexe (Laoubi, 2019). Ces résultats sont semblables à ceux d'autres chercheurs (Babu, 2003; Koksai, 2020). G. Babu et S. Babu (Babu, 2003) ont étudié l'effet de la teneur en PSE sur la porosité du béton. Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec l'inclusion d'une teneur élevée en PSE par rapport aux mélanges témoins.

III.2.6 Relations entre les propriétés des composites de PSE

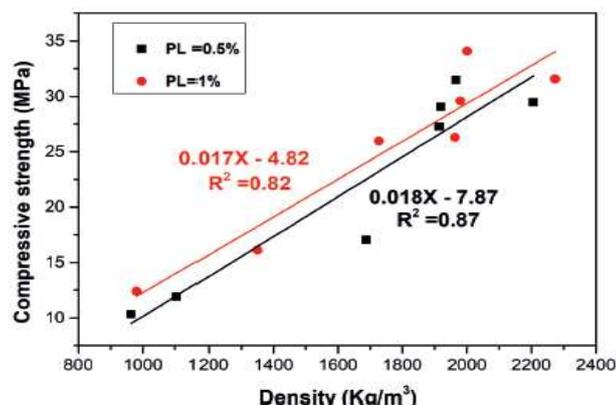


Figure III.9: Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique.

La relation entre la résistance à la compression et la densité est illustrée à la figure (III.9). La figure indique que la résistance à la compression du composite diminue proportionnellement à la densité ; la diminution de la résistance à la compression du composite PSE est associée à une diminution de la densité avec un bon coefficient de corrélation ($R^2 > 0,8$). Cette diminution était d'environ 60 % pour les deux densités de résistance. À cet égard, Sayadi et al (Sayadi, 2016) ont constaté que l'évolution de la résistance à la compression des bétons et des mortiers diminue avec l'augmentation de la substitution du polystyrène. Une amélioration de la résistance est obtenue pour la substitution de 5% en PSE ; elle est liée à la diminution du pourcentage de densité de ce composite.

III.3 Étude des bétons légers

III.3.1 Effet de la variation du pourcentage de PSE en fonction du rapport E/C

Les mesures de l'affaissement effectuée juste après la fin du malaxage, et comme on a fixé l'ouvrabilité du béton léger dans la classe du béton plastique dont l'affaissement se situe entre 5 et 10 cm, il est bien évidemment que la quantité d'eau soit contrôlée. La figure (III.10) présente l'évolution du rapport E/C pour les mélanges effectués.

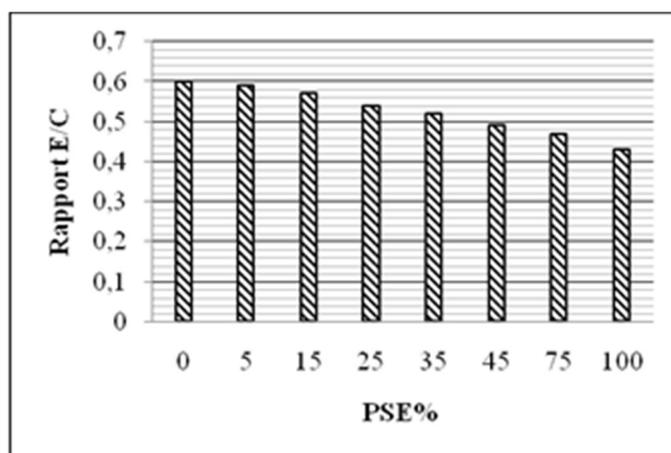


Figure III.10: Évolution du rapport E/C en fonction du dosage en PSE.

On constate sur la Figure III.10 que le rapport E/C des bétons de PSE frais décroît en fonction de l'augmentation de la substitution de sable par les billes de PSE avec une diminution de 17%, alors on note que l'ajout de bille de PSE a modifié l'ouvrabilité des mélanges étudiés. Ceci est justifié d'une coté par la particularité de la forme et de la texture des billes de PSE, d'autre coté par la réduction de la quantité du sable qui absorbe une quantité d'eau contrairement aux billes de polystyrène expansé qui connus par la nature d'hydrophobie. Ce constat est bénéfique car la diminution de la quantité d'eau de gâchage permettrait d'améliorer les propriétés mécaniques et hydriques du matériau puisque le dosage en eau conditionne la compacité du gel cimentaire. Ce constat concorde avec d'autres résultats mentionnés dans la recherche bibliographique.

III.3.2 Variations de la masse volumique des bétons de PSE

La densité joue un rôle primordial dans un composite léger, car elle peut affecter de nombreuses propriétés physiques et mécaniques de bétons légers. Sur la Figure III.11, on suit la variation de la masse volumique des composites formulés par la méthode de Dreux - Gorisse, à 28 jours.

La figure II.11 présente l'évolution de la masse volumique moyenne sèche après 28 jours de cure des différents composites élaborés. Nos formulations permettent de couvrir une série de densité située entre 2412,667 Kg/m³ et 1675,698 Kg/m³. Ceci signifie que la teneur en polystyrène expansé, a un effet apparent sur la masse volumique à l'état durci des composites cimentaires. Plusieurs recherches, réalisées sur des bétons de PSE, ont trouvés les mêmes résultats

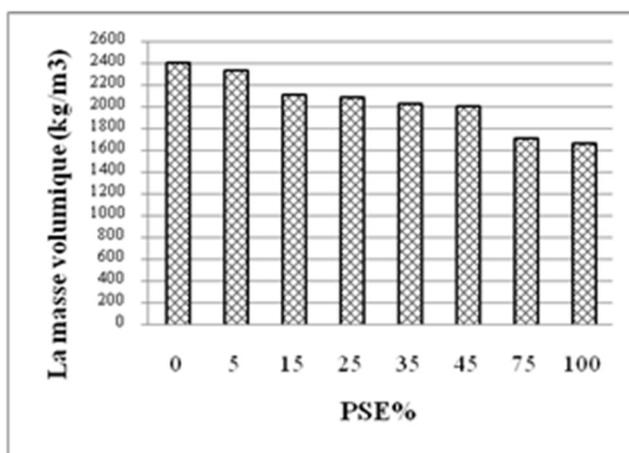


Figure III.11 : Mesure de la masse volumique sèche des composites.

Selon la nouvelle version de la norme EN 206 qui classifié le béton léger selon sa masse volumique, on distingue deux classes des bétons légers de structure suivant les fourchettes de masse volumiques suivants :

- Béton léger 2,0 : $1800 < \rho \leq 2100$, où la teneur en billes de PSE est 5, 15, 25, 35 et 45%,
- Béton léger 1,8 : $1600 < \rho \leq 1800$, où la teneur en billes de PSE est 75 et 100%.

En effet, nos bétons dont seuls les granulats fins (le sable qui représente 37% du volume total du granulat) et qui ont été remplacés par les billes de PSE ne présentent que les bétons légers de structure. Pour concevoir des classes plus faibles de la masse volumique à l'état durci, nous recommandant de remplacer les gravillons par des granulats légers.

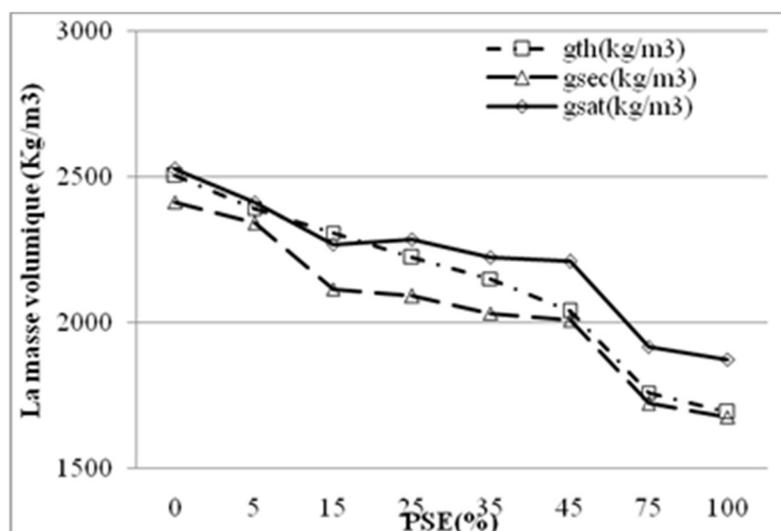


Figure III.12: Évolution de la masse volumique en fonction du dosage en PSE.

Selon la figure III.12, la masse volumique saturée varie de $2525,25 \text{ kg/m}^3$ à $1773,323 \text{ kg/m}^3$, pour une teneur en PSE allant de 0% à 100%. Ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 30%. La masse volumique du béton séché varie de 2412 kg/m^3 à $1675,698 \text{ kg/m}^3$, donc un affaiblissement arrive à 30% similaire à celle de la masse volumique saturée. Dans la comparaison entre les masses volumiques sèche et saturée à la masse volumique théorique, l'allure des courbes présente un écart différent. Pour les teneurs en billes de PSE inférieurs à 15%, les deux courbes des masses volumiques théorique et saturée presque identique contrairement en ce qui concerne les teneurs supérieurs à 15%, l'écart devenu plus important. En revanche, la comparaison de l'allure des deux courbes de la masse volumique sèche et théorique, on trouve qu'il commence par un écart raisonnable puis devenu presque nul dès le dosage en billes de PSE arrive à 45%. Cela se traduit par la diminution de la quantité d'eau. L'affaiblissement de la densité est utile dans les travaux d'allégement des structures, peut également faciliter la mise en œuvre sur les chantiers. La baisse de la masse volumique du composite, est liée à l'augmentation de la teneur en bille de PSE (ultraléger), particulièrement utile pour la préfabrication des pièces exploités dans les travaux de réhabilitation et l'allégement des structures.

La densité du béton dépend de la densité de ses constituants, des proportions du mélange, des méthodes de compactage et de la présence d'adjuvants minéraux et chimiques (Neville et Brooks, 2004). Selon l'ASTM et l'ACI, le béton léger structurel a une densité inférieure à 2000 kg/m^3 . Selon Neville (2011), la densité du béton de granulat léger BGL doit être comprise entre 350 et 1850 kg/m^3 . BS EN 206-1 (2000) a recommandé que le BGL ait une densité à sec d'au moins 800 kg/m^3 et au plus 2000 kg/m^3 . Le BPSE a une densité comprise entre 980 kg/m^3 et 1961 kg/m^3 contenant 30 % et 100 % de remplacement en PSE dans les travaux de recherche de Herki et Khatib (2016). Ceci est confirmé par Sayadi et al. (2016). La substitution totale (100%) du sable par les billes de PSE a réduit la masse volumique jusqu'à $1675,698 \text{ Kg/m}^3$, donc pour atteindre des densités inférieures on doit remplacer les gravillons par des granulats légers.

III.3.3 Variations des résistances à la compression des bétons de PSE

L'utilisation des perles de PSE, en remplacement des granulats naturels fins (sable), a provoqué une perte de la résistance à la compression, comme le montre la figure III.13. Elle décroît de 32,55 MPa, jusqu'à atteindre une résistance minimale de l'ordre de 11,24 MPa. La réduction de la résistance à la compression, a été d'environ 13,26%, 25,01%, 28,29 ; 31,01 ; 37,28 ; 52,81 et 65,47% pour BT ; BPSE5 ; BPSE15 ; BPSE25 ; BPSE35 ; BPSE45 ; BPSE75 et BPSE100, respectivement. Cette diminution de résistance à la compression est liée à la faible résistance du polystyrène expansé (presque nulle) d'une part, d'autre part ; à la diminution de la compacité des bétons légers en présence des billes de PSE. Ainsi, nous constatons aussi l'augmentation de la résistance en fonction du temps.

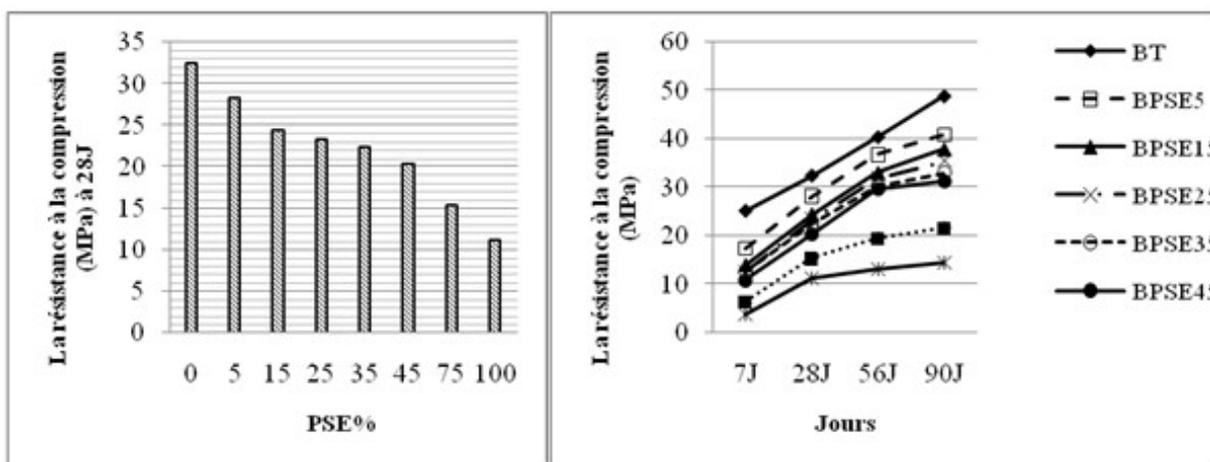


Figure III.13: Évolution de la résistance RC en fonction du dosage en PSE à 7, 28, 56 et 90 jours.

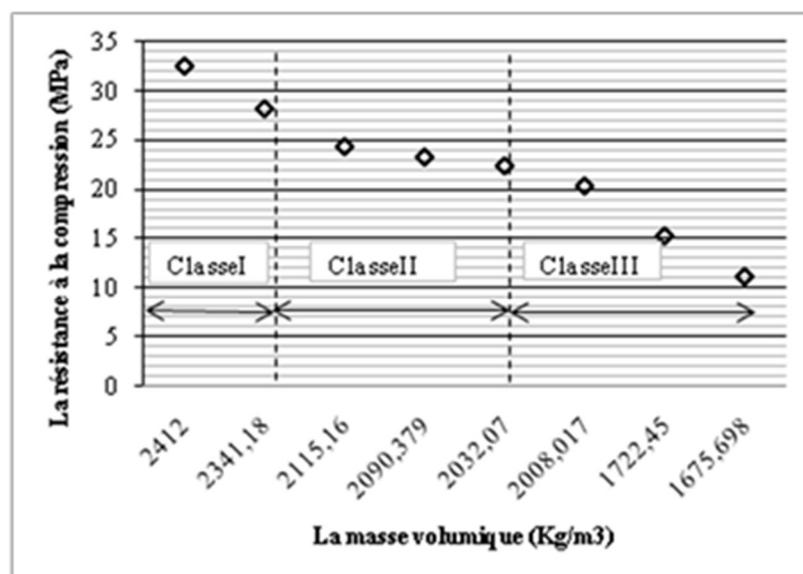


Figure III.14: Évolution de la résistance RC en fonction de la masse volumique à 28 jours.

Une classification pour ces bétons légers basée sur la corrélation entre la masse volumique et la résistance à la compression après 28 jours de cure parue logique, puisque la masse

volumique et la résistance sont étroitement liées, la norme ACI 213R -87^{13.141} classifie les bétons en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m³) en trois catégories :

- Le béton léger de structure : dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.
- Le béton de résistance moyenne: 1350 – 800 sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa
- Le béton léger de faible masse volumique : à une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m³ n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, $R_c < 7$ MPa

D'où les composites de PSE se classifié en trois classes présentées dans le tableau III.1.

Le tableau III.1 : Classification des composites de PSE

	Classe I BPSE structural	Classe II BPSE semi-structural	Classe III BPSE d'isolation
Rc (MPa)	>25	25 à 20	20 à 10
La densité	2412 à 2341,18	2341,18 à 2023,017	2023,017 à 1675,698
PSE(%)	5	15 à 35	45 à 100

Ali et al (Ali, Maslehuddin, Shameem, & Barry, 2018), ont préparé des mélanges en béton léger à l'aide de billes de PSE comme remplacement total ou partiel des granulats grossiers de calcaire. Ces mélanges présentant un faible poids unitaire et une résistance à la compression acceptable. Le poids unitaire des mélanges développés était compris entre 1366 et 1744 kg/m³, tandis que la résistance à la compression était comprise entre 17 et 27 MPa. Plusieurs recherches, (Ali et al., 2018; Chung, Sikora, Kim, El Madawy, & Abd Elrahman, 2021; Gawale, Mishra, Sambare, Kothari, & Patil, 2016; Li, Chen, Hao, Khan, & Pham, 2021; Liu, Gong, Tian, & Miao, 2021; Moon & Patel, 2021), mentionnent l'effet de la substitution total ou partiel des granulats naturels par les perles de PSE sur la résistance à la compression, c'est en fait la réduction de la résistance à la compression, est liée à l'augmentation de la teneur en particules de polystyrène expansé dans ces composites.

III.3.4. Variations des résistances à la traction par flexion des bétons de PSE

D'après les résultats de l'essai de traction par flexion présentés par la Figure III.15. Il semble que l'effet de l'ajout des granulats de PSE sur la résistance à la traction est semblable à celle de la résistance à la compression. En comparaison avec le béton témoin les bonnes valeurs sont obtenues sur les bétons BPSE à 5 et 15%.

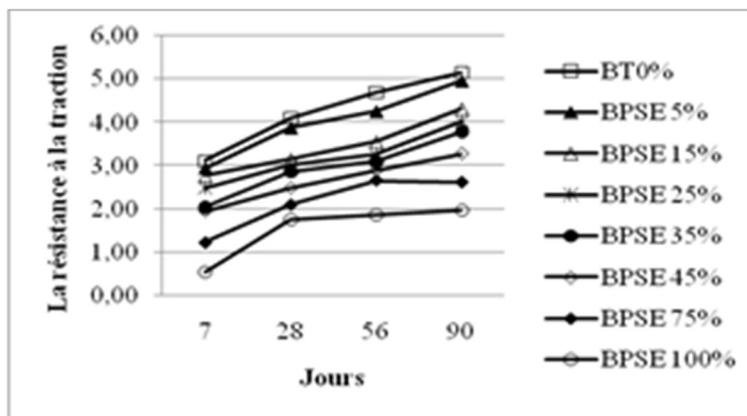


Figure III.15: Évolution de la résistance R_t en fonction du dosage en PSE à 7, 28, 56 et 90 jours.

Au cours des essais, on a observé que le béton présentant des volumes de PSE plus élevés ne présentait pas de rupture brutale par rapport à la normale, c'est le même constat signalé par plusieurs recherches (Ali et al., 2018; Cadere et al., 2018; Sadrmomtazi, Sobhani, Mirgozar, & Najimi, 2012; Tayal et al., 2018).

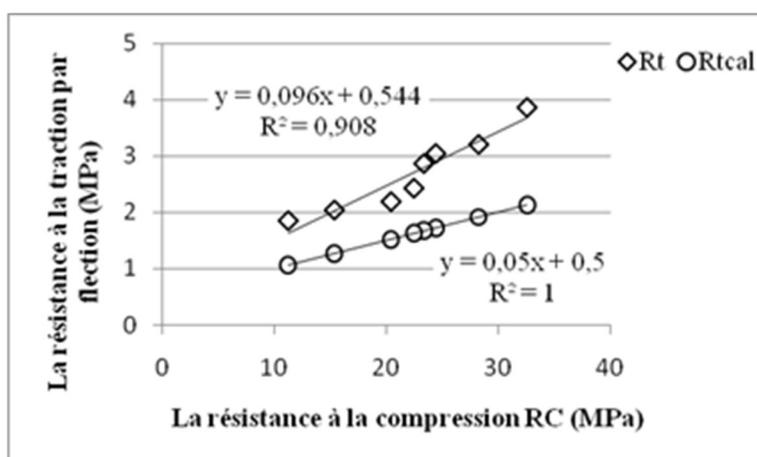


Figure III.16 : Corrélation entre les résistances à la compression et à la traction obtenue d'une part par flexion et d'autre part calculer.

On constate, sur la figure III.16, que la résistance à la traction par flexion calculée par la formule du béton léger recommandé dans G. Coquillat (Arnould et al., 1986): $R_t = 0,5 + 0,05f_c$ est faible par rapport à ceux trouvés par expérience. Néanmoins, la formule obtenue par la corrélation entre la résistance à la traction et la résistance à la compression du béton de PSE ($R_t = 0.096 R_c + 0.544$) est adaptable à la formule recommandée.

III.3.5 Variations des vitesses des ondes sonores à travers les bétons de PSE

La vitesse d'impulsion ultrasonique est une technique non destructive qui consiste à mesurer la vitesse du son à travers les matériaux afin de prévoir la résistance des matériaux. Cette technique a été largement utilisée pour l'évaluation non destructive de la qualité du béton. L'évolution de la vitesse des ondes sonores des composites, à différents pourcentage en PSE, est donnée par la figure III.17.

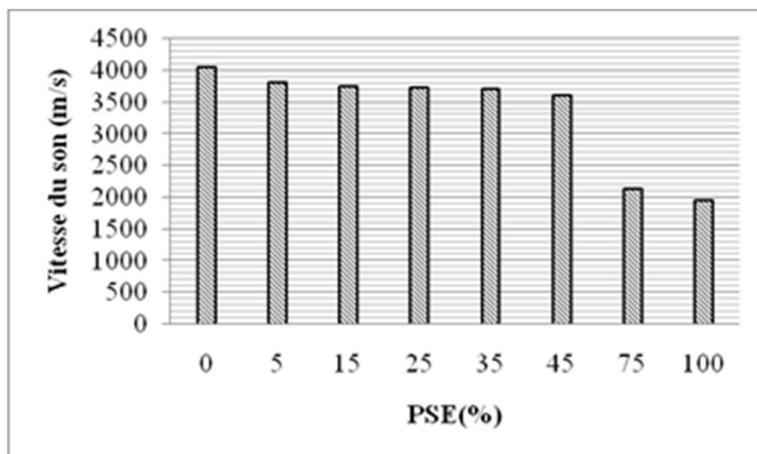


Figure III.17: Évolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

Elle varie de 4048,58 m/s à 1954 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 100%, donc une réduction d'ordre 51,17%. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores. En effet, le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans les composites élaborés. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans les parties solides (pâte de ciment, les grains solides). Ceci met ainsi en évidence la capacité à atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations, caractéristique d'une bonne isolation phonique.

Il est intéressant d'établir la corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse du son, car on peut apprécier les propriétés mécaniques (R_c) à travers des mesures non destructives (vitesse du son). La figure III.18, montre la corrélation entre la vitesse du son et la résistance à la compression des composites élaborés,

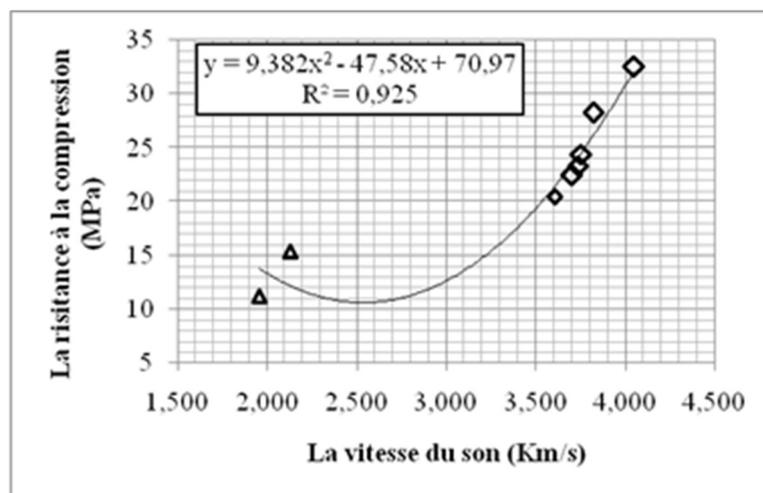


Figure III.18 : Corrélation entre la vitesse du son et la résistance à la compression.

On constate, l'évolution de la vitesse du son est corrélative à la résistance de compression, pour les résistances élevées ($R_c \geq 20$ MPa) la vitesse du son est $> 3,5$ Km/s. La relation entre la vitesse du son et la résistance à la compression des bétons de PSE est présentée en équation suivante : $R_c = 9.382 V^2 - 47.58 V + 70.97$, avec un coefficient de corrélation égal à 0,925. Dans la littérature plusieurs modèles, reliant la vitesse de propagation des ultrasons

et la résistance mécanique en compression, ont été établis pour estimer la résistance mécanique d'un matériau. Dans la recherche de Sadrmtazi et al (Sadrmtazi et al., 2012), ont trouvé la relation : $R_c = 0,000232 V^{7,5} + 9,01$.

III.3.6. Le module d'élasticité dynamique des bétons de PSE

Après avoir mesuré les vitesses d'ondes de compression des différents bétons, le module d'élasticité dynamique est calculé à partir de cette vitesse, de la masse volumique (ρ) et le coefficient de poisson du béton durci. La figure III.19 illustre l'évolution des modules d'Young dynamiques (E_d) en fonction des teneurs en billes de PSE. L'évolution des modules présente la même tendance que celle des vitesses, de façon générale, l'augmentation du pourcentage des billes de PSE génère une diminution du module de Young E_d , il est varié entre 5,758 et 35,5827 GPa et diminue régulièrement lorsque la quantité des billes de PSE augmente. Pour les mélanges de 75 et 100% de PSE, les modules sont très faibles et varient entre 5,758 et 7,013 GPa. Cette diminution est due au faible module d'élasticité des billes de PSE par rapport à celui des granulats naturels. Selon le manuel (Manual, 1977; Manuel, 1980), édité par la FIP et le CEB, le module de déformation dynamique des granulats (E_g) est proportionnel à la masse volumique des grains.

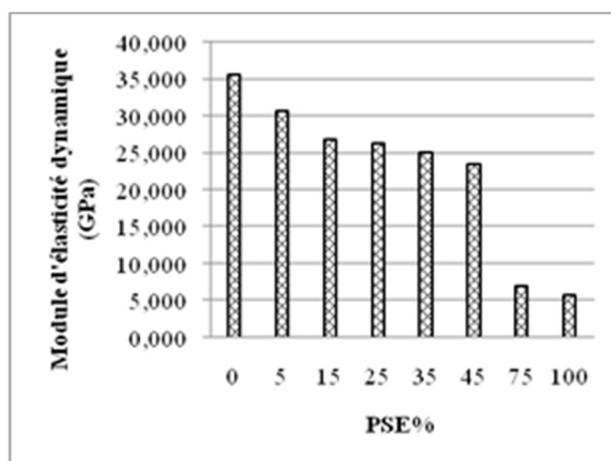


Figure III.19 : Évolution du module d'élasticité dynamique des bétons de PSE.

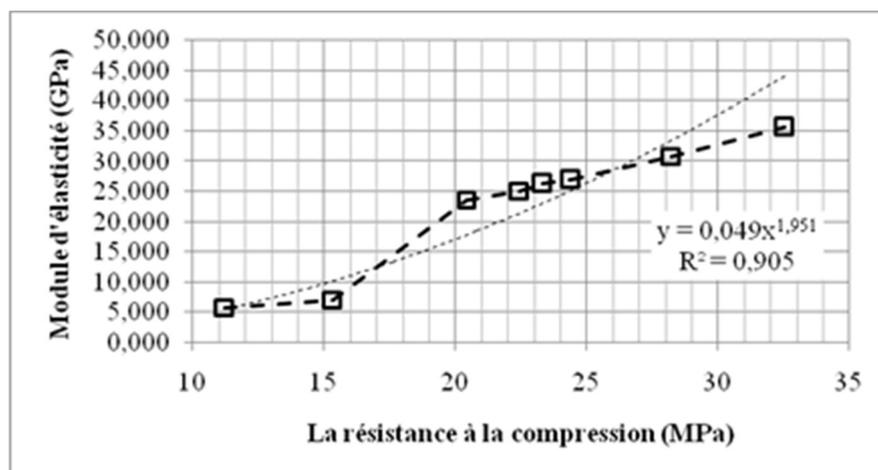


Figure III.20 : Corrélation entre le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression

La figure III.20, propose une corrélation entre le module d'élasticité dynamique E_d et R_c . E_d semble suivre une loi puissance en fonction de R_c : $E_d(\text{GPa}) = 0.049 R_c^{1.951}$ avec un coefficient de corrélation égal à 0,905. Cette expression coïncide avec les résultats de la littérature (Sadrmomtazi et al., 2012).

III.3.7 Variations de l'absorption par immersion des bétons de PSE

Les résultats d'essai d'absorption pour les bétons de PSE sont représentés sur la Figure III.21 où on peut noter que la présence d'EPS a augmenté l'absorption donc la teneur en vides par rapport au béton de référence. Sauf le béton de 5% de bille de PSE qui présente le coefficient d'absorption le plus faible avec 3.07%, suivie du béton témoin avec 4.70%.

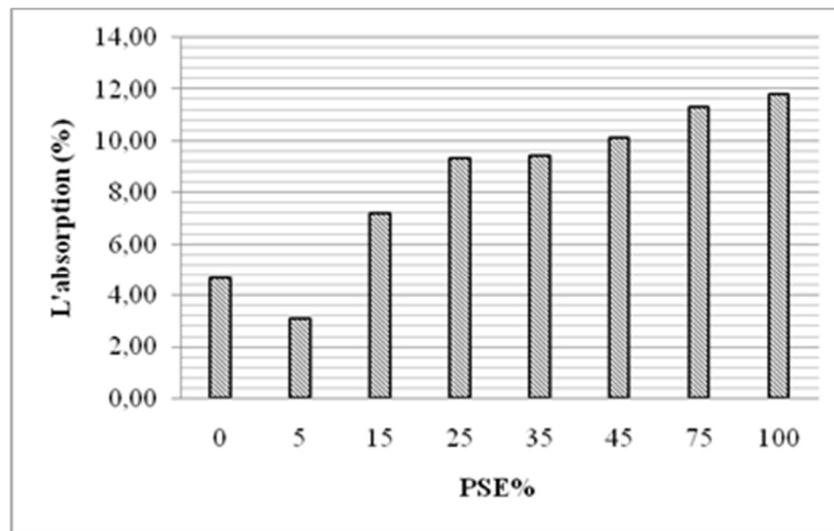


Figure III.21: Évolution de l'absorption par immersion des bétons de PSE.

Les coefficients d'absorption des bétons de PSE pour les teneurs allant de 15 ; 25 ; 35 ; 45 à 100% sont supérieurs au coefficient d'absorption du béton témoin BT. Le béton de 100% de bille de PSE a présenté la plus grande absorption de 11,79%, ce fait peut s'expliquer par la plus grande quantité de PSE dans le mélange. Donc on constate qu'il y a une tendance à incorporer plus d'air pour les mélanges avec les pourcentages élevés de PSE. Selon Carvalho et al (CARVALHO & MOTTA, 2019), les bétons avec des billes de PSE présentaient plus de vides, probablement en raison de la forme sphérique et l'augmentation de la quantité de vides qui peut résulter de l'augmentation des vides d'air pendant le mélange en raison de l'hydrophobie des billes de PSE. Ce constat est approuvé par les observations microscopiques (figure III.22) des échantillons de BPSE. Nous pouvons observer clairement la liaison entre les billes de PSE et la pâte de ciment à cause de la nature d'hydrophobie des billes de PSE.

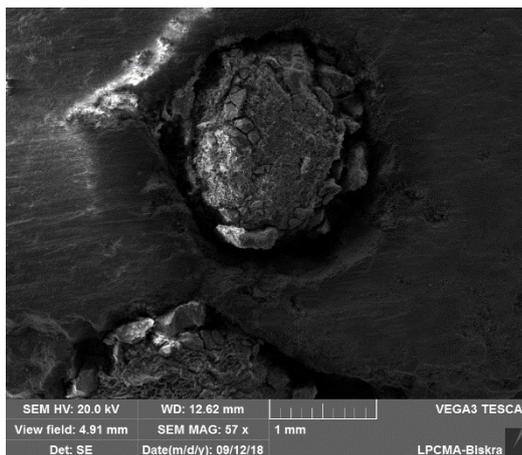


Figure III.22 : Zone de transition inter-faciale Perles PSE et matrice de ciment.

D'après Dreux (Dreux & Festa, 1998), les bétons ayant une absorption inférieure à 10% sont considérés comme des bétons de bons qualités, par conséquence les composites élaborés avec les teneurs en billes de PSE inférieur à 35% sont des bons béton de point de vue absorption par immersion. En revanche, pour les pourcentages 45 ; 75 et 100% où l'absorption dépasse 10% présentent les moins bonnes qualités malgré la faible différence qui reste proche de ce seille (10%).

III.3.8 Variations d'absorption capillaire des bétons de PSE

L'évolution de l'absorption capillaire d'eau en fonction de la racine du temps est donnée par la figure III.23. De façon générale, la capacité d'absorption d'eau de tous les bétons de PSE est augmentée en particulier dans les premières minutes.

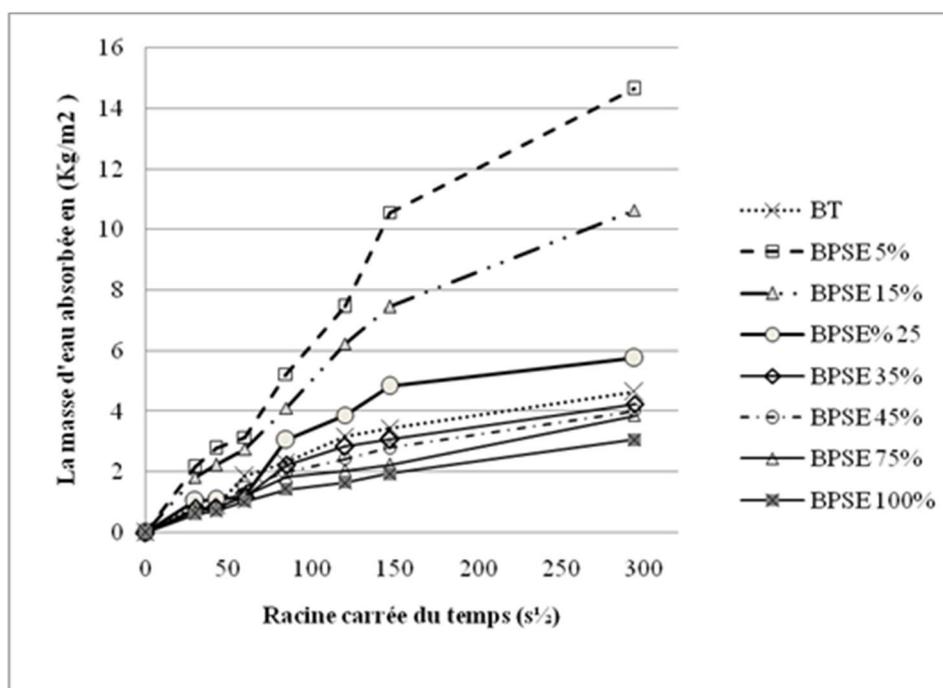


Figure III.23: Évolution de l'absorption capillaire des bétons de PSE.

Une forte absorption d'eau par les teneurs en billes de PSE inférieurs à 35% (5 ; 15 et 25%) qui dépasse l'absorption du béton témoins, contrairement à ce qui a été observé pour les teneurs supérieures ou égale 35%. Le composite avec une absorption d'eau plus grande par capillarité était le béton de 5% de PSE et le béton avec une absorption d'eau plus faible par capillarité était le béton de 100% en billes de PSE.

Donc, selon ces résultats, une tendance des composites avec faible teneurs en bille de PSE (5, 15 et 25%) a augmenté le taux d'absorption par capillarité, c'est le cas évident où le diamètre des pores capillaires est petit, plus les pressions capillaires sont grandes et, par conséquent, plus la profondeur d'eau absorbée est grande. En revanche, pour les teneurs élevés de PSE, une diminution de la quantité d'eau absorbée, ceci est dû à la présence d'inclusions non-sorptives (PSE) d'une part, d'autre part semble avoir généré des pores plus grands et/ou diminuer l'interconnexion entre ces pores, réduisant ainsi les pressions capillaires et donc l'absorption par capillarité. Ces résultats concordent avec les travaux de Bengin M et al.(Herki, 2017), plus le diamètre de ces pores capillaires est grand, moins la profondeur est grande, mais plus la quantité d'eau absorbée est grande. Donc, l'inter connectivité entre les capillaires est faible malgré ses tailles important qui favorise l'absorption par immersion.

III.3.9 Variations retrait des bétons de PSE

L'évolution des variations dimensionnelles du béton de PSE, à différentes teneurs en perles de PSE, en fonction de la durée de cure est donnée par la figure III.24, elle permet de mettre en lumière l'influence du dosage en billes de PSE sur le retrait du béton élaboré en l'air libre dont le taux d'humidité autour de 65% HR. Les résultats montrent que la majeure partie du retrait enregistré se produit aux premiers jours.

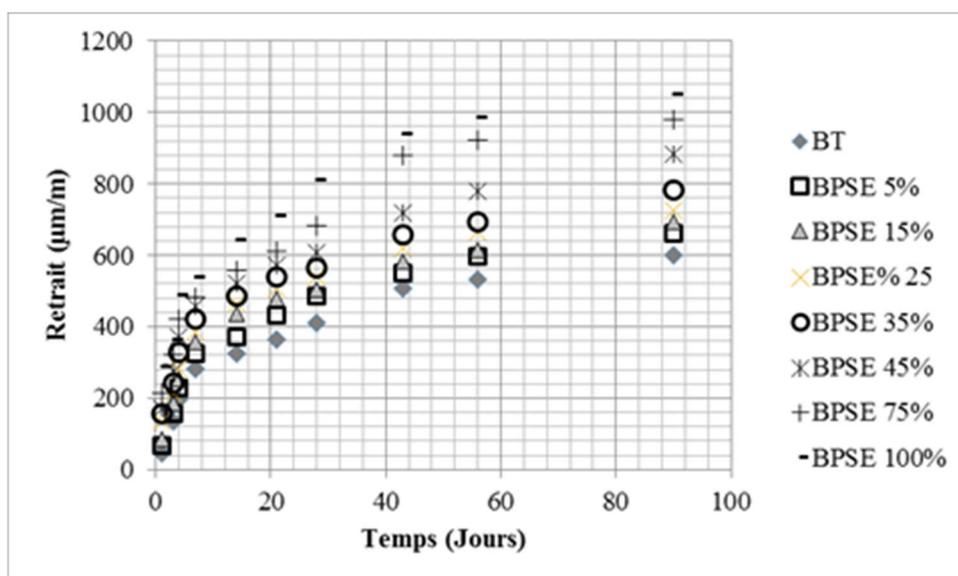


Figure III.24: Évolution du retrait en fonction du dosage en PSE.

Selon l'allure des courbes, on constate que les déformations dépendent du pourcentage de PSE, d'ailleurs plus le pourcentage des billes augmente plus le retrait augmente. Les

déformations se produisent principalement avant 28 jours. Au-delà, elles se diminuent puis stabilisent progressivement. Pour 100% de perles de PSE, le retrait enregistré se situe entre 1000 et 1 200 micromètres après 90 jours, c'est le retrait relativement le plus élevée dans toutes les séries. Donc, la présence des perles de PSE a un effet néfaste sur la stabilité dimensionnelle, ce phénomène est lié à la faible rigidité des billes de PSE ainsi que le faible zone d'interaction entre la pâte de ciment et les granulats. Ceci, converge aussi vers ce qu'il a été mis en évidence par Ramazan et al. (Demirboga & Kan, 2012), au sujet du retrait de séchage, ils ont effectué des analyses sur des échantillons de mortiers de polystyrène expansé, ont trouvés que le retrait a augmenté considérablement avec l'augmentation de la teneur en bille de PSE. Lorsque la teneur en granulats PSE était de 25% le retrait séchage était 2,35 fois inférieur à celui ayant 100 % d'agrégat PSE pendant 210 jours de durée de durcissement à température ambiante.

III.3.10 Variations du gonflement des bétons de PSE

L'évolution des variations du gonflement des composites, à différentes teneurs en PSE, en fonction de la durée de cure est donnée par la figure III.25. Le taux le plus faible du gonflement est celui du béton témoin, 716 micromètre après 90 jours. L'augmentation du gonflement des BPSE est proportionnelle à l'augmentation du pourcentage des billes de PSE. La substitution du sable par 100% de PSE engendre 1280 micromètre de gonflement malgré la nature d'hydrophobie du PSE.

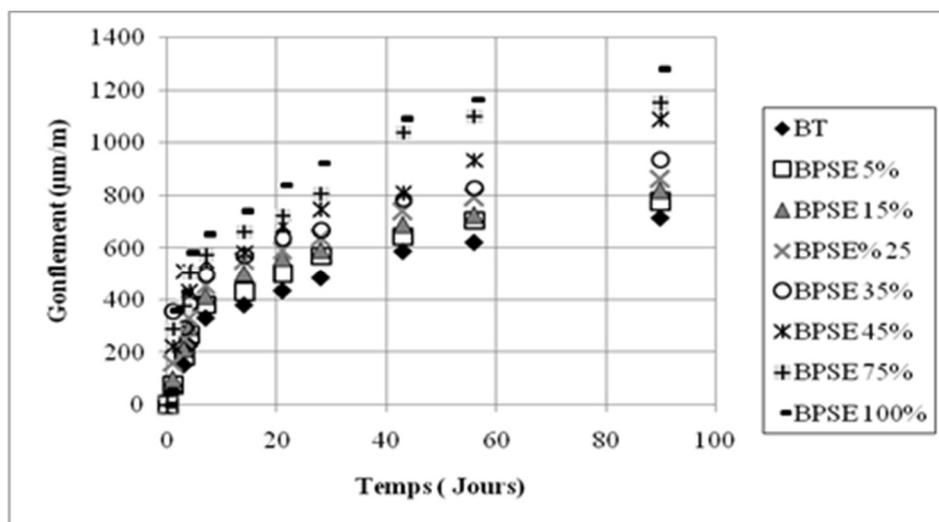


Figure III.25: Évolution du gonflement en fonction du dosage en PSE.

Le gonflement est défini comme l'expansion d'un échantillon de béton due à l'absorption d'eau dans les cavités. D'après la figure III.25, on voit que, de façon générale une augmentation du gonflement en fonction de l'augmentation des teneurs en PSE. Ceci nous a permis de conclure que la présence des billes de PSE dans les bétons élaborés a augmenté la capacité d'absorption d'eau donc un taux important des vides au niveau des interfaces pâte – PSE c'est un effet négatif pour la durabilité de nos composites.

III.3.11 la porosité

Sur la Figure III.26, on suit la progression de la porosité des bétons formulés en fonction de teneurs en billes de PSE. On constate que l'augmentation du taux de la substitution du sable corrigé par les billes de PSE augmente de façon proportionnelle la porosité dans les composites à l'exception du mélange de 5 % PSE où on aperçoit une légère diminution.

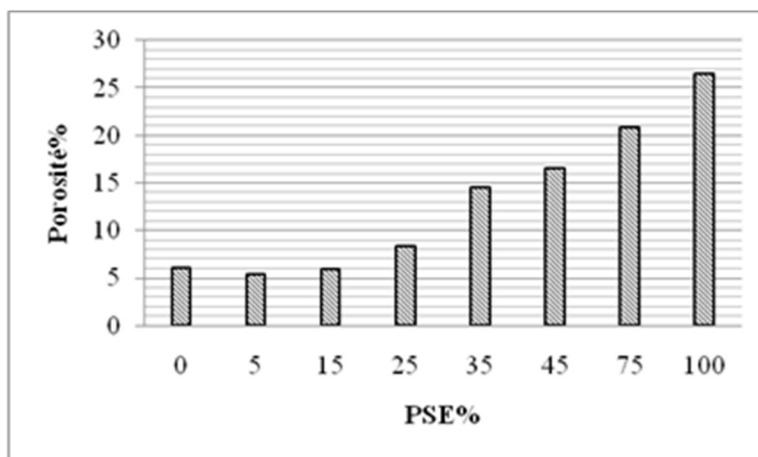


Figure III.26: Évaluation de la porosité en fonction de PSE%.

Ces résultats confirment les constats des essais précédents (absorption et gonflement). La mauvaise liaison entre les billes de PSE et la pâte fait élargir les vides au niveau de la zone interfaciale et donc le taux de porosité croit. Par conséquent la diminution de la densité qui est notre objectif malgré son impact négatif sur la résistance spécialement pour les teneurs élevés des billes de PSE (>25%). Plusieurs recherches ont trouvé les mêmes résultats (Bicer, 2021; Herki, 2017; Sabaa & Rasiah, 1997; Tayal et al., 2018; Vakhshouri, Rasiah, & Nejadi, 2018; Wibowo, Lianasari, M, & Kurniawan, 2021).

III.4. Résistance des BPSE dans un milieu acide

Il est primordiale lors de l'étude d'un nouveau composite cimentaire, de mettre en évidence l'influence des conditions auxquelles il est exposé, et ce, après avoir mis en évidence l'effet de la substitution du bille de PSE sur la sensibilité à l'eau du composite (porosité, absorption capillaire), on s'intéressera à cette section au comportement de celui-ci au contact d'une eau acide car un matériau durable suppose une aptitude à résister aux attaques d'agents agressifs à long terme, qu'ils soient de nature physique ou chimique. A travers la quantification des pertes de masses induites, de la résistance à la compression et l'examen visuel des bétons légers exposés à cet acide, on va évaluer l'intensité de l'attaque d'acide et de connaître l'intensité des dégradations causées. En terme de changements de phases qui apparaissent dans ces échantillons qui ont été immergés pour une durée de trois (03), cette étude se limitera à présenter l'attaque d'acide chlorhydrique (HCl) pour notre étude.

III.4.1 la perte de masse

Durant le processus d'immersion, les échantillons ont été attaqués par HCl (5%), ces attaques sont caractérisées par un dommage physique évolué avec le temps. La perte de masse des composites en fonction du temps de cure est donnée par la figure III.27.

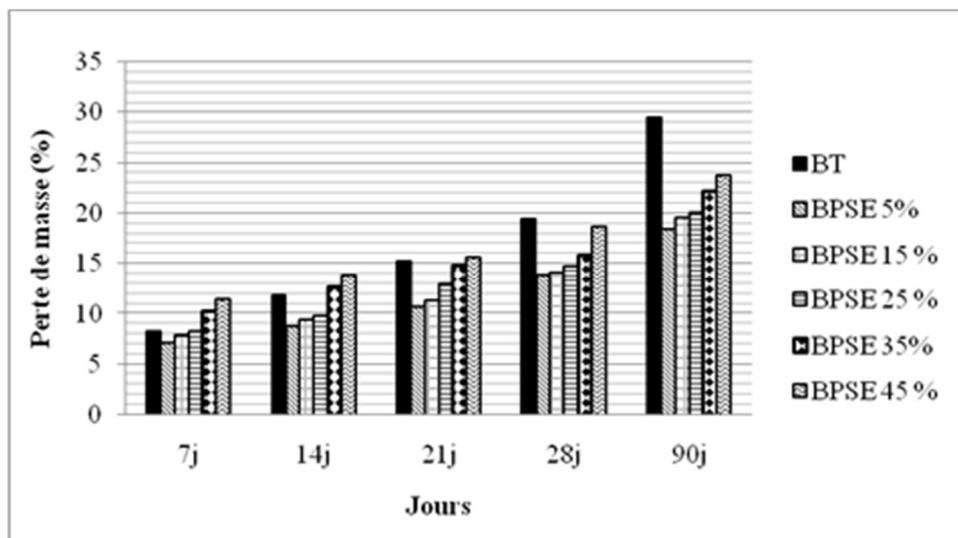


Figure III.27: Évolution de la perte de masse en fonction de dosage de PSE à 7, 14, 21, 28 et 90 jours dans le milieu acide.

D'abord, on commence par le composite de référence (BT), il a subi un taux de perte de masse important et en évolution avec le temps assez importante de l'ordre de 7.12 à 29.51% respectivement. A partir de 28 jours d'immersion, l'évolution de la perte de masse du BT dépasse celle du composite contenant du PSE.

Selon la recherche de Said et al. (Siad, Mesbah, Khelafi, Kamali-Bernard, & Mouli, 2010), la formation de chlorures de calcium, des sels très solubles dans l'eau, due la réaction de l'acide chlorhydrique avec le ciment est plus importante en présence de charges calcaires. La présence d'une teneur élevée en carbonate de calcium (CaCO_3) augmente la capacité des remplisseurs de calcaire à consommer plus d'acide chlorhydrique. L'agressivité de l'acide sert à lessiver rapidement la pâte, en particulier sur la surface exposée de l'échantillon. Après 90 jours d'exposition aux HCl, on peut clairement voir l'existence d'une zone dégradée (10 mm) (figure III. 2) à la surface des spécimens limitée par un front de dissolution. Ce front correspond certainement à un front de dissolution portlandite comme le montrent les recherches antérieure (Kamali, Moranville, & and Leclercq, 2008).

Le composite BPSE5%, qui a perdu le moins de sa masse initiale après la même période d'immersion, donc une meilleure résistance au attaque de l'acide (HCL), suivie par les éprouvettes de 15% PSE qui présente la faible évolution on comparant avec le béton de référence, cela est probablement dû à deux raisons, d'une part aux particules de PSE qui résistent bien à la solution acide. D'autre part à une propagation faible des ions de chlore

grâce à la faible porosité de ces composites (5 et 15% de PSE) devant celle des autres mélanges. Puisque théoriquement la cinétique de diffusion est liée uniquement à la porosité totale (Larrard, 2002). Ainsi, il ressort de la figure, que l'exposition des éprouvettes de 15, 25, 35 et 45% de PSE à cet acide à augmenter la perte de masse avec l'élévation du pourcentage de l'ajouts du PSE au cours du temps portant le taux d'augmentation est assez insignifiante comparant avec le béton témoin.

L'utilité de faire mesurer la perte de masse c'est de comparer la dégradation de nos bétons de PSE. On peut constater clairement à travers le taux d'élévation de la perte de masse en fonction du temps d'immersion que l'exposition de ces éprouvettes à cet acide est préjudiciable pour le béton de référence plus que ceux de PSE.

L'essai a démontré la forte solubilité de l'acide chlorhydrique dans l'eau qui réagit rapidement avec le ciment portland en libérant une partie considérable de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH}_2)$ (Macías, Goni, & Madrid, 1999). Ce dernier, réagit à son tour avec l'acide chlorhydrique et forme par la suite le chlorure de calcium CaCl_2 , qui détériore les éprouvettes et provoque une perte de masse qui se traduit par la formation d'une couche poreuse avec une légère perte de masse (Macías et al., 1999). Donc, cette perte de masse est due à la dissolution des hydrates formés menant à des matériaux visuellement poreux de texture différente (création d'un réseau poreux ouvert à la surface du matériau).

III.4.2 la résistance à la compression

Les valeurs de la baisse de la résistance à la compression du composite à différentes teneurs en PSE, après conservation dans l'acide, par rapport à celui conservé dans l'eau, sont données par la figure 28. On constate que le composite de référence est sensiblement dégradé, soit une perte de résistance de l'ordre de 17,05%. Pour une teneur en PSE de 5%, la perte de la résistance est de l'ordre de 7,92%, la plus faible réduction tout comme pour le cas de perte de masse, cette différence est probablement liée à une meilleure cohésion de la matrice, due à la présence de granulats de PSE qui limite du processus de diffusionnels.

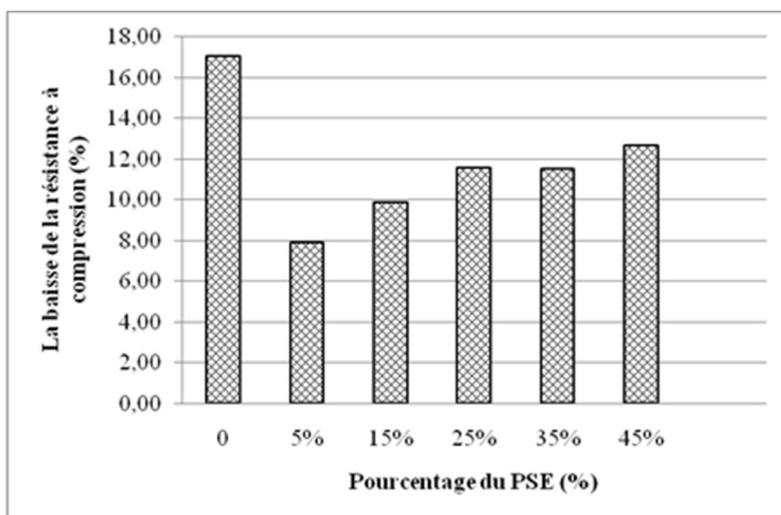


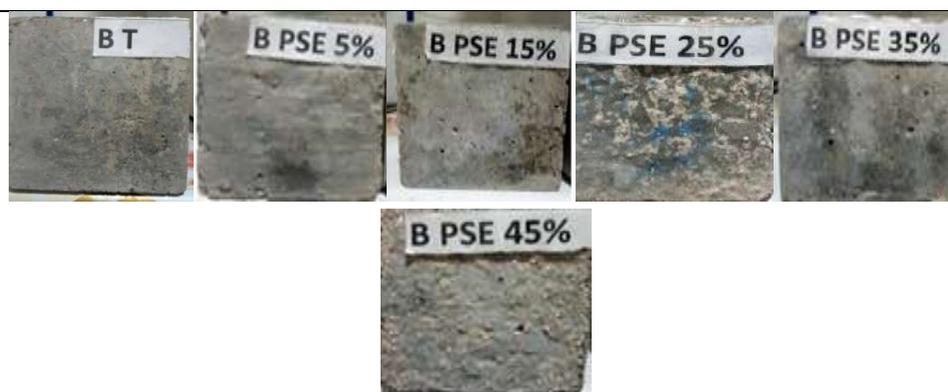
Figure III.28: Évaluation de la baisse de la résistance R_C en fonction de PSE à 28 jours

Globalement, les résistances des éprouvettes en béton de PSE dans le milieu agressif augmente progressivement en fonction de l'augmentation du dosage en PSE.

III.4.3 Examen visuel Avant traitement HCL Après traitement HCL

Sur la figure III.29, on donne l'aspect des composites pour des teneurs en PSE allant de 0 à 45%, qui montre les changements des formes physiques des éprouvettes de (10x10x10) en béton léger avant et après avoir été immergé dans une solution de HCl (5%) pendant 28 jours. Ces éprouvettes ont gardé plus au moins leurs formes cubiques après l'immersion, mais leurs dimensions ont diminué, elles sont devenues irrégulières.

Éprouvettes témoins après 3 mois dans l'eau potable



Éprouvettes après 3 mois dans l'eau potable



Éprouvettes après 3 mois dans la solution d'acide HCL

Figure III.29: L'aspect visuel des éprouvettes de BPSE

L'inspection visuelle (figure III.29) montre clairement l'état dégradé des différents échantillons après 90 jours d'immersion dans des solutions de HCl à 5 %.

D'après la figure III.30, Les spécimens du composite de référence, montrent une nette dégradation par rapport au béton de PSE. Les échantillons de BPSE5% et BPSE15%

montrent également une perte de forme remarquable, alors que les bétons BPSE35% et BPSE45% n'ont subi qu'un petit changement, principalement sur les côtés et sur la surface externe où montrent des signes que l'acide a lessivé la pâte de ciment. En plus, l'imperméabilité des billes de PSE attribue au blocage du passage de la solution agressive et réduit l'absorption de la solution acide par les bétons légers. En effet, c'est une indication sur le fonctionnement des billes de PSE comme des pores fermés, ce qui limite l'entrée des agents agressifs à l'intérieur des mélanges. Ceci, prouve que les composites cimentaires incorporant ces perles, ont un bon comportement face aux attaques chimiques.

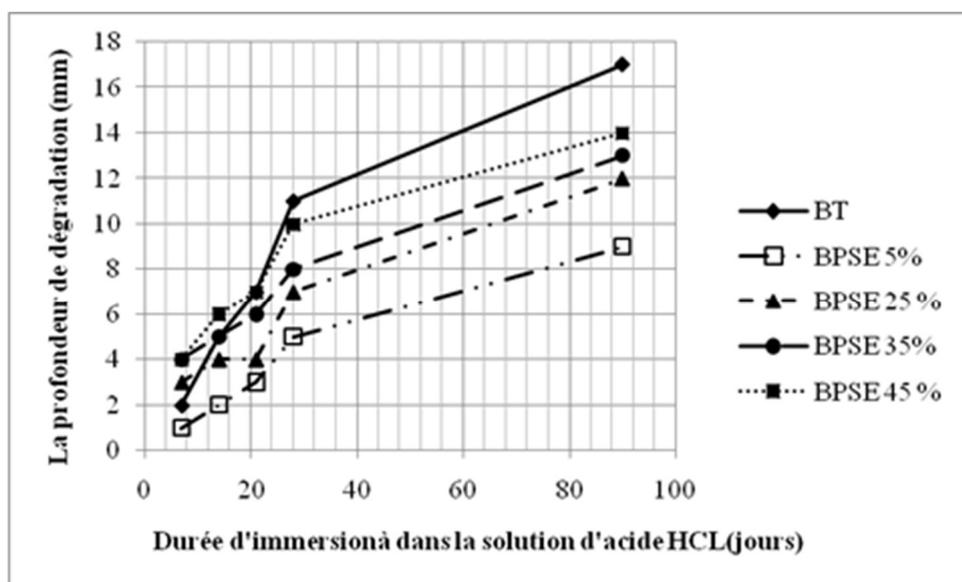


Figure III.30: Évolution de la profondeur de la couche dégradée des différents types de bétons en fonction de la durée d'immersion.

La zone attaquée est divisée en deux couches; une couche dissoute dans la solution et une autre dégradée non dissoute dans les différentes éprouvettes testées. La profondeur de l'attaque varie selon la teneur en bille de PSE et la durée d'immersion. Le tableau III.2, présente les changements dimensionnels mesurés en (mm).

Tableau III.2 : La variation de la profondeur de l'attaque de l'acide HCL

Type de béton	Épaisseur dégradée (mm)	Épaisseur dissoute (mm)
BT	17	5
BPSE5%	9	3
BPSE15%	10	4
BPSE25%	12	4
BPSE35%	13	5
BPSE45%	14	6

La comparaison entre la profondeur de couches dégradées (tableau III.2) de différents composites, montre que la dégradation des éprouvettes de béton léger de PSE, a été moins

importante que celle observée sur le béton témoin. En contrepartie, l'épaisseur de la couche dégradée du composite BPSE45% est la plus élevée devant celle des autres bétons de PSE à cause du taux important de la porosité et la mauvaise qualité de la zone inter-faciale qui sépare la pâte cimentaire et les perles de PSE. Malgré que le polystyrène résiste bien en contact avec un milieu acide, donc une augmentation des propriétés de transfert susceptible d'amplifier les dégradations dans un environnement agressif. En plus, l'augmentation de la porosité des zones en contact avec l'acide, est produite par la formation du CaCl_2 suite à la réaction du HCl avec la pâte de ciment hydratée (Siad et al., 2010).

III.5 Carbonatation

La mesure de la profondeur de carbonatation est réalisée à l'aide d'un double décimètre. Cinq lectures sont déterminées pour chaque face. Nous retenons comme résultat la moyenne arithmétique des épaisseurs mesurées à savoir : La distance la plus faible ; La distance la plus importante ; La moyenne relative aux trois distances intermédiaires. La Figure III.31, présente des photos prises à 30 jours de carbonatation. Notons que la zone carbonatée des échantillons prend la couleur du béton, alors que la zone saine prend une couleur rose.

Sur la figure III.31, les fronts de carbonatation visualisés par pulvérisation à la phénolphtaléine des bétons étudiés après 30 jours passés en enceinte de CO_2 . D'après la figure, on constate que la présence des perles de PSE en teneur inférieure à 25% a un effet négatif sur la carbonatation accélérée par rapport au cas de béton de référence .

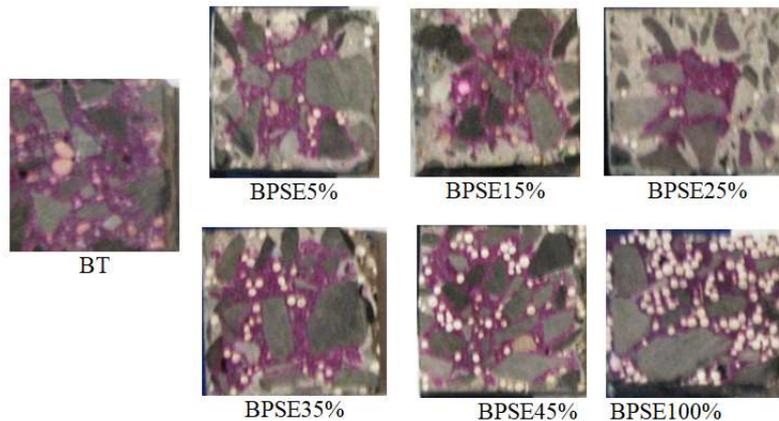


Figure III.31: la zone carbonatée des différents types de béton après 30j dans l'enceinte de CO_2 .

Par définition, la carbonatation accélérée consiste en l'action du dioxyde de carbone (CO_2), de l'enceinte hermétique dont le mélange gazeux régnant est composé de 50% de CO_2 et 50% d'air, qui diffuse sous forme gazeuse dans les pores du béton et se dissout en formant un acide au contact de la solution interstitielle de la pâte de ciment. La cinétique du processus de carbonatation dépend des paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, teneur en hydrates carbonatés, dosage en eau, porosité totale et distribution de la taille des pores et perméabilité) et au milieu environnant (teneur en dioxyde de carbone

,humidité relative dans laquelle la structure est située) et sa structure poreuse (Gendron, 2019).

La profondeur moyenne du front carbonaté des différents composites est représentée par la figure III.32. Selon l'histogramme, l'augmentation du taux de substitution des billes de PSE a permis l'accroissement de la zone carbonatée jusqu'à 25% de bille de PSE dont la valeur la plus élevée a été enregistré avec un moyen égale 17.2mm. Puis, au-delà de 25% en PSE on trouve que l'allure de l'histogramme descendu considérablement jusqu'à la valeur 1.5mm pour la substitution 100% donc inférieur à la profondeur du béton de référence (2,3mm).

Cette constatation est logique car les composites (5, 15, 25% en billes de PSE) caractérisé par l'accroissement de la porosité en fonction du relèvement de la teneur en billes de PSE donc logiquement la profondeur augmente. Par contre, les composites contiennent un taux de substitution dépasse 25% en PSE et la distance entre les perles de PSE est moindre, donc l'épaisseur de la matrice cimentaire est moindre grâce à la critère d'hydrophobie du PSE(Assaad, 2020) en conséquence réduction du phénomène de carbonatation.

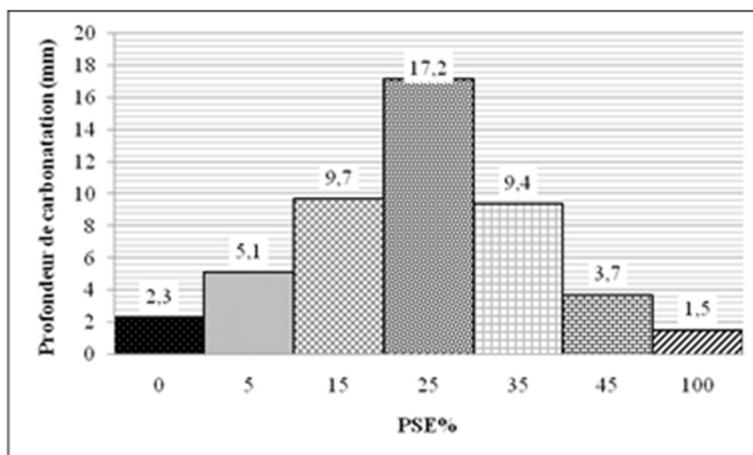


Figure III.32: Profondeur de carbonatation des différents types de béton.

III.6 Résistance au feu

A travers la littérature, le béton léger présente de nombreux avantages par rapport au béton conventionnel, excellent en performance d'isolation thermique et acoustique, bonne maniabilité, temps de réalisation rapide et facile, poids assez faible, résistant aux tremblements de terre, aux intempéries, aux économies de matériaux, la performance et la réduction des coûts de production. Néanmoins, peu de recherches enregistrés sur le comportement des bétons léger exposés aux températures élevées.

Au début du XXIème siècle, après plusieurs incendies, un phénomène à été observé par les experts, c'est l'instabilité thermique des bétons courant. De nos jours, la prise en compte réglementaire des risques d'instabilité thermique des bétons, et la répercussion que cela peut avoir sur la stabilité d'une structure durant l'incendie, repose essentiellement sur des approches expérimentales (Feron, Autuori, & Joyeux, 2006; Mindeguia, Carré, La Borderie,

& Pimienta, 2012). Le comportement au feu du béton dépend de plusieurs facteurs, des types et des proportions des composants utilisés, ainsi la méthode de fabrication. Puisque pendant l'échauffement le comportement de chaque matière présente des transformations physico-chimiques différentes et complexes. Dans cette section, on expose la tenue au feu des différents composites fabriqués.

III.6.1 Tenue des billes de PSE au feu

Les billes de PSE caractérisés par une structure alvéolaire renfermant 98 % d'air, c'est le choix idéal pour de nombreuses applications d'isolation et de construction. Bien qu'il soit considéré comme des cavité fermé dans la masse du béton, le PSE est vulnérable au feu. A cet effet, et afin de limiter les effets dus à l'instabilité thermique des bétons de PSE en particulier, il est indispensable de connaître au mieux le processus de leur endommagement sous l'effet thermique puisque le PSE peut être affecté à la fois favorablement et défavorablement à la température élevé, et les liaisons intra- et intermoléculaires, qui assurent la cohésion des matières plastiques, se brisent facilement quand la température augmente. Donc avant de soumettre les composites BPSE aux essais thermiques, il est primordial de mettre en lumière le comportement à haute température de ce matériau. Dans ce sens, des essais effectués au laboratoire. Alors, six échantillons de 1g de bille de PSE dans un récipient en acier, ont été soumis à différentes températures de chauffage 50, 100, 150, 200, 250 et 300°C, pendant 1 heure et un refroidissement pendant une demi-heure 30 minutes (figure III.33).

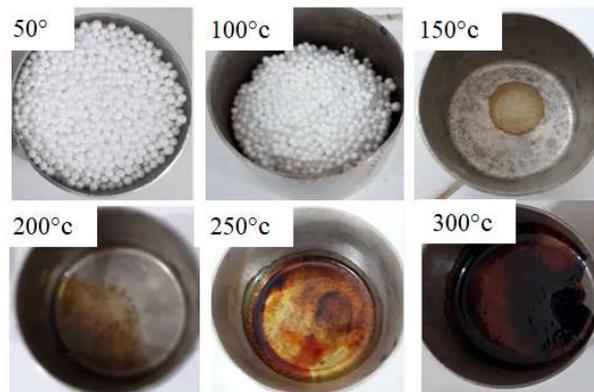


Figure III.33: Les billes de PSE avant et après leurs mises au four.

Les résultats illustrés sur la figure ci-dessous figure III.34 représentent la moyenne de trois échantillons.

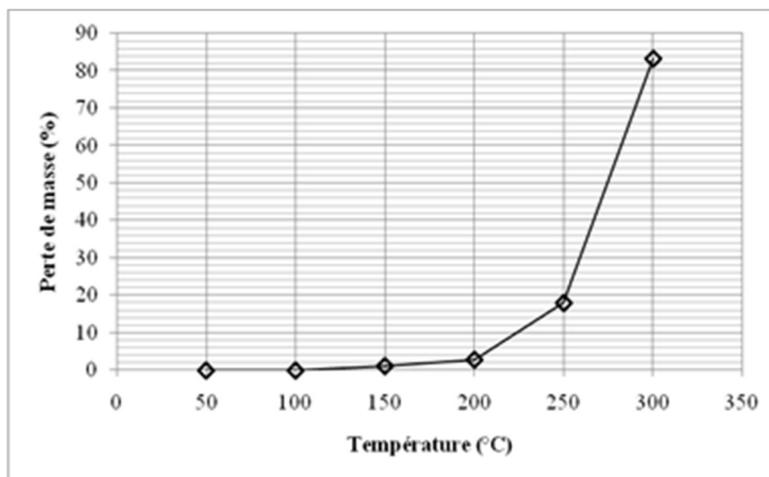


Figure III.34: La perte de masse des billes de PSE en fonction de la température

À la température 50°C, PSE n'enregistre aucune modification physique, c'est à partir de 100°C, les billes deviennent collants entre eux et prennent la forme du récipient, pourtant la perte de masse nulle. À 150 °C, les billes de PSE sont fusionnées et transformées à une pâte élastique, et le changement massique constaté est d'environ 1,19% (figure III.34). La décomposition de la pâte de polystyrène s'opérant entre 150 et 250 °C, où la désorption des liaisons intermoléculaires de cette matière en la déformant et la rendant fluide huileuse dont la perte de masse est d'environ 18.02%. D'une perte de masse d'ordre 83.21%, la combustion et l'inflammation du polystyrène à commencer à 300°C. En fait, ces phénomènes entraînent la formation de porosité supplémentaire ce qui favorise la libération de l'eau et de la pression de vapeur dans les pores capillaires, au profit des propriétés mécaniques du béton de PSE, mais en même temps, la combustion de particules de polystyrène (dont le volume est occupé à plus de 95% par l'air) peut créer des pics de pression dangereux.

III.6.2 L'effet de l'élévation de température sur la perte de masse des composites

L'évolution de la perte de masse des différents composites formulés en fonction de l'élévation de la température, allant de la température ambiante jusqu'au 600°C, est donnée sur la (figure III.35). Tout comme les composites cimentaires, à partir d'environ 100°C, l'eau est le premier composant qui va être éliminée successivement au cours d'une élévation de température selon sa position (dans les pores capillaires, adsorbé ou liée chimiquement). Ainsi, les billes de PSE à 150°C commencent la fusion, ce qui est observé sur la figure III.33.

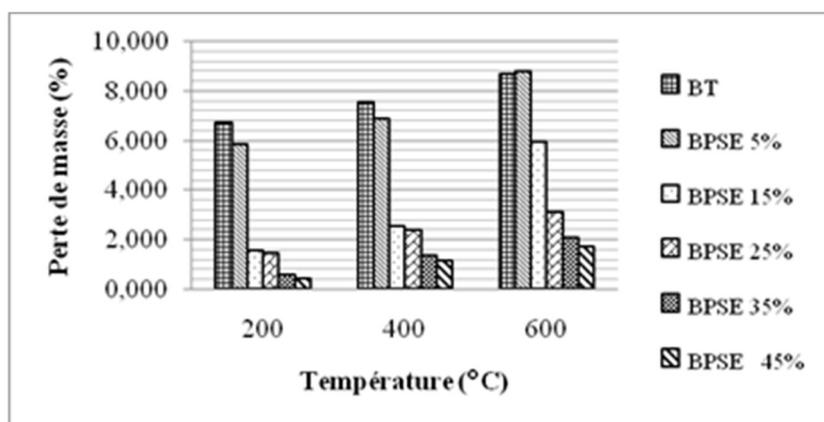


Figure III.35: La perte de masse en fonction de la température de tous les mélanges.

De façon globale, la présence des billes de PSE diminue la perte de masse pour les différents composites. Le béton témoin et le BPSE 5% présentent les valeurs les plus élevées quel que soit le degré de température de chauffe. La perte de masse varie entre 0,399 % et 8,807% pour tous les types de BL. En plus, la réduction du rapport E/C à effet bénéfique sur le taux de perte de masse durant l'échauffement.

À 200°C, l'évolution de la perte de masse pour toutes les composites est inversement proportionnelles à l'augmentation du pourcentage de PSE, elle a varié de 6,716% à 0,399%, pour une teneur de 0% à 45% en PSE. Ainsi, l'allure de l'histogramme nous donne trois niveaux de perte, un taux important de l'ordre de 6,716% et 5,859% pour les teneurs en PSE 0 et 5% respectivement puis un taux moyen de perte de masse qui oscille entre 1,587% et 1,453% pour les teneurs en PSE 15 et 25% respectivement. Un troisième niveau, caractérisé par une faible perte de masse d'ordre de 0,594 % et 0,399% concerne les deux dosages en PSE 35% et 45% respectivement. Cette perte correspond à l'évaporation de l'eau libre et dans les capillaires présentes entre les particules d'une côté. D'autre côté, le changement physique du PSE (fusion à 150/270) sachant que 95 % du volume de billes est occupé par l'air, elles sont considérées comme des pores fermés. Cette constatation a été mentionnée par (Nellgård, 2017) et (Lo Monte & Gambarova, 2014).

À 400°C, l'augmentation de la perte de masse continue d'évoluer en fonction de l'augmentation de pourcentage de PSE de façon semblable à 200°C. Elle varie de 7,587% à 1,146% pour une teneur de PSE allant de 0% à 45%. Selon Kalifa (Kalifa P, 1998) les amas d'hydrates se densifient, donc le réseau poreux interconnecté devient plus grossier et la perte causée par la suite d'évaporation de l'eau libre et physiquement adsorbé, ainsi une partie de l'eau faiblement liée chimiquement des CSH et de l'ettringite sans l'apparition des fissures de tension aux surfaces des éprouvettes. Les bétons BPSE35% et BPSE45% sont caractérisés par un plus faible rapport E/C, donc il perd moins d'eau que les bétons BT et BPSE5%. Par ailleurs, la décomposition des billes de polystyrène expansé à 270 | 450 °C (Lo Monte & Gambarova, 2014) ce qui augmente la porosité totale.

Après la montée de température à 600°C, on observe que la perte de masse a clairement continué d'augmenter. En particulier, les bétons BPSE5% dépassent légèrement les bétons

témoins. À cette température, Kalifa (Kalifa P., 1998) explique la perte par la décomposition de la portlandite et la formation d'un réseau de microfissures connectées dû aux déformations différentielles entre la pâte et granulats. En plus, les C-S-H poursuivent à déshydrater en silicate bi-calcique bC_2S , donc libération d'eau chimiquement liée et par conséquent la perte de masse devient très importante.

III.6.3 L'effet de l'élévation de température sur la masse volumique des composites

La figure III.36 présente l'évolution de la densité des bétons en fonction de la température de chauffage. Nous observons une diminution de la densité avec l'augmentation de la température. Cette propriété varie d'une manière presque inverse à la perte de masse (Elalaoui, 2012).

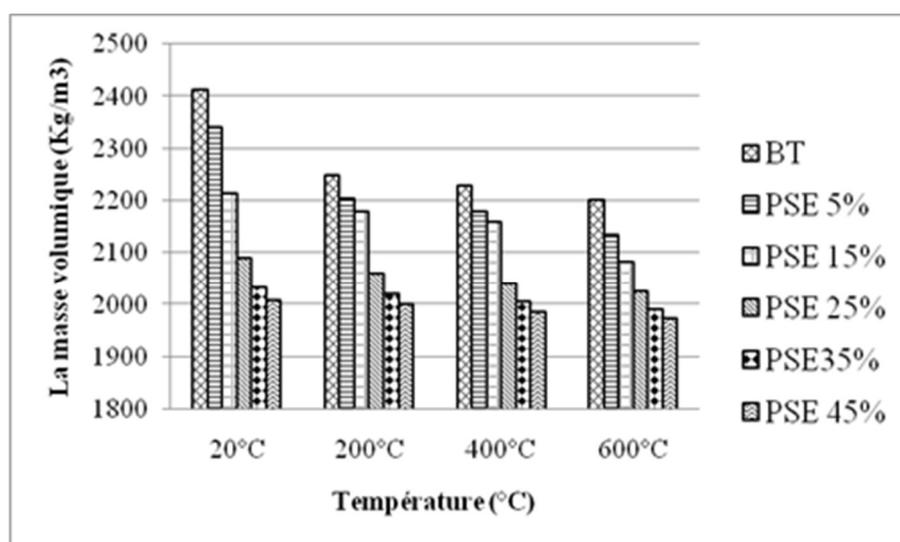


Figure III.36 : La variation de la masse volumique avec l'élévation de la température de tous les mélanges.

La masse volumique des différents composites diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage de PSE et l'élévation de la température de chauffe. La décroissance est due à la substitution d'une partie des granulats naturels par son équivalent en matériaux moins dense d'une part, d'autre part l'élévation de la température influe sur les granulats de PSE qui sont caractérisés par le point de fusion = 150°C. Elle varie de 2412 kg/m³ à 1974 kg/m³, pour une teneur en PSE allant de 0% à 45% correspond aux températures 20°C à 600°C. Ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 18,16%. La baisse de la masse volumique du composite, est liée à l'augmentation des taux de la cavité dans les éprouvettes.

III.6.4 L'effet de l'élévation de température sur la vitesse de propagation du son

Dans le but de découvrir la qualité du cœur des éprouvettes chauffés, la mesure de la vitesse de propagation des ondes soniques est adoptée. L'évaluation de la vitesse d'impulsion ultrasonore, dans les bétons témoins et ceux de PSE a été faite après le refroidissement des

éprouvettes. La figure III.37 présente les valeurs des vitesses des ondes soniques avant et après l'exposition des bétons aux hautes températures.

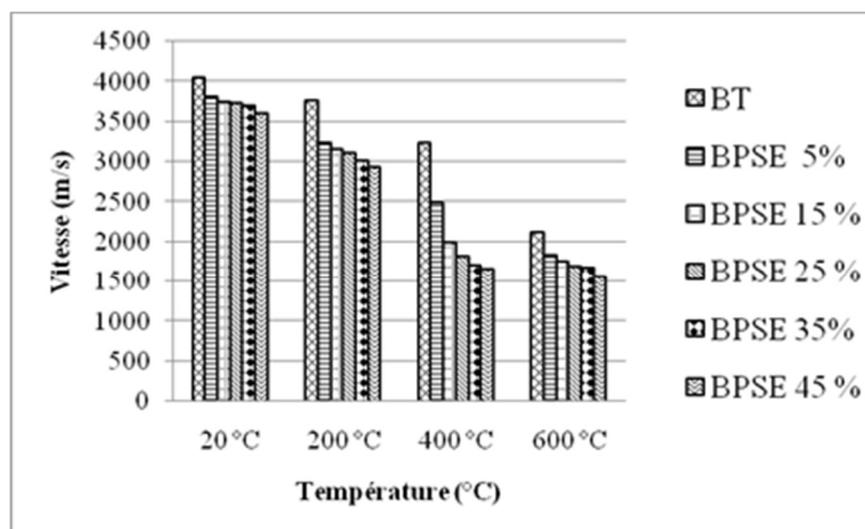


Figure III.37 : La vitesse du son en fonction de la température de tous les mélanges.

La vitesse du son varie de 4048,58 à 1566,6 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45% et de température de 20°C à 600°C respectivement. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores d'un côté, d'autre côté l'effet de la température de chauffe qui engendre des pores dans les éprouvettes chauffées par la fusion des billes de PSE. Le phénomène est accentué par la présence de bulles d'air dans les composites. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la matrice. Ceci met ainsi en évidence la capacité à atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations. Hachemi [HACHEMIS, 2015] confirme que la vitesse des ondes décroît d'une manière quasi linéaire en fonction de l'élévation de la température. Elle explique la baisse des valeurs de la vitesse des ondes par l'augmentation des volumes pores et l'endommagement de la microstructure par propagation des fissures.

III.6.5. L'effet de l'élévation de température sur la résistance à la compression

Les résultats obtenus de la résistance à la compression après le chauffage des éprouvettes à 200 °C, 400°C et 600 °C sont représenté sur la figure III.38. Ces résultats d'écrasement des éprouvettes calcinées sous différentes températures, indique que lorsque la température de chauffe dépasse 200°C, on constate une dégradation importante des propriétés mécaniques des bétons. Cette dégradation liée à l'augmentation de la température d'une côté, d'autre côté revient à l'augmentation de la teneurs en PSE.

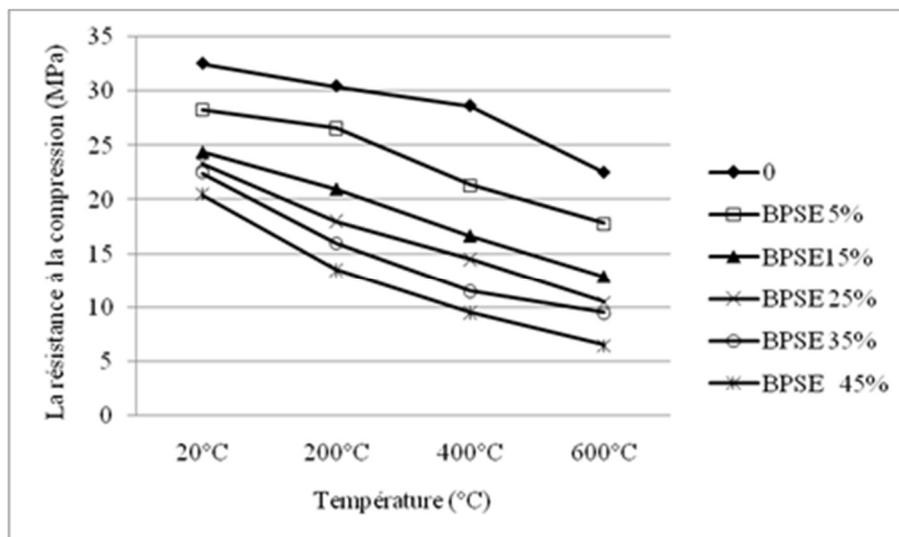


Figure III.38: Evolution de la résistance à la compression en fonction de la température

Afin de clarifier ces résultats, la figure (III.39) présente la perte de résistance à la compression selon la température de chauffage. De façon générale, l'augmentation de la température affecte la résistance en compression des bétons soit ordinaire ou allégé par les billes de PSE. Pour une teneur en PSE de 45%, la résistance à la compression décroît de 22,5 MPa à 6,5 MPa. Soit une réduction de l'ordre de 71,11% pour les températures allant de 20°C à 600°C respectivement, d'ailleurs c'est le composite le plus dégradé. La diminution est considérable avec l'augmentation de la température de traitement. Ce qui confirme les résultats trouvés par Sayadi et al.

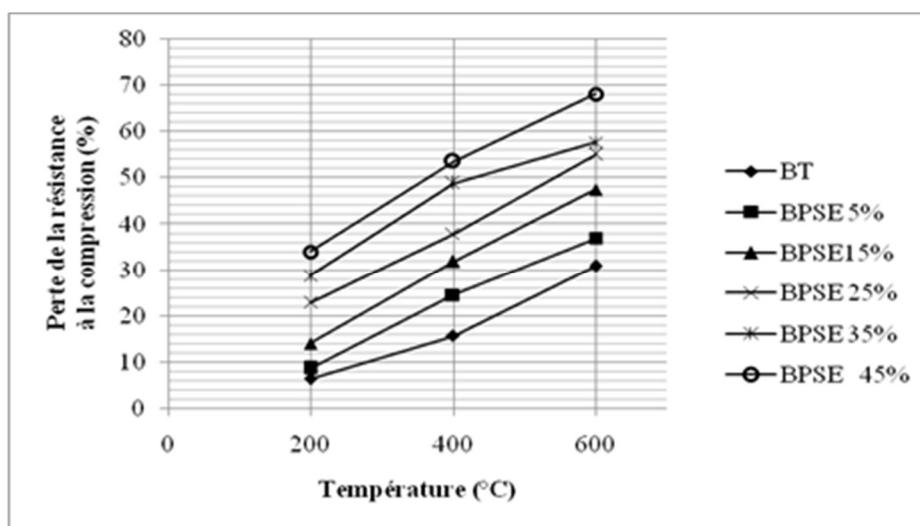


Figure III.39 : Évolution de la perte de la résistance à la compression de chaque type de béton en fonction de la température.

III.7. Observations visuelles des dégradations des différents composites après le refroidissement

Sous l'effet d'un traitement thermique, l'endommagement apparaît dans le béton élaboré sous différentes formes. L'une des conséquences de l'endommagement thermique

du béton de PSE est la disparition des billes de PSE comme nous pouvons le voir sur les photos de la figure (III.40). D'abord, à 20°C, les observations ont montré une répartition homogène des granulats de PSE, donc ne présentent pas le phénomène de remonter des billes de PES à la surface des composites, contrairement à ce qui était constaté dans les mortiers à base de polystyrène expansé.

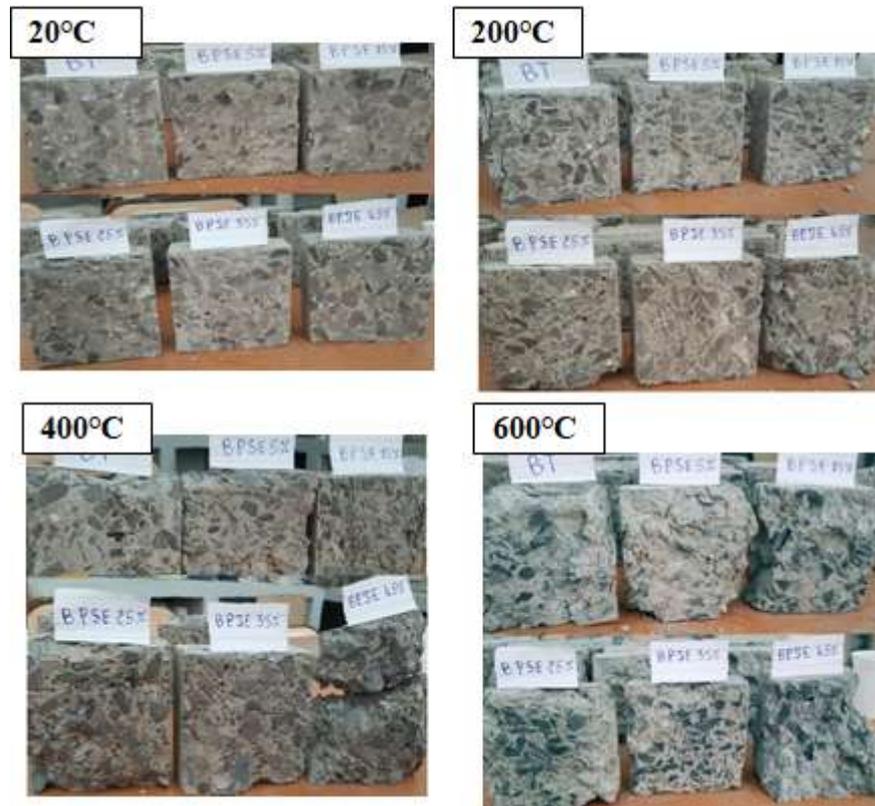


Figure III.40: L'état des éprouvettes BT et BPSE à 20°C, 200°C, 400°C et 600°C

A 200°C, les observations dans cette température, ont montré que les éprouvettes ne présentent pas de fissuration visible à l'œil à la surface des éprouvettes. Ainsi la totalité des billes de PSE qui se trouvent à la surface des éprouvettes sont fondues, mais à l'intérieur des éprouvettes une partie des billes de PSE restent comme des taches, par contre les granulats naturels restent intacts.

A 400°C, selon la photo de la figure (III.40) la totalité des billes de PSE qui se trouvent à la surface des éprouvettes sont fondues. Les premières fissurations ont été observées à la surface des éprouvettes après le cycle de chauffage-refroidissement sans présence d'éclatement des éprouvettes de béton témoin. La totalité des billes de PSE sont fondues ce qui provoque des pores non connectés.

A $T = 600^{\circ}\text{C}$, après le refroidissement des éprouvettes qui ont subi l'échauffement, nous avons constaté un endommagement très important des éprouvettes pour les pourcentages de PSE 45%, ce qui explique les valeurs de perte de masse des bétons déterminées à cette

température et la diminution importante de la résistance en compression. Les microfissures deviennent des macro-fissures et conduisant à la rupture du matériau. Les granulats naturels commencent à cette degré a présenté des désordres.

III.8 Caractérisation de la microstructure

L'analyse de la morphologie des spécimens a été réalisée en microscopie électronique à balayage (MEB) afin de mettre en évidence l'interaction entre les zones ciment-agrégats et les changements éventuels de la microstructure des composites élaborés. La figure (III.41), montre quelques images de MEB pour des échantillons de composites après 28 jours de maturité, commençant par figure (III.41.a), à 200 μm la visualisation des cellules fermées est l'espace intérieur d'une bille de PSE. Ce qui met en évidence la structure alvéolaire de la bille de PSE, ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau, à noter que la légèreté des composites est élaborée grâce à cette spécificité du PSE. Selon Jean-Philippe YVRARD (1998), la densité du PSE est généralement comprise entre 8 et 80 kg/m^3 , Nous constatons que le pourcentage volumique de la matière varie de 0.5 à 8 % pour un PSE. Ceci confère au PSE un fort taux de porosité fermé.

En raison de la propriété hydrophobe du polystyrène, la figure (III.41.b), illustre l'existence d'un champ autour de la bille de PSE qui la sépare de la pâte de ciment. Dans le cas des composites à fort pourcentage de PSE où les billes se rassemblent donc la distance entre les granulats est moindre et ils forment une zone de séparation autour d'eux, par conséquent l'épaisseur de la matrice cimentaire est moindre. En conséquence, chaque regroupement des billes de PSE peut faire de petites fractions dans la matrice entourée, donc l'accrochage entre la pâte et les billes de PSE est fortement réduit. Ce phénomène augmente les vides et l'absorption d'eau (figure III 41.c). D'ailleurs, la figure (III.41.d), montre une mauvaise adhérence de la zone de transition interfaciale (ZTI) entre les billes de PSE et la pâte de ciment, ce qui peut réduire considérablement la résistance. Cela dû au fait que les billes PSE ont des charges électrostatiques de surface (Bousquet, 2008) qui pousse la pâte sur la zone de contact de la pâte et les billes PSE (Babu, 2003), notamment où le rapport E/C élevé.

Comme mentionné précédemment, les billes de PSE sont considérées comme des vides non connectés, néanmoins leur propriété hydrophobe fait que la zone (ZTI) s'étend pour qu'il soit des canaux connectés ce qui mène à l'augmentation de l'absorption par capillarité, (figure III 41.e). Finalement, dans la figure (41.f), la pâte de ciment qui englobe la particule de PSE, engendre des vides qui peuvent être des pores d'air entouré des billes de PSE. Ce vide peut également résulter d'une augmentation de la quantité d'eau dans la pâte.

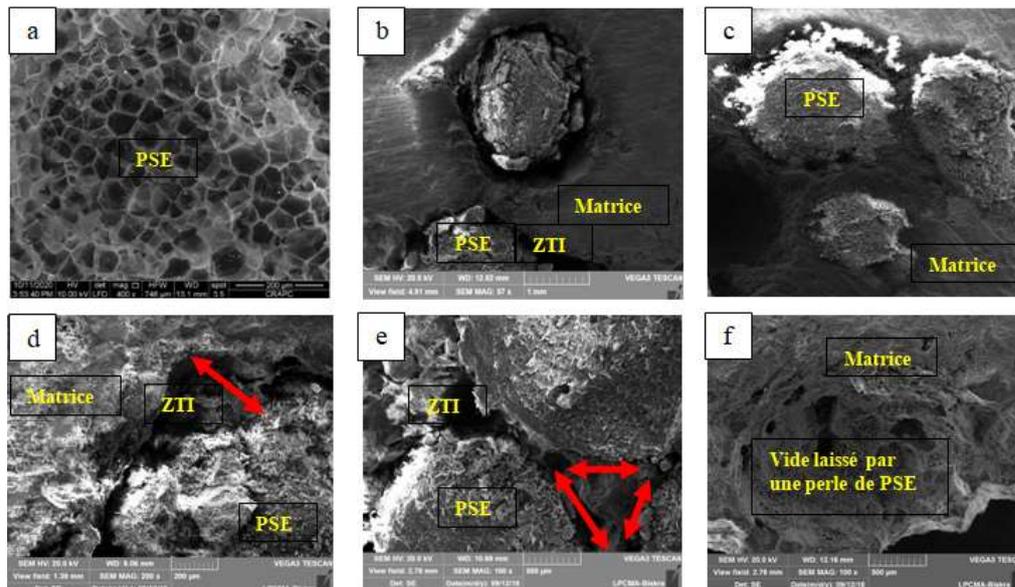


Figure III. 41 : Aspect de la structure poreuse de la bille de PSE au M.E.B

III.9 Conclusion

La campagne des résultats expérimentaux discutée dans ce chapitre a permis d'une côté de confirmer les constatations déclarés dans la littérature, d'autre côté de dévoiler la spécificité de nos mélanges (mortier/béton) de PSE. D'abord, nous avons commencé d'exposer les résultats trouvés sur les mortiers puis sur les bétons. L'étude des mortiers de PSE à l'état frais et durcis, a permis de démontrer que la qualité de la pâte cimentaire et le taux de substitution des sables par les billes de PSE affectent fortement leurs propriétés. La teneur élevée en billes de PSE, dans les deux types de mortier soit celle de (0.5%) en plastifiant ou bien de (1%)PL, a modifié leurs maniabilités en augmentant l'ouvrabilité dont été maîtrisé par la diminution du rapport E/C. De plus, selon la teneur en billes de PSE, plusieurs classes de mortier se manifestent par la considération de la réduction de la masse volumique, de la résistance à la compression et à la traction par flexion, ainsi à la réduction de leurs modules d'élasticité dynamique.

Concernant les bétons de PSE, peu d'étude ont été menées sur le remplacement des billes de PSE dans un béton de structure. Notamment, pour évaluer la durabilité du béton de PSE. Dans ce chapitre, une investigation expérimentale a été réalisée sur ces bétons dans des conditions extrêmes, afin d'étudier leurs processus de dégradation dans de telles conditions. Le remplacement du sable par les billes de PSE a évolué l'ouvrabilité des bétons plastique dont l'affaissement est prise égal à 7 cm. Par conséquent, et pour garder la même classe d'ouvrabilité, une diminution nécessaire de la quantité d'eau de gâchage sans altération de l'homogénéité du BPSE. Ainsi, l'augmentation de teneur en des billes de PSE a diminué positivement la densité et négativement les propriétés mécaniques (la résistance mécanique à la compression (R_c), la résistance mécanique à la traction R_t et le module d'élasticité dynamique (E_d)). Cette diminution a permis de classer ces bétons légers en trois niveaux sur la base d'une corrélation entre la masse volumique et la résistance à la compression après 28 jours de cure. Ces classifications sont présentées dans le tableau (III.1).

Une approche de durabilité a été adoptée afin d'évaluer le comportement des BPSE envers les conditions extrêmes du milieu. Les critères d'absorption, de retrait et de gonflement ainsi ont été discutés. En plus, la sensibilité de ces bétons exposés à des environnements chimiquement agressifs (HCL), aux conditions accélérées de carbonatation et à des cycles de chauffage-refroidissement de l'ordre de (200, 400 et 600 °C). Commencant par les critères hydriques des BPSE, une forte absorption capillaire d'eau constatée dans les PSE dont la teneur est : 5 ; 15 et 25%. Contrairement à ce qui a été observé pour les teneurs supérieures ou égale 35%. Le composite avec une absorption d'eau plus grande par capillarité était le béton de 5% de PSE et le béton avec une absorption d'eau plus faible par capillarité était le béton de 100% en billes de PSE. Ainsi, le retrait le plus élevée dans toutes les séries a été enregistré entre 1000 et 1 200 micromètres après 90 jours pour 100% de billes de PSE. Donc, la présence de ces billes a un effet néfaste sur la stabilité dimensionnelle, ce phénomène est lié à la faible rigidité des billes de PSE ainsi que la faible zone d'interaction entre la pâte de ciment et les granulats. Globalement, l'augmentation du gonflement est liée à de l'augmentation des teneurs en PSE. Ceci nous a permis de conclure que la présence des billes de PSE dans les bétons élaborés a augmenté la capacité d'absorption d'eau donc un taux important des vides au niveau des interfaces pâte – bille de PSE et c'est un effet négatif pour la durabilité de nos composites.

De plus, notre investigation sur le comportement des spécimens en BPSE dans le milieu acide (HCL), a montré que l'utilisation de ces billes a rendu le béton léger moins sensible. D'ailleurs, la perte de masse du BT dépasse celle du composite contenant les billes de PSE. Ainsi, après 90 jours d'exposition à la solution de HCL, une zone dégradée d'ordre de (10 mm) se manifeste à la surface des spécimens. En plus, le processus de vieillissement par immersion dans une solution acide chlorhydrique HCl a produit des pertes de masse importantes. Concernant la perte de résistance, le béton sans billes de PSE est sensiblement dégradé, soit une perte de résistance de l'ordre de 17,05%. Pour une teneur en PSE de 5%, la perte de la résistance est de l'ordre de 7,92%, l'explication de ce constat orienté vers la présence de granulats de PSE qui limite du processus de dissolution.

L'étude de l'effet de la haute température sur nos bétons a été élaborée après le contrôle du comportement des billes de PSE seule à différentes températures. L'analyse des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons après le traitement thermique allant de 200°C, 400°C et 600°C montre que la présence des billes de PSE diminue la perte de masse pour les différents composites. Le béton témoin et le BPSE 5% présentent les valeurs les plus élevées quel que soit le degré de température de chauffe. La perte de masse varie entre 0,399 % et 8,807% pour tous les types de BL.

Quant à la vitesse du son, elle varie de 4048,58 à 1566,6 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45% et de température de 20°C à 600°C respectivement. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores d'un côté, et d'autre côté l'effet de la température de chauffe sur les billes de PSE qui ont commencé à se fusionner à partir de 150 °C. En plus, les résultats d'écrasement des éprouvettes calcinées sous différentes températures, indique que lorsque la température de chauffe dépasse 200°C, la dégradation des propriétés mécaniques des bétons de PSE devienne importante. Cette

dégradation liée bien sûr à l'augmentation de la température d'une côté, d'autre côté revient à l'augmentation de la porosité due à la fusion des billes de PSE.

À propos des résultats tirés par les essais de carbonatation, il a été constaté que la présence des billes de PSE en teneur inférieure à 25% montre une profondeur de carbonatation plus élevée par rapport à celle du béton de référence dont sa valeur la plus élevée a été enregistré avec un moyen égale 17.2mm. Puis, au-delà de 25% en PSE la zone carbonatée atteint à la valeur 1.5 mm pour la substitution 100% donc inférieur à la profondeur du béton de référence (2,3mm).

À la lumière de ces résultats, la réalisation d'un composite à base des billes de PSE de multiple fonction semble faisable. Notamment, la possibilité de formuler un composite tout en satisfaisant les critères de légèreté et de résistance ainsi de durabilité. Dans la suite de ce chapitre, l'étude est orientée vers le comportement thermique des bétons de PSE. Les paramètres qui influencent et contrôlent les critères d'isolation thermique de ces bétons, notamment l'effet de la capacité thermique du polystyrène expansé.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Caractérisation Thermique

Chapitre IV : Résultats et Discussions Caractérisation Thermique

IV. 1 Introduction

Le concept de développement durable tout en respectant l'environnement est la majeure préoccupation des pouvoirs publics et les acteurs industriels dans tous les domaines économiques, Notamment le secteur du bâtiment (résidentiels et commerciaux) qui consomme 20,1% de l'énergie totale consommée dans le monde entier (EIA., 2016). En Algérie, le secteur de construction est le plus grand consommateur d'énergie avec plus de 40% de la consommation d'énergie finale. Il est responsable aussi de près d'un quart des émissions de gaz à effet de serre. Dans le but de préserver l'environnement, le ministère de l'environnement prévoit une réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Pour les constructions neuves, la nouvelle réglementation thermique 2012 impose de nouvelles exigences conduisant à imaginer des dispositions constructives lourdes, incorporant des systèmes d'isolation par l'extérieur ou des rupteurs thermiques. Dans ce contexte énergétique et économique, il est intéressant d'envisager des formulations de bétons de structure avec des propriétés améliorées d'isolation thermique. L'utilisation de granulats légers, qui possèdent une bonne qualité d'isolation grâce à leur structure poreuse, peut être une solution pour améliorer la capacité d'isolation des bétons.

Ce chapitre traite les phénomènes de transfert de chaleur qui constitue en fait une des caractéristiques essentielles du béton léger, nous rappelons d'abord les bases scientifiques du comportement thermique, les différentes méthodes de mesure des propriétés thermiques ainsi que les paramètres extrinsèques affectant ces propriétés, comme la température ou l'humidité relative qui seront aussi considérés. Puis, l'exposition des résultats expérimentaux trouvés sur les mortiers de PSE et les bétons de PSE. Notre objectif est de synthétiser l'influence des différents facteurs sur le comportement thermique de nos composites, à travers l'ensemble des résultats obtenus par des mesures effectuées sur les divers échantillons élaborés (conductivité thermique, la chaleur spécifique) ainsi que les valeurs de la résistance thermique et de la diffusivité thermique obtenue par calcul. Rappelons que les composites sont fabriqués sur la base de l'exploitation du polystyrène expansé PSE comme substitution du sable corrigé dans les mortiers et dans les bétons, alors les composites réalisées sont :

- Mortier normale et béton dit ordinaire (les échantillons de référence),
- **Mortier et bétons de polystyrène.**

IV.2 Généralités

Le secteur des bâtiments est un acteur clé dans la lutte contre le changement climatique. La consommation d'énergie des bâtiments a augmenté rapidement ces dernières années. Dans le but de réduire cette consommation d'énergie et protéger l'environnement, sans influencer le confort des occupants, presque tous les récentes recherches accentuées vers l'élaboration des alternatives que ce soit en ce qui concerne les techniques et les conceptions des immeubles ou bien le choix de matériaux de construction traditionnels qui sont caractérisés par l'efficacité énergétique. Dans ce sens, les exigences de la réglementation thermique impliquent de développer de nouvelles technologies dans la construction neuve et d'accélérer la rénovation du parc existant. Pour concevoir un bâtiment énergétiquement très performant, des solutions technologiques significatives dans l'isolation des bâtiments sont nécessaires dès les premiers stades de la conception. 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 (Cérézo, 2005).

IV.2.1 Isolation thermique dans le bâtiment

En Algérie, l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE), a lancé en 2011 le premier programme d'éco-bâtiment et a porté sur un projet pilote de 600 logements de type public locatif (LPL), réparti sur le territoire national à travers onze (11) wilayas représentant les trois zones climatiques : nord, hauts plateaux et sud.

Un nouveau programme d'isolation thermique des bâtiments d'une capacité de "1.000 équivalents logements/an" a été lancé en 2019. Sur le plan technique, ces bâtiments présentent aujourd'hui de nombreuses qualités, une déperdition maîtrisée et une bonne inertie thermique. Les solutions et les produits technologiques sont favorisés, tant pour diminuer la consommation d'énergie que pour réduire la déperdition d'énergie dans les bâtiments. La déperdition d'énergie provient essentiellement de la transmission thermique de l'enveloppe du bâtiment avec l'extérieur (chaleur et froid). L'enveloppe du bâtiment doit transformer les agressions extérieures en confort pour ses occupants. Cependant, les transferts de chaleur à travers le bâtiment représentent souvent la plus grande perte d'énergie pour celui-ci. (Rahmouni, 2020). Notons que la mauvaise isolation avec l'extérieur génère la déperdition d'énergie qui se manifeste à plusieurs endroits du bâtiment : mur, toit, sol, portes et fenêtres, plancher et les ponts thermiques. De façon générale, en Algérie, les parties isolées dans un bâtiment sont les toits de terrasse 'plancher terrasse' devant le fait qu'ils sont responsable de près de 30% des déperditions de chaleur et moins coûteuse que l'isolation des murs. Alors, le point à isoler en priorité dans un logement est le toit. Dans les maisons anciennes, il serait responsable de près de 25 à 30% des déperditions de chaleur. "L'isolation de la toiture est la plus rentable, c'est la première étape à réaliser car le potentiel d'économies d'énergie est important. En effet, l'air chaud, plus léger, s'élève naturellement et vient

en grande partie se loger sous le toit", explique l'Agence de l'Environnement et de la maîtrise d'énergie (ADEME). Le niveau d'isolation de tous les points de l'enveloppe doit être le même pour éviter les ponts thermiques (discontinuité dans la couche isolante), ces derniers pouvant compromettre les efforts investis dans l'isolation en causant d'importantes pertes thermiques. Une enveloppe performante se doit de garantir une étanchéité suffisante en limitant au maximum les infiltrations et exfiltrations d'air inopportunes. Très présents dans les bâtiments isolés par l'intérieur, les ponts thermiques peuvent représenter jusqu'à 15% des déperditions totales des parois. (S. Rahmouni, 2020). Dans ce contexte, les responsables de l'Agence (APRUE) ont mis l'accent sur l'importance de développer une industrie des matériaux isolants (laine de roche, laine de verre, polyuréthane, liège, polystyrène...). Afin d'éviter les déperditions d'énergie en renforçant la performance technique du bâtiment (isolation des murs, isolation des combles, étanchéité à l'air, triple vitrage...). D'ailleurs, les besoins en chauffage et en climatisation seront plus ou moins importants selon les propriétés de l'enveloppe (Boursas, 2013): plus elle est performante, moins il sera nécessaire d'avoir recours aux systèmes énergétiques pour tempérer le bâtiment, et plus la consommation d'énergie sera faible.

Dans ce sens, le gouvernement a défini un programme relatif à l'efficacité énergétique, l'objectif est d'arriver à une réduction de 9% de la consommation globale d'énergie à l'horizon 2030, soit une économie de 63 millions de tonnes équivalent pétrole, représentant un gain financier de 42 milliards de dollars. La mise en œuvre de ce programme conduira, à l'horizon 2030, notamment à l'isolation thermique de 100.000 logements par an. Pour ce faire, le traitement des déperditions au niveau des murs et les ponts thermiques devient nécessaire en agissant sur la seule limitation des déperditions thermiques par transmission, il est possible d'atteindre cet objectif tout en réduisant substantiellement la charge de climatisation d'été.

IV.2.2 Phénomènes de transfert de chaleur

La chaleur est une forme d'énergie thermique, c'est l'énergie cinétique d'agitation microscopique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts thermiques qui traitent les échanges thermiques (transferts de quantité de chaleur). Ils jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Deux corps ayant la même température sont dits en équilibre thermique. Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a alors un transfert de chaleur, qui entraîne ou non une transformation du matériau.

IV.2.3 Modes de transfert de chaleur

Les propriétés thermiques des matériaux régissent les échanges thermiques qui sont les phénomènes de transferts d'énergie thermique qui se produisent dans un système hors équilibre thermodynamique. En effet, ces transferts existent dès lors qu'il y a présence d'un écart de température (ΔT), entre deux zones dans un corps ou entre le corps et son environnement (le milieu ambiant), du milieu à plus haute température vers

le milieu à plus basse température. Cet écart de température génère alors un échange de chaleur afin d'atteindre l'équilibre thermodynamique du système global. Ces échanges thermiques peuvent être ou non accompagnés de transfert de masse ou de changement de phase (solide, liquide, gaz). Les types de transfert d'énergie thermique sont classés en trois phénomènes physiques : conduction, convection et rayonnement. Une brève description de ces trois phénomènes dans ce qui suit séparément. Il faut noter que ces modes sont en général interdépendants et qu'ils se présentent simultanément dans les problèmes pratiques.

IV.2.3.1 Le transfert de chaleur par conduction

Le transfert par conduction est un échange d'énergie avec contact. Dans un gaz ou un liquide, l'énergie se propage par contact direct entre molécules au gré des chocs aléatoires à l'échelle microscopique. Dans les solides, la conduction thermique est assurée par les électrons de conduction et les phonons, autrement dit les vibrations du réseau cristallin non-métallique. Ces phonons interagissent avec les électrons libres, ce qui explique que la conductivité thermique et électrique soient liées (EYG97, SHI06, FRE08). La loi dite de Fourier établit que la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. En effet, la conduction thermique est un transfert thermique spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus basse.

En raison de l'équilibre thermique du système, l'échange d'énergie par conduction peut être adapté soit en régime permanent ou transitoire. Concernant le régime permanent, la température est constante en chaque point donc elle est indépendante du temps. Dans le cas d'un milieu isotrope, ce transfert de chaleur spontané d'une région de température élevée vers une région de température plus

basse obéit à la loi dite de Fourier (établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822).

$$\vec{\varphi} = -\lambda \text{grad}(T) \dots \dots \dots (IV.1)$$

tel que $\vec{\varphi}$ (w/m²) est le vecteur de densité de flux thermique et λ (w/m.k) représente la conductivité thermique du matériau.

IV.2.3.2 Le transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection est un transfert d'énergie s'accompagne de mouvement de molécules dans un milieu matériel (liquide ou gaz) avec mouvement de matière. Contrairement à la conduction, il y a ici déplacement de matière. Ce mode de transfert indique l'échange thermique au travers d'écoulements intra-fluide ou entre une surface solide et la zone limite d'un fluide en mouvement. Selon le gradient de température, on distingue trois cas de convection :

- La convection naturelle : regroupe les écoulements des fluides dues à la variation de la température modifie localement la masse volumique du matériau (le fluide froid est plus dense que le fluide chaud).
 - La convection forcée : dans ce cas, l'écoulement du fluide est entraîné artificiellement dont le transfert est d'autant plus rapide que la vitesse du fluide est grande.
 - La convection mixte: qui comprend les deux manières équivalentes des deux modes de convection (naturelle/forcée).

Le phénomène d'échange thermique par convection est très complexe car il est fondamental pour résoudre des équations qui régissent la mécanique des fluides : conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) et conservation de l'énergie.

Dans le domaine du bâtiment, en particulier durant l'augmentation de la température d'un élément, le fluide (liquide/air) se met en mouvement et se déplace vers l'élément froid au contact dont il perd sa chaleur, produisant un mouvement vertical qui accélère les échanges thermiques entre les deux éléments. En effet, plus le fluide entrant en jeu est immobile, moins il y a de convection. Le flux de chaleur transmis entre la surface de contact d'un solide et d'un fluide est exprimé par la loi de Newton :

$$q = \lambda \cdot S(T_s - T_f) \dots \dots \dots (IV.2)$$

Où : q (W) indique le flux de chaleur ; λ représente le coefficient de transfert thermique par convection ; T_s et T_f désignent respectivement la température à la surface du solide et dans le fluide ; S (m^2) la surface d'échange.

IV.2.3.3 Le transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert thermique par rayonnement, est le mode de transmission de la chaleur dans le vide ou par un milieu transparent par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde comprise entre 0.1 et 100 μm . En effet, Ce type de transfert ne nécessite pas de matière comme support de propagation (il peut avoir lieu dans le vide). Les caractéristiques de ce rayonnement électromagnétique dépendent de la température du corps émetteur et des caractéristiques physiques de la surface émettrice du corps. La propriété thermique du matériau qui conditionne l'émission est l'émissivité du matériau. Elle dépend de la nature du matériau, de l'état de la surface et des couches moléculaires proches de la surface. Selon la loi de Planck, l'émission de ce rayonnement est le résultat de la transition des électrons entre deux états d'énergie différents. Le flux de chaleur émis par un solide est basé sur la loi de Stefan-Boltzmann qui relie le flux thermique maximal émis par un corps à sa température :

Le transfert radiatif concerne aussi bien les solides que les liquides et les gaz ; dans le cas des bâtiments, on s'intéresse surtout à l'émission des surfaces solides. En général, le transfert thermique par rayonnement d'une surface solide s'écrit (Équation 1.12) :

$$q = \varepsilon \cdot \sigma S (T_{surf}^4 - T_{env}^4) \dots \dots \dots (IV.3)$$

Tel que ; q : indique le flux de chaleur net émis par la surface

ε : l'émissivité de la surface cette dernière est comprise entre 0 et 1 et traduit l'efficacité d'une surface à émettre de l'énergie par rapport à un corps noir (1 étant la valeur pour un corps noir parfait),

σ : la constante de Stefan-Boltzmann qui représente la limite supérieure du pouvoir d'émissivité d'une surface idéale

T_{surf} [K] la température absolue de la surface émettrice et T_{env} [K] la température du milieu environnant de la surface.

IV.2.4 Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques des matériaux révèlent le comportement du matériau soumis aux transferts stationnaires : conductivité thermique, résistance thermique, émissivité, ou des transferts dynamiques : diffusivité thermique et effusivité thermique. En effet, elles sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou plusieurs types d'échange thermique. Ainsi, ces grandeurs thermiques se rapportent à la capacité du matériau à absorber de l'énergie thermique. Cette énergie thermique peut être absorbée pour élever la température du matériau ou pour le transformer (changement des propriétés physiques ou d'état du matériau) : capacité thermique, enthalpie de fusion (ou autre transformation), coefficient de dilatation thermique...

Toutes les propriétés thermiques des matériaux sont dépendantes de la nature du corps et de sa température. La mesure de ces propriétés est donc indissociable de la mesure de la température et de la connaissance de la nature du matériau (au moins de la connaissance de son caractère homogène et isotrope). Les valeurs de chaque propriété sont donc affichées en donnant la nature du matériau et la température de mesure ou la relation de la grandeur en fonction de la température. Les principales propriétés thermiques sont : la conductivité thermique, la capacité thermique, la résistance thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique.

IV.2.4 Mesure des propriétés thermiques

Les principales propriétés fréquemment utilisées pour décrire la performance de transfert thermique d'un matériau sont la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la résistance thermique et la diffusivité thermique. Il existe plusieurs méthodes de mesure utilisées pour décrire le transfert de chaleur à travers un matériau. Ces méthodes de mesure peuvent être classées suivant trois critères: le type de régime thermique, le type de mesure et la géométrie de l'appareillage et des éprouvettes.

Concernant le régime thermique, on distingue deux types. Il peut être stationnaire ou transitoire. Pour le régime stationnaire ou permanent, les températures ne dépendent pas du temps. La température ne dépend plus que de la disposition du point où l'on effectue la mesure et plus du temps. Ces méthodes permettent uniquement de mesurer la conductivité thermique. D'après Franco, les méthodes en régime stationnaire sont compliquées et nécessitent un temps relativement long pour établir un gradient de température permanent traversant l'échantillon. À cause des appareillages compliqués, des conditions de mesure strictes (Franco, 2007). Dans les appareillages à plaque chaude gardée, à fluxmètres et à symétrie cylindrique, le régime thermique couramment utilisé est stationnaire.

Dans les méthodes en régime transitoire, les mesures sont effectuées en fonction du temps. Ces méthodes consistent à appliquer sur un échantillon à l'équilibre une perturbation thermique, et à mesurer une ou plusieurs températures (ou flux) en fonction du temps. Ainsi, elles permettent l'identification des trois paramètres : conductivité, chaleur spécifique et diffusivité. Dans la section suivante, nous exposons brièvement la description des techniques de mesure les plus fréquentes en régime transitoire, les techniques du fil-chaud et du Hot-disk. Actuellement, ces techniques sont les plus utilisées.

IV.2.4 .1 Méthode du fil chaud

La méthode du fil chaud est une des méthodes transitoires les plus utilisées pour mesurer la conductivité thermique des isolants car elle est simple et rapide à mettre en œuvre (Nagazaka . Y et al., 1981), (Zhang et al., 1993), (Coquard R et al., 2006), (ISO 8894). Selon Degiovanni A., l'origine de cette méthode a été développée par Carslaw et Jaeger pour la mesure des conductivités des liquides, puis elle a été étendue aux solides isolants à hautes températures (Degiovanni A, 1994), (Ngu,2013).

Le principe de fonctionnement est relativement simple, il consiste à placer un élément chauffant qui se présente sous la forme d'un fil de longueur infinie et de diamètre infinitésimal entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. Le fil délivre un flux de chaleur sous forme d'échelon afin de produire localement un échauffement de quelques degrés du matériau. Cet échauffement (quelques degrés au-dessus de l'ambiante) est en règle générale mesuré ponctuellement par thermocouple. C'est l'analyse mathématique de cet échauffement qui permet de déterminer la conductivité thermique. Le schéma de la Figure IV.1, montre sa mise en œuvre.

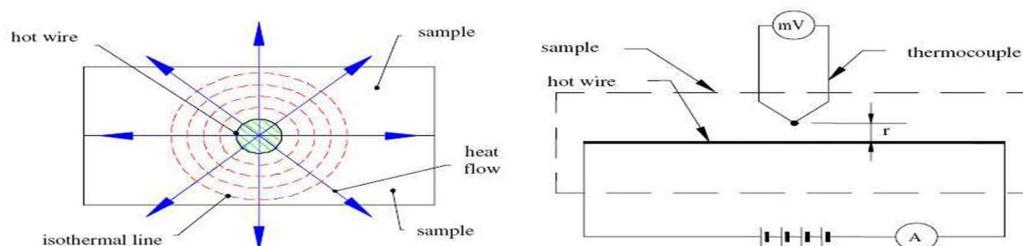


Figure IV.1: Schéma de principe de la méthode du fil chaud (Franco. A, 2007)

Les dimensions des échantillons en épaisseur et en surface sont choisies de façon à satisfaire l'hypothèse d'un milieu semi-infini pendant un temps suffisamment long de façon à considérer le transfert thermique autour du fil comme étant radial (Félix.V, 2011). Souvent, la taille des échantillons soit restreinte et avec des temps très courts d'ailleurs la rapidité est l'un de ses principaux avantages. En revanche, le contact imparfait entre le fil chaud et l'éprouvette peut représenter une source importante d'erreur et la pertinence de la méthode pour des matériaux anisotropes ou semi-transparents est discutable (Degiovanii.A, 1994) (De Ponte.F et al, 2002). Franco [Franco, 2007] a préconisé une variation de la méthode du fil chaud en remplaçant une des deux éprouvettes par un isolant. Le fil chaud est utilisé comme une sonde thermique pour éliminer la non-homogénéité locale du matériau. De plus, un autre thermocouple est ajouté pour assurer une bonne précision (Ngu.Y, 2013).

IV.2.4 .2 Méthode de Hot-disk

La méthode du Hot-disk est une extension de la méthode fil chaud. C'est une technique de source plane transitoire (TPS) développée pour effectuer des mesures sur des matériaux de propriétés thermiques très variées. Grâce à l'élément Hot-disk (appelé élément TPS) est souvent utilisé à la fois comme la source de chaleur et la sonde thermique. Il est placé entre deux échantillons du matériau à étudier, comme les autres techniques de sondes thermiques. C'est un appareil de mesure de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de la capacité thermique des solides, liquides, poudres et pâtes.). Il couvre une gamme de conductivité thermique extrêmement large (de 0.005 à 1800 W.m-1.K-1) et mesure aussi bien la conductivité thermique des matériaux homogènes que des matériaux hétérogènes.

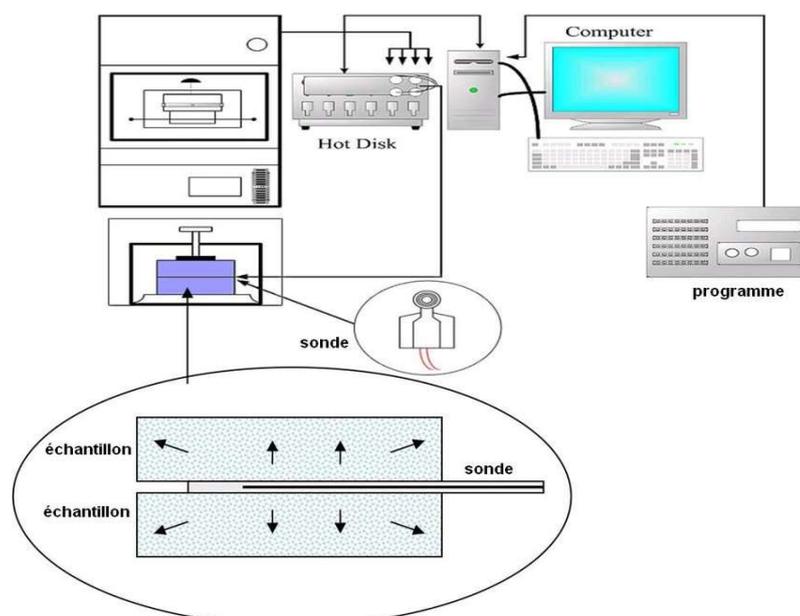


Figure IV.2: Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk. (Boukhattem, 2008)

La difficulté qui apparaît lors de l'utilisation de cette méthode est d'avoir d'avance une idée sur les caractéristiques thermo-physiques du milieu. En effet, la connaissance grossière du matériau étudié (géométrie, conductivité thermique) permet de prédire la profondeur de pénétration et ainsi de choisir le type de sonde et la puissance de chauffe (Boukhattem, 2008).

IV.3 Pouvoir thermique d'isolation des mortiers de PSE étudié

Les mortiers remplissent plusieurs rôles dans la construction: ils sont utilisés pour le jointement de maçonnerie, les chapes, calages, les scellements et enduit dont son emploi essentiellement esthétique, ainsi, la contribution à l'imperméabilisation d'ensemble et c'est très intéressant de les renforcer par des critères d'isolation thermique. Dans ce sens, la méthode hot disk a été choisie afin d'identifier les propriétés thermiques des mortiers confectionnés et de valoriser l'impact de l'incorporation de billes de PSE dans le mortier normale. À l'aide de la méthode transitoire du Hot disk (CT-mètre), quatre propriétés thermiques sont caractérisées : la conductivité thermique, La capacité thermique volumique (la chaleur massique), la diffusivité thermique et la résistance thermique des mortiers élaborés.

IV.3.1 La conductivité λ

La conductivité thermique (conductibilité thermique), est la grandeur physique caractérisant la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Son unité de mesure est le « lambda » (symbole λ). Ce coefficient indique la quantité de chaleur qui se diffuse par conduction :

- sur un matériau d'une surface de 1 m² et d'une épaisseur de 1 mètre ;
- en 1 seconde ;
- avec une différence de 1 degré entre les deux faces du matériau.

Le lambda est exprimé en W/m.K, c'est-à-dire en Watt par mètre-Kelvin (un Kelvin étant égal à une variation de température de 1 degré Celsius).

La conductivité des composites est liée à la densité, à la distribution et au taux de la porosité ,à la minéralogie de ses constituants et à la conduction climatique, par conséquent, notre objectif est d'analyser indépendamment l'influence de la fraction volumique des billes de polystyrène expansé PSE, du rapport E/C, de la condition de conservation (sec, humide et semi humide) et de la masse volumique sur la capacité d'isolation des mortiers de PSE.

IV.3.1.1 L'impact de teneur en billes de PSE

L'utilisation de granulats légers permet de réaliser un béton ayant une capacité d'isolation thermique améliorée par rapport au béton ordinaire. Cela est confirmé par

les résultats obtenus dans la figure IV.3, la conductivité thermique des mortiers diminue avec l'augmentation de pourcentage des billes de polystyrène expansé.

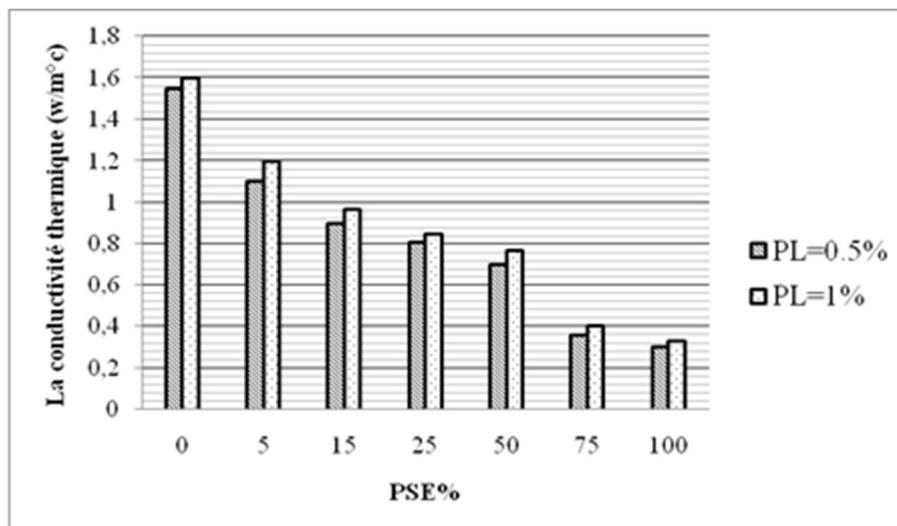


Figure IV. 3 : Évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage PSE

La conductivité thermique (λ) est inversement proportionnelle avec l'augmentation de la teneur en PSE, puisqu'on a enregistré la conductivité thermique du BPSE varie de $1,55 \text{ w. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pour une teneur de 0% en PSE, à $0,3 \text{ w. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour le composite contenant 100% de PSE, donc elle est d'environ 81% moins que celle du mortier de référence de 0.5% en plastifiant. Tandis que pour les composites de 1% en plastifiant, la réduction est d'ordre 79.37%, une légère différence entre les deux familles car les composites de 0.5% en plastifiant contient un taux de porosité supérieur à celles des mélanges de 1% en plastifiant. Rappelons que l'air ayant une conductivité thermique beaucoup plus faible ($0,023 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). Ce constat est attendu, car le polystyrène PSE est un matériau d'isolation très efficace. En effet, l'air stagnant est le meilleur isolant et le polystyrène expansé se compose de 98 % d'air ainsi il absorbe la chaleur sous toutes ses formes. Il est par conséquent un excellent isolant (Carvalho & Motta, 2019). En effet, le polystyrène représente une structure amorphe et sa conductivité thermique de l'ordre de $0,045 \text{ W/m.k}$ selon la fiche technique, donc très faible devant celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à $1,5 \text{ W/m.k}$. D'ailleurs, de nombreuses études antérieures ont montré le pouvoir d'isolation des composites fabriqué à base des billes de polystyrène expansé (8894-1, 2010; Bicer, 2021; Gawale, Mishra, Sambare, Kothari, & Patil, 2016; Kuhail, 2003; Moon & Patel, 2021; Sabaa & Rasiah, 1997; Sayadi, Tapia, Neitzert, & Clifton, 2016).

IV.3.1.2 L'impact de l'état hydrique

Des études antérieures ont révélé que l'état hydrique est un paramètre climatique qui impacte la conductivité des matériaux poreux. D'ailleurs, la conductivité thermique du béton à l'état saturé est supérieure à celle à l'état sec en raison de la conductivité

thermique de l'eau, qui est 25 fois supérieure à celle de l'air (M.Z. Bessenouci, 2014; S. Klarsfeld, 1984). La section suivante examine l'effet de degré de saturation sur la conductivité thermique des mortiers de PSE. Les propriétés thermiques à différents états hydriques [état sec (condition I), état de saturation intermédiaire à 60% HR (condition II) et état saturé par immersion (condition III)] sont mesurées dans une salle au laboratoire de génie civil dont l'humidité relative est d'ordre 60% et à une température de 22°C.

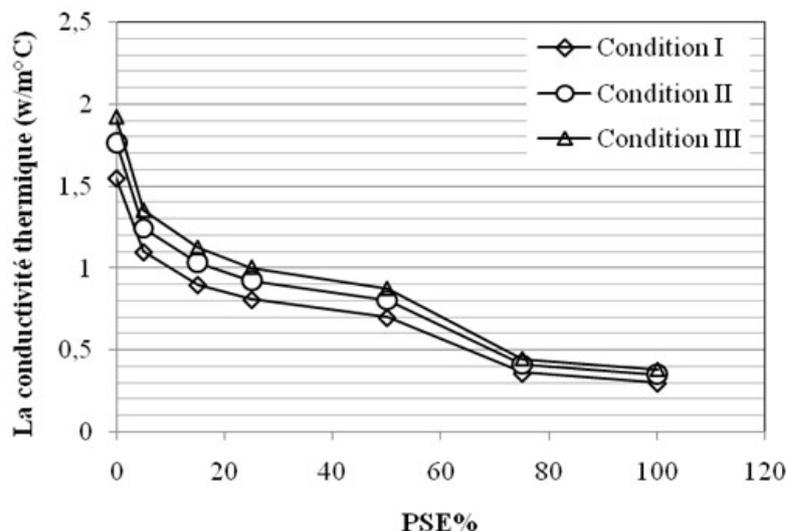


Figure IV. 4: Évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage PSE selon les conditions hydriques.

D'après la figure (IV.4), nous pouvons remarquer que les trois courbes présentent une allure similaire. Elle montre clairement que la conductivité thermique des spécimens de mortier de polystyrène expansé PSE augmente au fur et à mesure que la teneur d'humidité croît. Il faut néanmoins souligner qu'elle est d'autant moins importante que le pourcentage des billes de polystyrène PSE est plus élevé. L'explication est simple, nous connaissons que la conductivité thermique du composite dépend de celles de la partie solide, de la phase liquide et de la phase gazeuse et puisque la conductivité de l'eau ($\lambda = 0.6 \text{ w/m. k}$ à 20 °C) est supérieure à celle de l'air ($\lambda = 0,025 \text{ w/m. k}$ à 20°C), par conséquent les composites secs présentent la conductivité thermique la plus faible. Donc l'accroissement de la conductivité thermique est lié à l'augmentation du taux d'humidité.

IV.3.1.3 L'impact de masse volumique

Les deux paramètres qui définissent les composites légers sont la masse volumique et la conductivité thermique. Plus le matériau est dense et plus sa capacité thermique sera importante. La figure (IV.5) montre la relation de ces paramètres, il ressort que la masse volumique et la conductivité thermique diminuent conjointement avec le taux de substitution de sable par les billes de PSE.

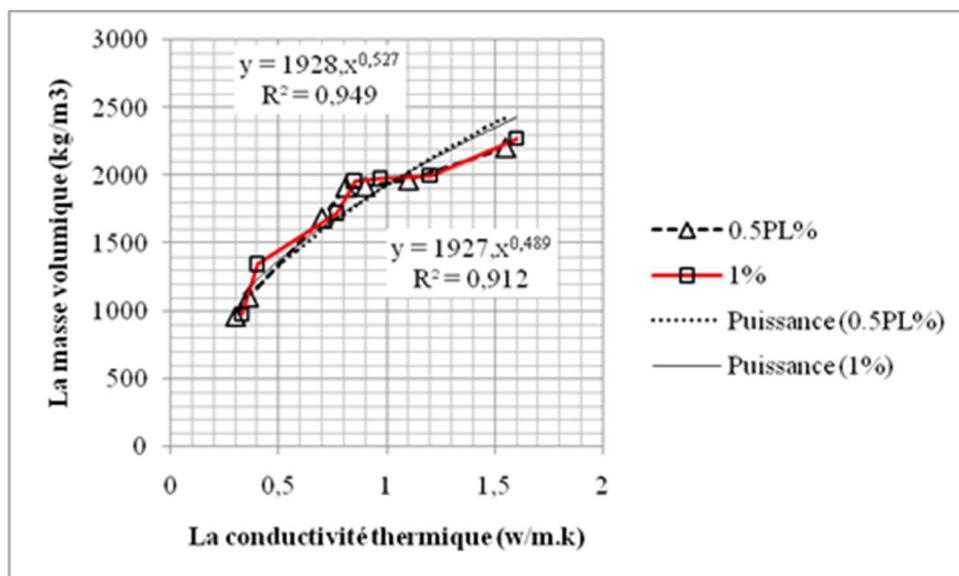


Figure IV.5: Corrélation entre la masse volumique et la conductivité thermique des mortiers de PSE.

Nous pouvons aisément remarquer que les deux types de mortier de PSE (0.5 et 1%) de plastifiant, leur conductivité thermique apparente, s'accroît proportionnellement avec la masse volumique apparente. La formule de corrélation semble suivre une loi puissance en fonction de λ : $\rho = 1927 \times \lambda^{0.489}$ avec un coefficient de corrélation égal à 0.912 pour les mortiers de 1% plastifiant et $\rho = 1928 \times \lambda^{0.527}$ avec un coefficient de corrélation égal à 0.949 pour les mortiers de 0.5%. Ceci a été également illustré par (Ali, Maslehuddin, Shameem, & Barry, 2018) dans ses travaux portant sur la caractérisation de bétons léger résistant isolants à base de polystyrène expansé comme granulat. D'ailleurs, ils ont mentionné que l'ordre de grandeur de la conductivité atteint 0.338 W/m.K.

IV.3.2 La capacité thermique volumique Cv

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la capacité thermique volumique d'un matériau, anciennement appelée chaleur volumique, c'est la capacité d'un matériau à emmagasiner la chaleur rapportée à son volume. Par définition, elle est définie par la chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température d'un mètre cube de matériau. C'est une grandeur intensive égale à la capacité thermique rapportée au volume du corps étudié. Elle s'exprime en joules par mètre cube-kelvin (soit $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), cette grandeur est prise directement du CT-mètre. Un coefficient Cv élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure.

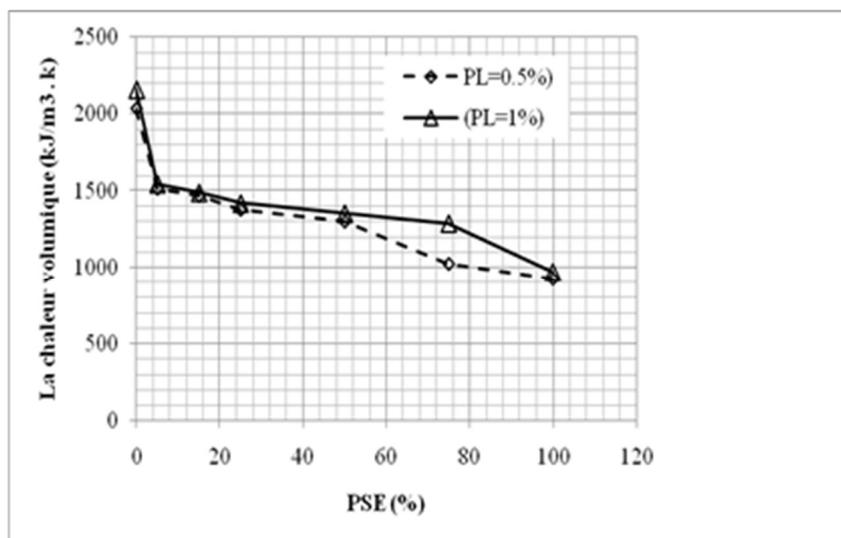


Figure IV.6: La capacité thermique volumique en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.

La Figure (IV.6), montre l'évolution de la chaleur volumique des mortiers de granulats légers en fonction du taux de substitution du sable corrigé par les billes de PSE pour les deux dosages en plastifiant (0.5% et 1%). Pour la série de 0.5% en plastifiant, la chaleur volumique est comprise entre 657 et 2035 J/m³.K tandis que la chaleur massique du mortier dont le dosage en plastifiant est 1% comprise entre 765 et 2160 J/m³.K. La substitution totale du sable corrigé par du bille de PSE conduit à une diminution de la capacité thermique volumique des mortiers légers de 67,31% et 64,58% pour les deux séries de 0,5 et 1% respectivement.

On peut déduire la chaleur massique C_{sp} par l'application de la formule suivante :

$$C_{sp} = C_v / \rho \dots \dots \dots \text{IV.}$$

C'est donc le rapport de la capacité spécifique d'un matériau à sa masse volumique (ρ). La chaleur massique ou chaleur spécifique C_{sp} en J/(kg.K), cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente.

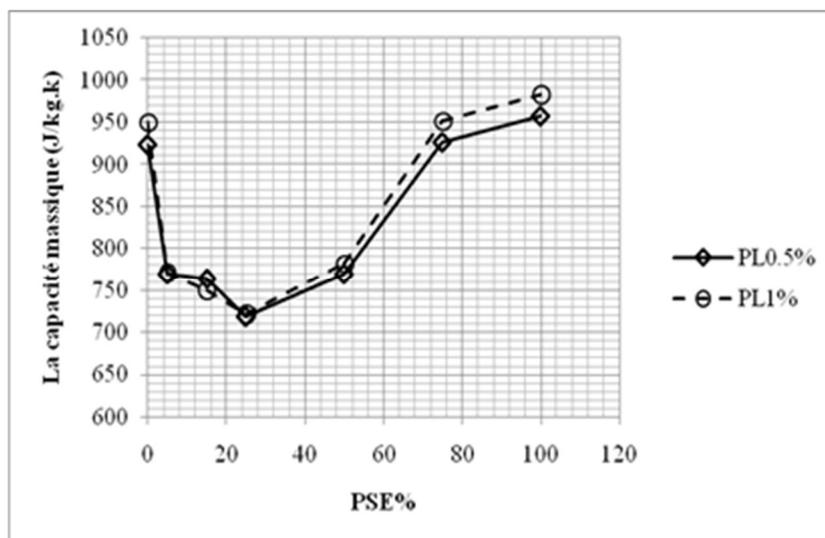


Figure IV.7: la chaleur spécifique en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.

Globalement, la figure. (IV.7) montre que l'allure des deux courbes se déroule en phase décroissante jusqu'à la teneur en bille de PSE 25% puis une phase croissante. Pour la phase décroissante, la chaleur spécifique diminue en fonction de l'augmentation du pourcentage des billes et on note qu'il n'y a pas de différence entre les deux séries, contrairement à la phase croissante où les mortiers légers de 1% en plastifiant présentent les valeurs légèrement plus élevés par rapport à celle des mortiers légers 0.5% en plastifiants.

Toutes les valeurs de la capacité spécifique des composites sont inférieurs à 1000 J/kg.k, et sachant que les chaleurs spécifiques de l'air (1005 J/kg.K), de l'eau (4181,3 J/kg.K) et de polystyrène expansé 1450 J/kg.K, ce qui explique le changement d'état décroissant vers la croissance justifié par l'augmentation du taux de porosité des composites avec la teneur en bille de PSE qui dépasse 25%. Ces résultats confirment les résultats trouvés par Nguyen 2013 et (Cérézo, 2005).

IV.3.3 La diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une grandeur physique qui caractérise la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend non seulement de la valeur de λ mais également de la vitesse de transfert thermique traduite par D (Cérézo, 2005). Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique).

$$D = \lambda / (\rho \times c) \text{ (en m}^2\text{/s)} \dots \dots \dots \text{IV.2}$$

Où :

λ est la conductivité thermique du matériau, en ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) ;

ρ est la masse volumique du matériau, en ($kg \cdot m^{-3}$) ;

c est la capacité thermique massique du matériau, en ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de D est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau. L'évolution de la diffusivité thermique des mortiers en fonction de la teneur volumique du PSE est présentée sur Figure (IV.8). D'abord, on constate que la diffusivité diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution en bille de PSE pour les deux séries.

La diffusivité thermique des mortiers de granulats légers avec 100% de bille de PSE varie entre 0,315 et 0,333 mm^2/s pour 0,5% et 1% en plastifiants. Ces valeurs sont bien inférieures à celle du mortier témoin (100% sable corrigé) qui est de 0,761 et 0,741 mm^2/s .

Les matériaux pour lesquels les échanges sont rapides (i.e. le cuivre) ont des diffusivité de l'ordre de 121 mm^2/s , devant les matériaux où les échanges sont lents ont des valeurs de diffusivité autour de 0,7 mm^2/s comme le béton. Alors, on constate que la substitution du sable corrigé par les perles de PSE rend le composite thermiquement performant.

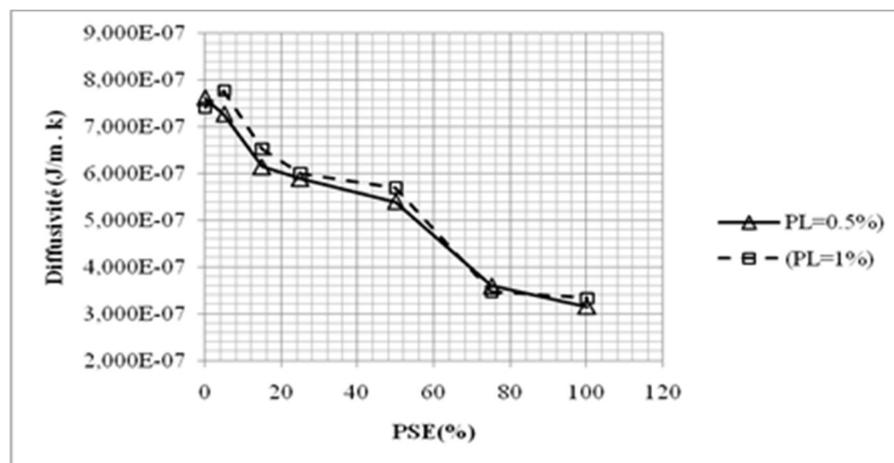


Figure IV.8: La diffusivité en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.

IV.3.4 La résistance thermique

On définit également la résistance thermique d'un matériau R ($m^2 \cdot K/W$) comme le rapport de la différence de température sur la densité de flux thermique en régime stationnaire. Pour un élément d'épaisseur constante, la résistance thermique peut également être exprimée comme le rapport de l'épaisseur du matériau e (m) sur sa conductivité thermique :

$$R=e/\lambda \dots \dots \dots IV.3$$

Plus les valeurs de la résistance thermique sont élevées, plus le matériau est considéré comme isolant.

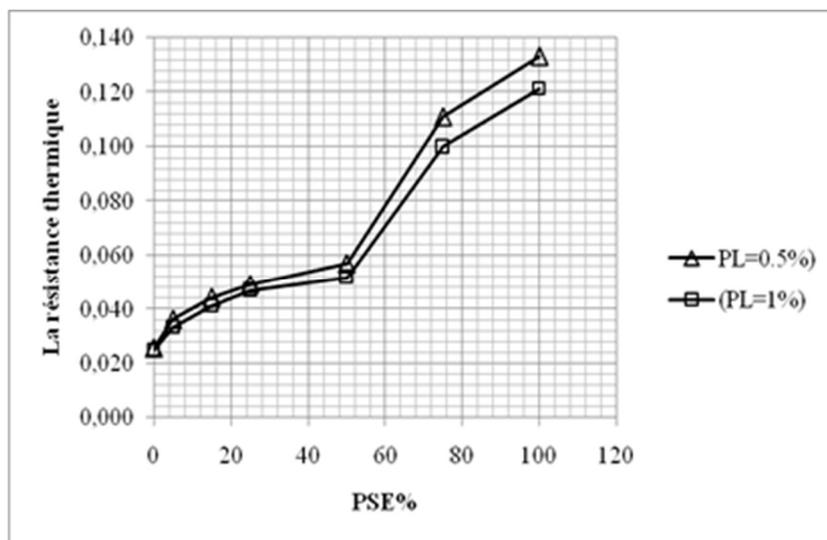


Figure IV.9: La résistance thermique en fonction de la teneur en billes de PSE des mortiers de PSE.

Selon la figure (IV.9), la résistance thermique est variée de 0,026 à 0,133 ($\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$), pour une teneur en PSE allant de 0 à 100% d'une réduction d'ordre 81% pour les composites de 0.5% PL, donc la présence des billes de PSE améliore la résistance thermique des mortiers élaborés. En référence à la norme française NFP 75-101, un produit destiné au secteur de l'habitat est défini comme isolant thermique si sa résistance thermique (R) est au moins égale à $0,50 \text{ m}^2 \text{ °C/W}$. Selon la figure IV.7, la totalité des valeurs des résistances thermiques répondent aux exigences de la norme NFP 75-101.

IV.4 Pouvoir thermique d'isolation des bétons de PSE

La préoccupation fondamentale pendant la formulation du béton de structure est bien les critères de résistance mécanique et c'est très intéressant de la coupler par la tendance à réduire effectivement la consommation énergétique en terme d'isolation thermique. La fabrication des éléments structuraux avec des critères d'isolation permet de réduire les consommations énergétiques d'un bâtiment, notamment la déperdition au niveau du pont thermique. Donc, une solution technique qui permet de traiter les déperditions au niveau des ponts thermiques de façon que l'isolation soit répartie sur toute l'enveloppe de l'édifice.

Dans ce sens, la fabrication d'un béton de PSE ayant en même temps la fonction porteuse et la fonction isolante, permet de construire des éléments structuraux à isolation répartie et de minimiser la déperdition au niveau du pont thermique en raison de la capacité isolante de ces éléments. D'après Nguyen, l'intérêt de l'isolation répartie conduit à imaginer des éléments structuraux des bâtiments au niveau du mur et en même

temps au niveau du plancher. Cela exige un matériau ayant une bonne performance mécanique avec des propriétés d'isolation thermique améliorées (Nguyen, 2013).

Le but de cette section était de déterminer les classes de bétons de PSE qui présentait un intérêt structuro-thermique et mettre en place les bords de l'utilisation du pourcentage des billes de PSE compte tenu de ses faibles caractéristiques mécaniques. La chaleur spécifique C_p , la diffusivité D , et la résistance thermique R ont été déterminées pour différentes formulations de matériau. Rappelons que la substitution a été réalisée seulement dans la fraction sable, alors, nous avons confectionné des échantillons de bétons de PSE à travers le remplacement du sable par les billes de PSE à différents teneurs à savoir 0, 5, 15, 25, 35, 45, 75 et 100%. Nous rapportons des résultats thermiques à différents âge 14 jours, 21 jours et (28 jours). Ainsi, deux états hydriques [état sec et état saturé par immersion].

IV.4.1 Conductivité thermique

L'étude du comportement thermique à travers la grandeur caractéristique λ a été privilégiée. À travers l'examinations de l'influence de la fraction volumique des billes de polystyrène expansé PSE, du rapport E/C, de la condition de conservation (sec, humide et semi humide) et de la masse volumique sur la capacité d'isolation des bétons.

La conductivité des composites est liée à la densité, à la distribution et au taux de la porosité, à la minéralogie de ses constituants et à la conduction climatique, par conséquent, notre objectif est d'analyser indépendamment l'influence de la fraction volumique des billes de polystyrène expansé PSE, du rapport E/C, de la condition de conservation (sec, humide et semi humide) et de la masse volumique sur la capacité d'isolation des mortiers de PSE. Nous présentons dans ce qui suit les résultats de la campagne de mesures menée dans le laboratoire de génie civil sur les bétons témoins et ceux de PSE.

IV.4.1.1 L'impact du dosage en billes de PSE

L'évolution d'influence du taux de remplacement en polystyrène expansé sur la conductivité thermique des bétons fabriqués est donnée par la figure (IV.10). D'abord, c'est clair que l'introduction des billes de PSE dans le béton comme substitution volumique du sable corrigé va réduire la conductivité thermique à cause de la grande différence entre la conductivité du sable et celle du perle de PSE [$\lambda_{\text{sable}} = 0.4$ (w/m.k); $\lambda_{\text{PSE}} = 0.045$ w/m.k].

La conductivité thermique des bétons contenant des billes de PSE est inférieure de 3.68% ; 8.42% ; 11.05% ; 15.76% ; 26.32% ; 46.32 % et 55.79% pour BPSE5 ; BPSE15 ; BPSE25 ; BPSE35 ; BPSE45 et BPSE100 respectivement par rapport au béton témoin. C'est le béton avec 100% en bille de PSE qui exhibe une meilleure performance thermique.

Ainsi, tout comme pour les mortiers légers, l'état hydrique des composites influe sur les valeurs de la conductivité thermique λ à cause de la présence d'eau dans les pores, et dans la zone d'interaction pâte-bille de PSE des composites. D'ailleurs, Félix.A motionne que le caractère hydrophobe du matériau permet de s'assurer que ses propriétés thermiques sont indépendantes de l'humidité ambiante (Félix, 2011) et le polystyrène appartient à cette catégorie de matériau.

De plus, on constate que pour tous les échéanciers (14, 21 et 28 jours), la conductivité thermique du composite diminue en fonction du dosage en billes de PSE, cette diminution s'accroît des lors quand atteint la substitution totale du volume du sable corrigé par les billes de PSE. En conséquence, un gain important de l'ordre de 55,79% où la conductivité arrive à la valeur 0,84(w/m.k).

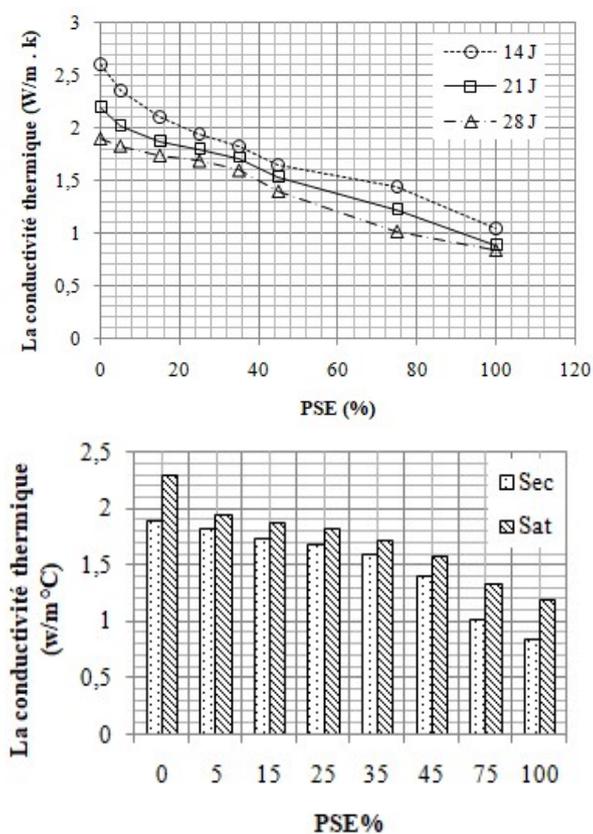


Figure IV.10: La conductivité thermique en fonction de la teneur en billes de PSE des bétons de PSE.

IV.4.1.2 L'impact du rapport E/C

La figure (IV.11) illustre la variation de la conductivité thermique des composites fabriqués en fonction du rapport E/C pour les différentes substitutions volumiques.

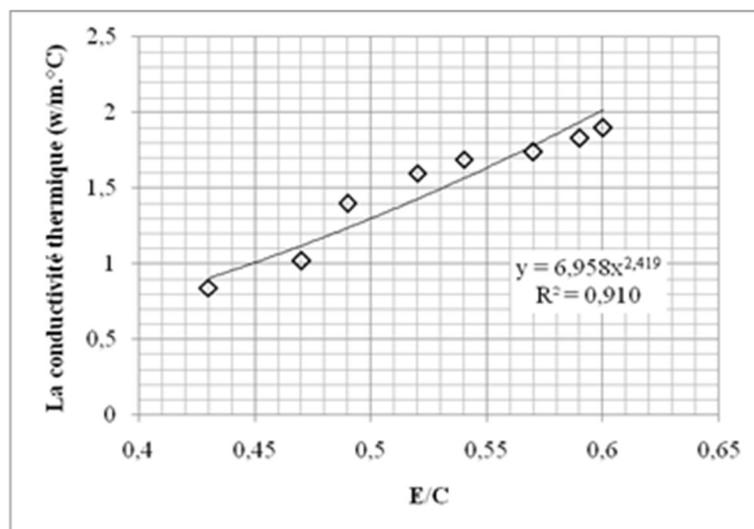


Figure IV.11: La conductivité thermique en fonction du rapport E/C des bétons de PSE.

La Figure (IV-11), montre que la conductivité thermique augmente dans le sens de l'augmentation du rapport E/C, grâce la conductivité thermique de l'eau ($\lambda = 0.6$ w/m.k à 20°C) présente dans la masse des bétons de PSE. La formule de corrélation suit une loi puissance en fonction de $\lambda = 6,958 \times (E/C)^{2,419}$ avec un coefficient de corrélation égal à 0,910. Pour les valeurs élevées du rapport E/C l'eau se trouve sous les trois formes (eau chimiquement liée; eau capillaire et eau adsorbée) (W. Chen, 2011), par conséquent évolution de la valeur de la conductivité thermique.

IV.4.1.3 L'impact de masse volumique

Connaissions que la baisse de densité va de pair avec une amélioration significative du pouvoir isolant d'un composite. Il semble utile d'établir une corrélation entre ces deux propriétés. Les résultats des mesures de conductivité thermique ainsi que les masses volumiques sèches de la série de béton de PSE sont présentés sur les Figure IV.10. Comme escompté, la substitution du sable (0/4) par des billes de PSE (0/4) dans le mélange du béton réduit la masse volumique et donc la conductivité thermique au vu de la nature alvéole des billes de PSE, de leur faible conductivité thermique propre.

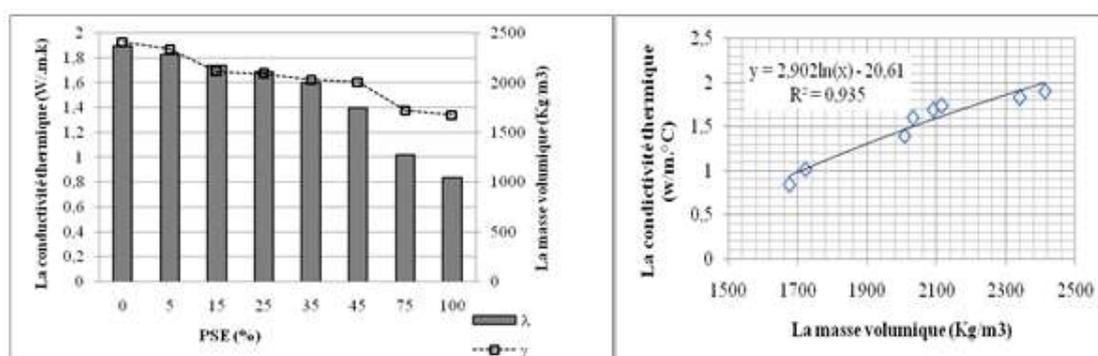


Figure IV.12: La conductivité thermique et la densité des bétons de PSE.

Selon la figure (IV.12), les variations de λ dépendent de la masse volumique sèche avec la relation de corrélation : $\lambda = 2.902 \ln(\gamma) - 20.61$, avec $R= 0.935$. Donc, la conductivité thermique augmente avec la masse volumique du béton comme présenté par plusieurs recherches [(Nguyen, 2013), Bernard, F., Kamali-Bernard, S., & Fu, J., 2017).

IV.4.1.4 L'impact de la porosité des bétons de PSE

La forte porosité influe négativement sur les propriétés mécaniques des bétons, elle diminue les critères de durabilité d'un composite cimentaire. En revanche, au point de vue thermique, elle joue un rôle fondamental dans l'amélioration de la qualité d'isolation d'un solide. La figure (IV.14), montre que la conductivité thermique et la masse volumique sont inversement proportionnelles à la porosité ouverte mesurée. La substitution totale du sable corrigé par les billes de PSE engendre 26.47% en porosité ouverte, en plus la porosité fermée des billes de PSE, sont responsables d'une réduction de 55.79% et 30.53% pour la conductivité et la masse volumique respectivement.

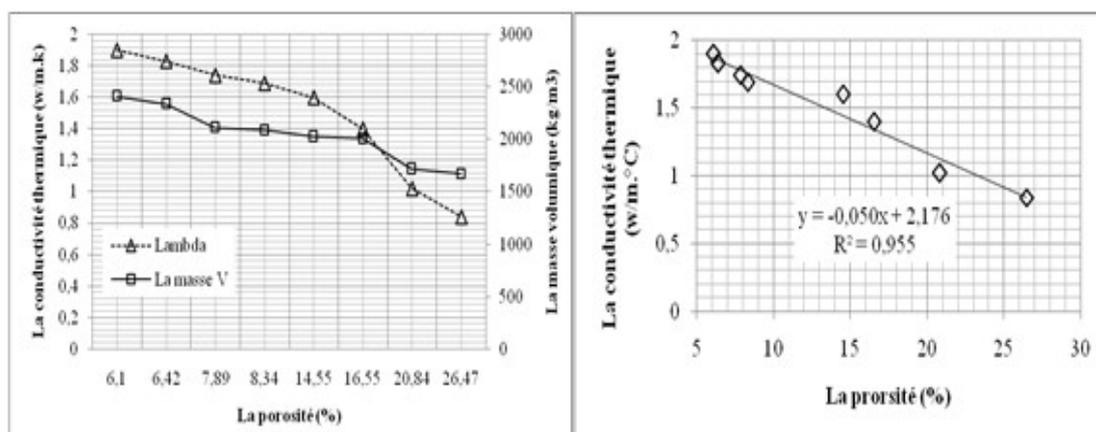


Figure IV.13: La conductivité thermique et la porosité des bétons de PSE.

D'ailleurs les billes de PSE, sont considérées comme des pores fermés (Milled, 2005) plus la porosité ouverte des différents composites ce qui va permettre d'améliorer la capacité d'isolation du BPSE. Par conséquent le transfert par conduction des bétons de PSE est fortement amélioré, ce qui favorise la réalisation du concept d'isolation répartie pour minimiser les ponts thermiques dans les bâtiments.

IV.4.2 La chaleur spécifique

Le Figure (IV.14), illustre les évolutions de la chaleur spécifique en fonction de la teneur en bille de PSE. L'analyse des résultats montre que, la chaleur massique des spécimens à l'état saturé présente les valeurs les plus élevés par rapport à ceux de l'état sec grâce la chaleur spécifique de l'eau ($C_p=4182 \text{ J/kg.K}$ à 293K), ceci concorde avec les résultats mentionnées dans la littérature.

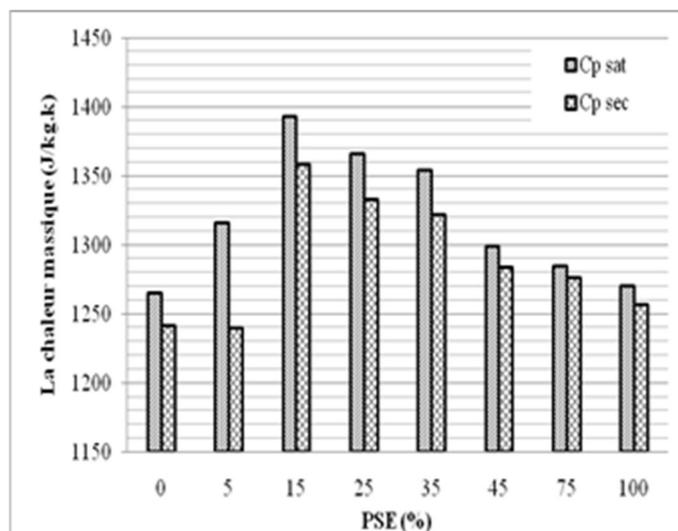


Figure IV.14: La chaleur spécifique en fonction du dosage en bille de PSE.

Ainsi, la chaleur massique la plus élevée a été constaté pour le mélange de 15% en bille de PSE est celle de spécimen de 15% en bille de PSE, sachant que la chaleur spécifique du polystyrène expansé est 1450 j/kg.k devant celle du sable est 835 j/kg.k ce qui explique l'augmentation remarquée pour les teneurs en bille de PSE. À partir du 25% en bille de PSE, la chaleur massique commence à diminuer progressivement jusqu'au remplacement total du sable par les billes, la justification réside dans la diminution du rapport E/C et donc la diminution de quantité d'eau qui présente la valeur la plus élevée de la chaleur massique. Kalifa et al (Bernard, F., Kamali-Bernard, S., & Fu, J., 2017) expliquent que la perte en eau du matériau contribue à la décroissance légère de la chaleur spécifique. Néanmoins, la chaleur spécifique du béton témoin reste la valeur la plus faible.

IV.4.3 La diffusivité thermique

La Figure (IV.15) montre les valeurs de la diffusivité thermique déduites des valeurs de la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique des différents spécimens en BPSE.

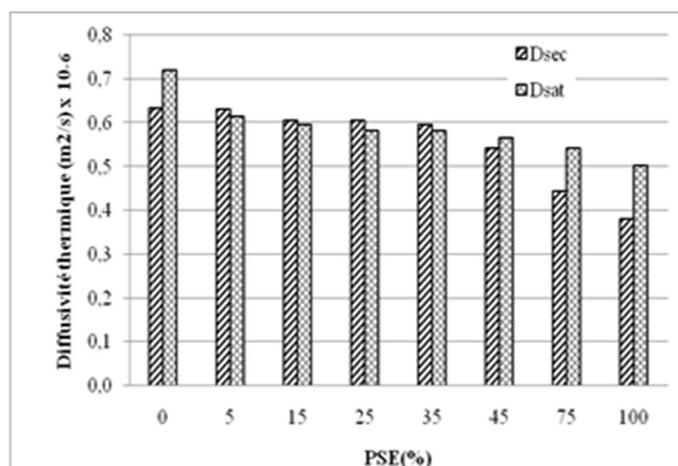


Figure IV.15: La diffusivité thermique la porosité des bétons de PSE.

A l'état sec, la diffusivité thermique des spécimens varie entre 0,635 et 0,381 m²/s, donc elle a été réduite de presque 40%, en fonction de l'augmentation du teneur en bille de PSE. Pour l'état saturé des spécimens, la diffusivité thermique oscille entre 0,720 et 0,503 m²/s avec 30% de décroissance. Selon la figure, les spécimens de (5 ; 15 ; 25 et 35% en PSE) présentent une différence négligeable entre les deux états (sec & saturé), en revanche pour 45 ; 75 et 100% de PSE où elle devient importante. De façon globale, on constate d'un côté la sensibilité de ces bétons vis-à-vis les conditions hygrothermique et d'autre coté la présence des billes de PSE réduit effectivement la diffusivité thermique.

IV.4.4 La résistance thermique

Par définition, la résistance thermique est la capacité du matériau à résister aux variations de chaleur, c'est-à-dire au chaud comme au froid. La Figure IV.14 montre les résultats obtenus par la formule de la résistance thermique à différents teneurs en billes de PSE. Elle explique que la croissance du taux de substitution en bille de PSE contribue à la croissance de la résistance thermique et la présence d'eau influe considérablement ainsi, notamment pour 75 et 100% de remplacement.

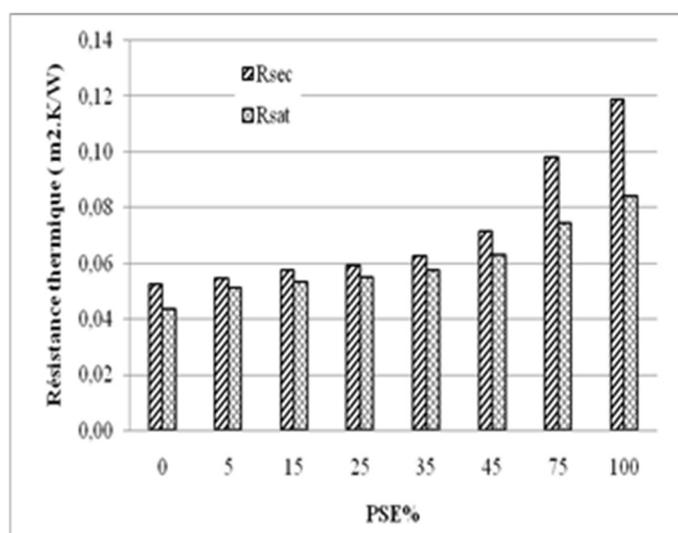


Figure IV.16: La résistance thermique des bétons de PSE.

La résistance thermique du béton de PSE a été accrue de 55,46% pour les mesures à l'état sec et de 48,80% pour l'état saturé par rapport au béton témoin. Par conséquent la substitution du sable par les billes de PSE améliore la qualité de l'isolation thermique du béton.

IV. 5 Conclusion

Ce chapitre démontre l'importance de l'exploitation des billes de PSE dans le domaine thermique, comme substitution du sable corrigé pour les deux composites (mortier et béton). Les résultats montrent que l'exploitation de ces billes dans le secteur du bâtiment, permet de minimiser les déperditions thermiques par conduction à travers la structure du bâtiment. Ceci nous permet de passer de la méthode d'isolation thermique à l'aide de plaque de polystyrène, à celle du mortier de béton de PSE non seulement isolant thermiquement mais aussi léger. Lorsque seule la conductivité sèche des matériaux de construction est considérée indépendamment de l'hygrométrie extérieure. En effet, les valeurs de conductivité sèche sont entre 20 et 40 % inférieures aux conductivités obtenues sous HR = 50 % et HR = 100 %. La conductivité thermique des bétons contenant des billes de PSE est inférieure de 3.68 % ; 8.42% ; 11.05% ; 15.76% ; 26.32% ; 46.32 % et 55.79% pour BPSE5 ; BPSE15 ; BPSE25 ; BPSE35 ; BPSE45 et BPSE100 respectivement par rapport au béton témoin. C'est le béton avec 100% en bille de PSE qui exhibe une meilleure performance thermique.

La substitution totale du sable corrigé par les billes de PSE engendre 26.47% en porosité ouverte, en plus la porosité fermée des billes de PSE, sont responsables d'une réduction de 55.79% et 30.53% pour la conductivité et la masse volumique respectivement, nous pouvons remarquer que les trois courbes présentent une allure similaire. Elle montre clairement que la conductivité thermique des spécimens de mortier de polystyrène expansé PSE augmente au fur et à mesure que la teneur d'humidité croît. Il faut néanmoins souligner qu'elle est d'autant moins importante que le pourcentage des billes de polystyrène PSE est plus élevé. L'explication est simple, nous connaissons que la conductivité thermique du composite dépend de celles de la partie solide, de la phase liquide et de la phase gazeuse et puisque la conductivité de l'eau ($\lambda = 0.6 \text{ w/m. k}$ à 20 °C) est supérieur à celle de l'air ($\lambda = 0,025 \text{ w/m. k}$ à 20°C), par conséquent les composites secs présentent la conductivité thermique la plus faible. Donc l'accroissement de la conductivité thermique est lié à l'augmentation du taux d'humidité. Les principaux paramètres qui caractérisent les composites légers sont la masse volumique et la conductibilité thermique, plus le matériau est dense et plus sa capacité thermique sera importante. La relation de ces paramètres fait ressortir que la masse volumique et la conductivité thermique diminuent conjointement avec le taux de substitution de sable corrigé par les billes de PSE.

Chapitre. V
Résultats et Discussions
Caractérisation Acoustique

Chapitre V: Résultats et Discussions Caractérisation Acoustique

V.1 Introduction

Dans le domaine de la construction, l'isolation consiste à protéger contre la chaleur et le bruit et cela grâce au choix adéquat des matériaux. Après ce que nous avons vu au chapitre VI qui était consacré à l'étude des propriétés thermiques des composites légers. Ce chapitre, se concentre sur les caractéristiques phoniques et comment va influencer la présence des billes de polystyrène expansé pendant la propagation du son.

Par définition, les ondes sonores se déplacent dans l'air jusqu'à ce qu'elles rencontrent une barrière qui les reflète ou les absorbe. Les caractéristiques du matériau, notamment les caractéristiques physiques (porosité, densité), déterminent la façon dont il va interagir avec les ondes acoustiques. Le polystyrène expansé (PSE), est utilisé dans la construction comme une bonne barrière thermique grâce sa structure alvéolaire, mais constitue en soi une mauvaise barrière acoustique. Bien qu'il ait des caractéristiques d'absorption du son, il n'en a pas la masse, et ne sera donc pas un panneau acoustique efficace. En revanche, il est efficace lorsqu'il est utilisé avec d'autres matériaux pour construire une barrière acoustique. Il possède d'autres qualités qui entrent en jeu lorsqu'il est utilisé dans les composites cimentaire et qui diminuent efficacement la transmission du son.

Le chapitre est commencé par différents rappels théoriques sur l'acoustique et ses principaux paramètres sont définis. Puis, les résultats expérimentaux sont présentés. Une analyse est effectuée sur le comportement en absorption des ondes sonores dans les composites de PSE. L'absorption d'une onde sonore est la façon dont un matériau contrôle le son en absorbant les ondes sonores et en convertissant une partie de l'énergie en chaleur, de sorte que moins d'ondes passent à travers, réduisant efficacement le bruit (C.Rougeron, 1979). Les propriétés physiques d'un matériau (tels que la densité, la porosité, la perméabilité, l'épaisseur à traverser, l'état de surface, etc..) influent sur ses caractéristiques acoustiques (l'absorption acoustique (α), l'impédance acoustique (Z) et la réflexion (R)). Dans le but de caractériser nos échantillons des deux configurations (mortier/béton) par ses paramètres acoustiques (α , Z ...) nous avons effectué des mesures à l'aide d'un appareil d'auscultation sonique. Après la détermination de la vitesse de propagation des ondes élastiques, on déduit les autres paramètres acoustiques (α , Z , R et T) à travers l'application des définitions théoriques.

V.2. Rappels sur les ondes acoustiques

V.2.1. Définitions

Une onde sonore, ou onde acoustique, est une perturbation mécanique produisant sur son passage une variation de propriétés physiques locales (compression-dilatation du milieu) figure V.1. Le son est donc une onde mécanique lié à l'ébranlement d'un matériel : solide, liquide ou gazeux. Cet ébranlement se traduit par un mouvement oscillatoire qui se transmet de proche en proche dans un milieu élastique. Ces ondes élastiques correspondent à certains types de mouvements des molécules du milieu à travers lequel ils se propagent, ces

molécules restant en moyenne dans leur état d'équilibre. Par la suite, dans un mouvement ondulatoire, ce n'est pas la matière qui se propage, mais l'état de mouvement de la matière.

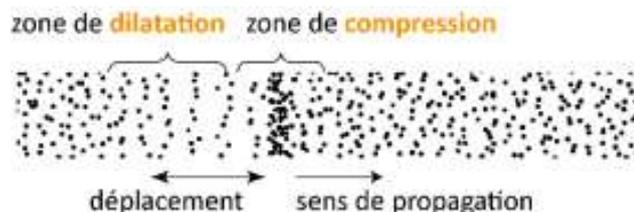


Figure V.1 : Modèle de l'onde acoustique dans un gaz à l'échelle microscopique

Toute vibration d'un corps dans ce milieu entraîne des variations locales de pression qui se propagent dans l'air. Ces perturbations captées par l'oreille, donnent la sensation de bruit. Un son pur correspond à une variation sinusoïdale de la pression acoustique autour d'une position d'équilibre. Le champ de pression présente une dépendance spatiale et temporelle (cerezco, 2005).

$$P(t, x) = P_{\max} \cdot \sin(\omega_f t - kx) \dots \dots \dots (V.1)$$

avec P_{\max} : amplitude maximale de l'onde

ω_f : pulsation de l'onde

k: nombre d'onde

Par ailleurs, il existe une relation entre la pression acoustique $P(x,t)$, et la vitesse de vibration du milieu $v(x,t)$, et sont reliées par la relation :

$$p(x,t) = \rho c v(x,t) \dots \dots \dots (V.2)$$

Les ondes acoustiques sont des ondes élastiques que l'on classe selon leur fréquence F en :

- infra-sons $F < 20$ Hz
- sons audibles $20 \text{ Hz} < F < 20 \text{ kHz}$
- ultra-sons $20 \text{ kHz} < F < 200 \text{ MHz}$
- hyper-sons $F > 200 \text{ MHz}$

V.2.2 Paramètres de l'onde ultrasonore

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour caractériser cette onde ultrasonore.

V.2.2.1 Célérité de l'onde acoustique (V)

La célérité de l'onde acoustique est la vitesse de propagation de la variation de pression dans le milieu. L'essai aux ultrasons permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

$$V(m/s) = \frac{L}{\Delta t} \dots \dots \dots (V.2)$$

Où L : la distance de parcours de l'onde ;

Δt : le temps de parcours de l'onde dans l'échantillon.

V.2.2.2 Impédance acoustique (Z)

L'impédance acoustique est une grandeur caractéristique de la nature du milieu dans lequel se propage l'onde acoustique. Dans le cas des ondes planes, plus l'impédance acoustique, qui est définie par le produit de la masse volumique ρ (Kg/m³) par la célérité du son de propagation V (m/s), est grande, plus l'onde sonore s'affaiblit durant son parcours (Rougeron, 1979).

$$Z = \rho.c \dots\dots\dots(V.3)$$

Lorsqu'une onde sonore rencontre une paroi séparant deux milieux non absorbants, son énergie incidente est divisée en trois parties:

- Une partie de l'énergie sonore se réfléchit (onde réfléchi) ;
- Une partie pénètre dans le second milieu (onde transmise) ;
- Une partie de l'énergie se perd dans la paroi.

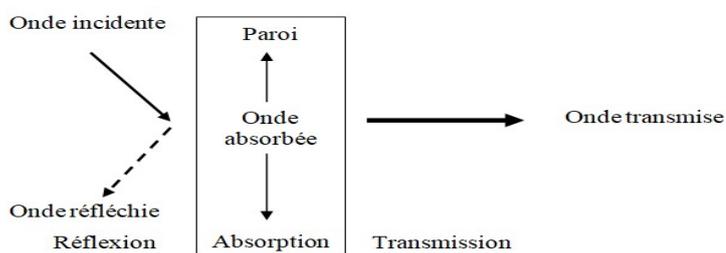


Figure V.2 : Ondes incidentes, réfléchies et transmises pour un matériau soumis à une onde acoustique.

Le bilan énergétique correspondant à cette situation est: $E_i = E_r + E_a + E_t \dots\dots\dots(V.3)$

Notons Z_1 et Z_2 l'impédance acoustique des milieux 1 et 2 respectivement. On définit les coefficients de réflexion R et de transmission T des ondes par :

$$R = \frac{\text{Intensité réfléchi}}{\text{Intensité incidente}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots(V.4)$$

$$T = \frac{\text{Intensité transmise}}{\text{Intensité incidente}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots(V.5)$$

V.2.2.3 Le coefficient d'absorption acoustique (α)

L'absorption du son est la façon dont un matériau contrôle le son en absorbant les ondes sonores et en convertissant une partie de l'énergie en chaleur, de sorte que moins d'ondes passent à travers, réduisant efficacement le bruit. Le coefficient d'absorption acoustique (α) indique la capacité d'un matériau à absorber l'énergie d'une onde sonore. Il est égal à :

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \dots\dots\dots(V.6)$$

Tel que :

E_a : énergie absorbée
 E_i : énergie incidente

$$R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \dots\dots\dots(V.7)$$

La notion d'impédance est intéressante pour le calcul du coefficient d'absorption. Dans le cas des ondes ultrasonores (onde plane) et en incidence normale, on peut écrire :

$$\alpha = 1 - R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \dots\dots\dots(V.8)$$

Dont, Z_1 : l'impédance acoustique de l'air ;
 Z_2 : l'impédance acoustique du matériau.

En fonction de la variation de la fréquence sonore, le coefficient d'absorption (α) se situe entre 0 et 1 :

- Coefficient d'absorption = 0 : le matériau n'absorbe aucun bruit, le bruit est donc totalement réfléchi.
- Coefficient d'absorption = 1 : tout le bruit est absorbé par le matériau. Ainsi, un matériau présentant un coefficient d'absorption $\alpha = 0.8$ signifie qu'il absorbe 80% du bruit entrant.

Dans le but d'améliorer le confort acoustique dans les immeubles, les techniciens choisissent les matériaux caractérisés par leurs coefficients d'absorption alfa proche de 1. La norme internationale ISO 11654 (ISO 11654,1997) classe les performances d'absorption acoustique des matériaux en cinq classes de A à E. Ces classes basées sur les valeurs du coefficient d'absorption acoustique (α), elles offrent une indication générale sur les caractéristiques des matériaux (tableau V.1).

Tableau V.1 : Classes d'absorption acoustique, ISO 11654. (1997).

coefficient d'absorption acoustique (α)	Classes d'absorption acoustique
0.90 à 1.00	A
0.80 à 0.85	B
0.60 à 0.75	C
0.30 à 0.55	D
0.15 à 0.25	E
0.00 à 0.1	Non classé

V.3 les propriétés acoustiques des composites de PSE

V.3. 1 Le coefficient d'absorption acoustique (α)

V.3.1.1 L'influence du dosage en billes de PSE

Dans le cadre de cette étude, les coefficients d'absorptions sont déterminés par l'application de la formule (V.8), après avoir effectué les mesures de la vitesse du son à travers les différents spécimens testés. Cela en employant des méthodes de contrôle non

destructif établies sur la base de la propagation des ondes soniques, la procédure est expliquée dans le chapitre II.

L'influence du taux de la substitution du sable corrigé par les billes de polystyrène expansé PSE est présentée dans la figure (V.3). L'analyse des valeurs montre que le coefficient d'absorption (α) augmente en fonction de la croissance de la teneur en billes de PSE pour les deux familles (Mortier/Béton), toutefois les spécimens de mortier de PSE montre des valeurs plus élevées que celles du béton de PSE.

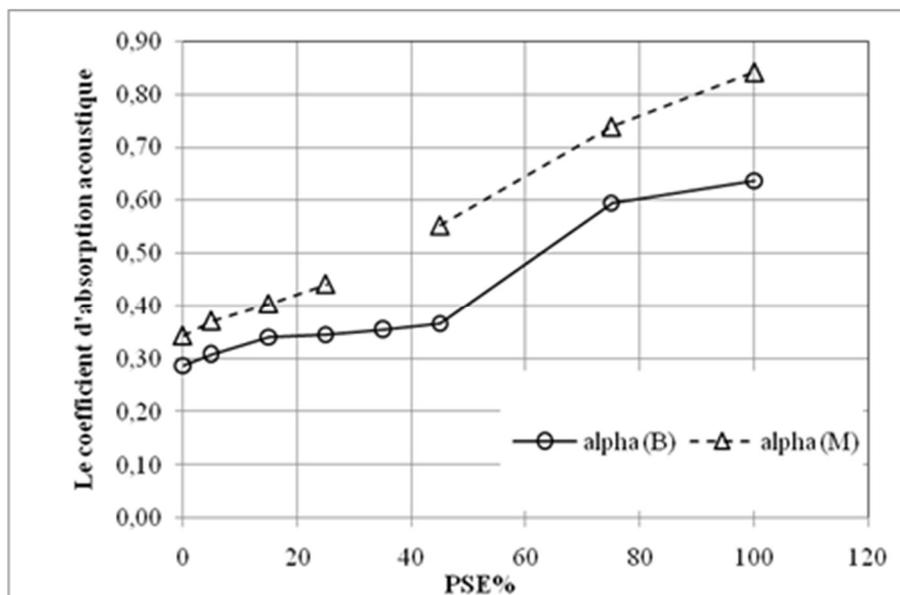


Figure V.3 : Le coefficient d'absorption acoustique en fonction du pourcentage des billes en PSE des deux familles (mortier&béton)

Pour les spécimens de mortier, la majorité des valeurs des coefficients d'absorption acoustique sont comprises entre 0,34 et 0,84. Les quatre premiers teneurs en PSE (0 ; 5 ; 15 et 25) ont des valeurs de (α) inférieure à 0,5 donc on peut les considérer comme des matériaux non absorbant. En revanche, pour les teneurs 50, 75 et 100% en PSE dont le coefficient d'absorption (α) égale à 0,55, 0,74 et 0,84 respectivement, ce sont des matériaux à caractère absorbant car ils ont dépassé 0,5. En utilisant le tableau (V.1) afin de classer ces composites, trois classes sont apparus. Concernant les teneurs en PSE (0; 5; 15; 25 et 50%), ils appartiennent tous à la classe D. Tandis que les spécimens de dosage 75% en PSE se trouvent dans la classe C et la classe B pour la meilleure performance d'absorption acoustique constaté c'est celle où on remplace totalement le sable corrigé par les billes de PSE. L'utilisation du composite (de 100% en bille de PSE dont $\alpha= 0,84$) pourrait améliorer l'atténuation sonore pour des applications nécessitant un contrôle du bruit. Il est à noter que les matériaux commerciaux destinés à l'isolement acoustique sont caractérisés par des coefficients max aux alentours de 1.

Concernant les éprouvettes de béton, le même constat trouvé pour celles des mortiers de PSE, la capacité d'absorption augmente dans le sens de l'augmentation des teneurs en billes de PSE. L'augmentation est de l'ordre de 6,9% ; 17,24% ; 17,24% ; 20,69% ; 27,59% ; 33,33% ; et 120,7% pour 5% ; 15% ; 25% ; 35% ; 45% ; 75% et 100% respectivement. En effet, nous avons constaté des faibles valeurs pour les échantillons ayant une teneur moindre

à 35% de PSE, elles possèdent des valeurs de (α) inférieure à 0,5. En outre, suivant le tableau (V.1) qui classe les matériaux suivant le coefficient d'absorption acoustique, nous avons trouvé que les spécimens, ayant des teneurs en PSE inférieurs de 45%, pourraient avoir la classe D. Toutefois, les spécimens ayant les pourcentages 75% et 100% domineraient dans la classe C. Ces résultats qui renseignent sur l'amélioration acoustique de ces bétons de PSE, sont expliquées par l'inhomogénéité du comportement des composantes envers les ondes acoustiques émises par l'ultrason.

Par définition, une onde sonore est une vibration mécanique qui se propage dans un milieu matériel, comme fluide (l'air ou un liquide) ou solide. L'absorption acoustique est due aux frottements visqueux existant entre le fluide et le squelette solide, car ils ont des vitesses de déplacements différentes (Véronique, 2005). Dans l'air, la vitesse de propagation du son est 340 m.s^{-1} dans les conditions usuelles de température et de pression. Dans l'eau, elle est de l'ordre de 1500 m.s^{-1} devant celle du béton plein qui se rapproche et parfois dépasse 3000 m.s^{-1} . Nos éprouvettes sont constituées à la fois d'une phase solide et de vides appelés pores. Ces pores (connectés ou occlus) sont saturés par le fluide (l'air, liquide), donc influant de manière différenciée sur le comportement acoustique. Les billes de PSE sont considérées comme des pores fermés (Milled, 2005), leur performance acoustique reste modérée selon les fabricants puisque le réseau poreux non connecté empêche l'onde acoustique de pénétrer et donc elle va réfléchir vers la zone de transition (solide-fluide) où se trouve le réseau poreux connecté qui favorise l'amortissement de l'onde acoustique. D'ailleurs, selon Véronique, l'absorption acoustique est favorisée lorsque le matériau possède une porosité ouverte (Véronique, 2005). Par conséquent, l'augmentation du coefficient d'absorption acoustique de nos éprouvettes est grâce à la présence d'un réseau poreux connecté où l'onde dispose d'un large espace pour s'amortir facilement.

En effet, E. G. de Moraes et al (2019), ont développé une mousses de céramique contenant 70 % de bille en PSE, ils ont trouvé un coefficient d'absorption proche de 0.9, ce qui indique que ces composites à base des billes de PSE prometteurs comme matériau d'atténuation acoustique dans le contrôle du bruit. Ainsi, You et al (2014), ont mentionné que les composites élastiques sont efficaces pour réduire les sons de moyenne à haute fréquence tels que les sons d'impact légers.

V.3.1. 2 L'influence du Porosité

Nous nous connaissons que les matériaux poreux sont constitués d'une phase fluide et d'une autre solide. Les bétons légers sont en général des matériaux remplis de petites bulles d'air qu'on l'appelle la porosité. Ces pores peuvent être connectés ou occlus, influant de manière différenciée sur le comportement acoustique (Véronique, 2005). La porosité connectée peut constituer des réseaux privilégiés pour les ondes sonores.

Les composites légers, servent à la correction acoustique par l'absorption d'une grande part de l'énergie de l'onde sonore et la transforme à une chaleur par effet de porosité (C. Rougeron, 1979). Il est donc capital d'être en mesure de corrélérer la porosité au coefficient d'absorption acoustique de nos composites. La figure (V.4) illustre la corrélation du

coefficient d'absorption acoustique en fonction de la porosité des différentes compositions en BPSE, elle indique que le coefficient d'absorption acoustique (α) du composite augmente avec la porosité pour toutes les compositions étudiées. Pour les deux familles (mortier/béton) de PSE, il semble que la formule proposée de type puissance semble adéquate et donne une bonne prévision du coefficient (α) avec un coefficient de corrélation $R= 0.839$ pour la première famille (mortier) et $R= 0.912$ pour la deuxième famille (béton).

On peut constater d'une manière générale que l'augmentation de la porosité des deux familles (mortier et béton) coïncide avec la croissance du coefficient d'absorption acoustique. Ce constat est tout à fait logique, car d'un côté l'onde acoustique pénètre facilement dans le matériau poreux et d'autre côté la connectivité de ces pores crée une large espace pour que les ondes s'amortissent. En effet, les matériaux aux pores fermés avaient généralement de moins bonnes propriétés acoustiques que les matériaux aux pores ouverts (Véronique, 2005). Puisque les billes de polystyrène expansé (PSE) sont caractérisées par une structure cellulaire fermée (Milled et al, Short et al, Sussman et al) et par une légèreté importante. Ils vont exciter par les ondes sonores incidentes et se mettent à vibrer et se déforment, donc ils ne contribuent pas à l'augmentation du coefficient d'absorption acoustique. Toutefois, le véritable émetteur qui joue le rôle d'un amortisseur des ondes acoustiques, est la grande largeur de la zone d'interaction bille-pâte (chapitre III).

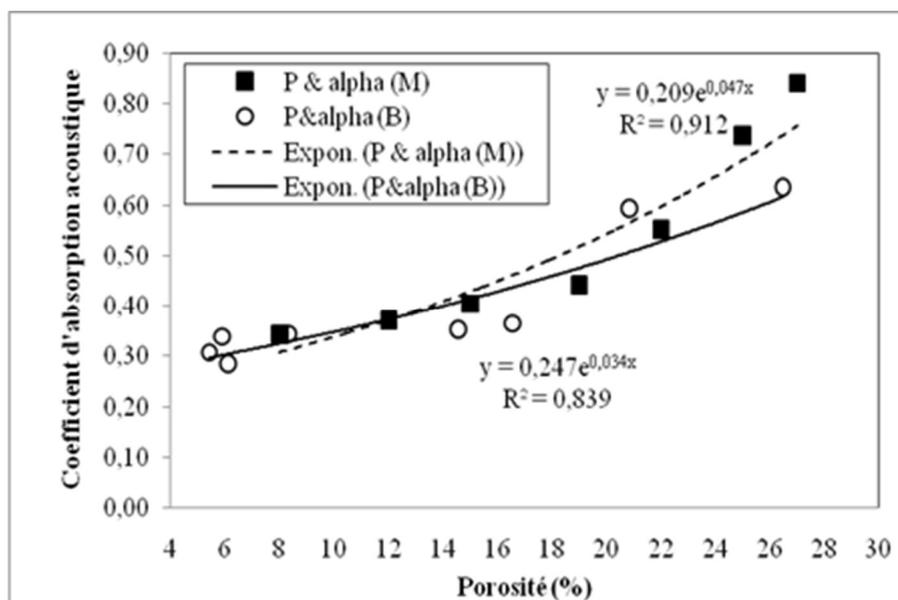


Figure V.4 : Coefficient d'absorption en fonction de porosité des composites

Dans le livre de l'acoustique environnementale et architecturale, Maekawa et al., ont déclaré que lorsque les ondes sonores frappent un matériau poreux contenant des capillaires ou des pores continus tels que trouvés dans la laine de verre, la laine de roche et la forme poreuse, ils se propagent dans les interstices dans lesquels une partie de l'énergie sonore est dissipée par des pertes dues aux frottements visqueux à l'intérieur des pores, et par vibration de petites fibres du matériau. Ainsi, ils ont affirmé que l'absorption acoustique est due principalement à des pertes visqueuses, lorsque l'air se déplace à l'intérieur des pores (Maekawa, Rindel, Lord, 2010).

V.3.3 l'influence de la masse volumique

L'isolation acoustique vise à limiter la transmission du son à travers un matériau. Généralement, elle est assurée par des matériaux lourds et épais, selon la loi de masse, car leur masse limite le mouvement (vibration) provoqué par les ondes sonores. Donc plus le matériau est lourd et épais, l'affaiblissement acoustique sera meilleur. Cependant, les bétons légers ne fonctionnent pas par effet de masse. La figure V.5 montre les fonctions de corrélation entre le coefficient d'absorption acoustique et la densité de chaque famille (mortier/béton). Globalement, la diminution de la masse volumique est accompagnée par une augmentation du coefficient d'absorption acoustique pour les deux familles. La majorité des valeurs de la densité pour les mortiers légers sont comprises entre 0.962 et 2.204 avec une diminution d'ordre 56.35%, contre l'augmentation de l'ordre de 59.14% pour les valeurs du coefficient d'absorption acoustique qui sont comprises entre 0.34 et 0.84. On peut établir la corrélation entre la densité et le coefficient d'absorption acoustique (α) par la formule proposée de type linéaire : $\alpha = -0.408 \times \rho + 1.213$ avec $R = 0.977$.

Concernant les bétons de PSE, les valeurs de la densité sont comprises entre 1.676 et 2.412 alors la diminution est d'ordre 30.53%, avec l'augmentation de l'ordre de 54.98% pour les valeurs du coefficient d'absorption acoustique qui sont comprises entre 0.29 et 0.64. La formule de corrélation proposée est : $\alpha = -0.475 \times \rho + 1.377$ avec $R = 0.852$.

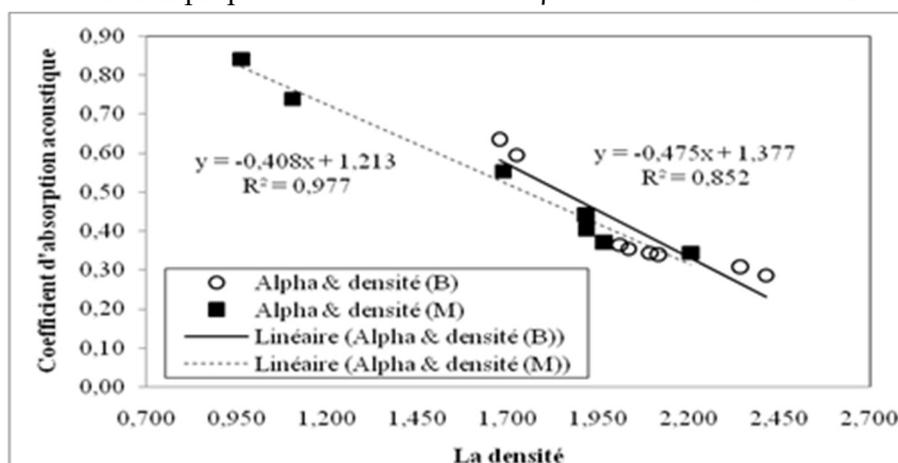


Figure V.5 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction de la masse volumique des composites

En effet, on peut dire que les spécimens de mortier à base de PSE dont ses densités inférieures à 1.6 posséderont les coefficients d'absorptions les plus élevés, ils dépassent 0.5, c'est tout à fait logique, comme ces composites auront une faible densité grâce à la légèreté du bille de PSE. Ces billes auront donc tendance à vibrer sous l'effet des ondes incidentes, l'air situé dans la zone d'interaction (bille/pâte) joue le rôle de piston et absorbe l'énergie par vibrations de flexions (C. Rougeron, (1979). Alors, ces composites trouvent des applications dans les systèmes antibruit. En revanche, les éprouvettes dont la densité dépasse à 1.6 où le coefficient d'absorption est inférieur à 0.5. Dans ce cas, la transmission du son peut être limitée par effet de masse.

À propos des spécimens en béton de PSE, le son se propage moins bien car ils sont les plus lourds en comparant à ceux en mortier de PSE. Ceci est dû à la présence du granulat le plus lourd (gravier) d'une part, d'autre part la faible teneur en bille de PSE qui ne remplace que la part du sable. Néanmoins, l'utilisation du béton de PSE peut diminuer l'effet des ponts acoustiques à travers leur utilisation comme des éléments structuraux.

V.3.2 L'impédance acoustique

La notion d'impédance acoustique permet d'étudier et d'estimer les quantités d'énergie acoustique transmises et réfléchies. L'identification de l'impédance est basée sur des mesures de vitesse acoustique obtenues par l'auscultation ultrasonore effectuée sur des éprouvettes des deux familles (mortier/béton). La figure V.6 illustre l'évolution de l'impédance acoustique des composites en fonction du taux de substitution du bille en PSE. Nous avons constaté que les composites avec 0% en PSE présente les valeurs les plus élevées ($Z_m = 7822.723$ et $Z_B = 9765.175 \text{ kg/m}^2.\text{s}$), contrairement aux celles de 100% en PSE dont les valeurs sont les plus faibles ($Z_m = 1819.693$ et $Z_B = 3274.317 \text{ kg/m}^2.\text{s}$). Donc, l'impédance acoustique augmente avec la diminution de la substitution du sable corrigé par les billes de PSE.

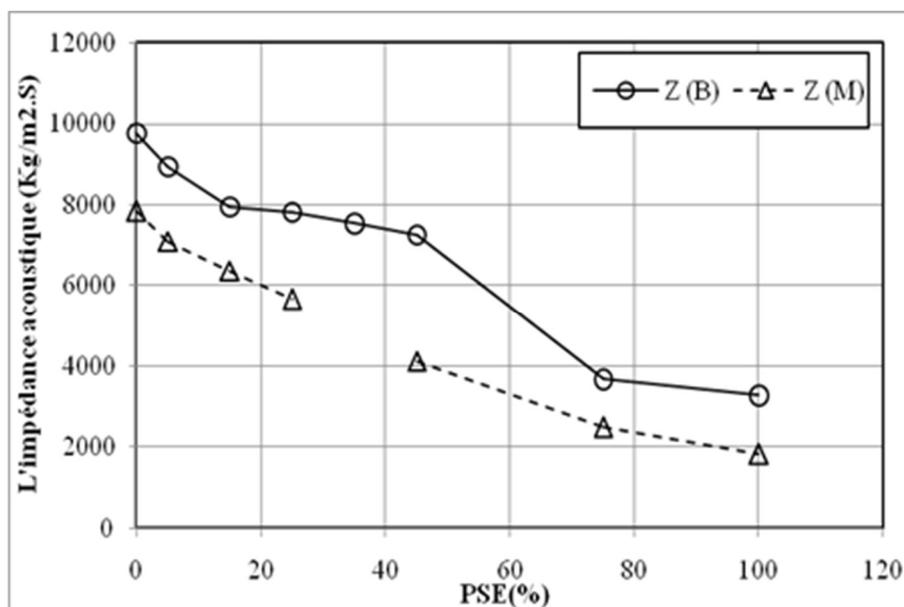


Figure V.6 : L'impédance acoustique en fonction du pourcentage des billes en PSE

V.3.3 Les coefficients de réflexion & transmission

La déduction des coefficients de réflexion et de transmission de spécimens est indispensable afin d'évaluer leurs performances et l'emploi possible de ces matériaux comme réflecteur, absorbeur ou barrière acoustique. La figure (V.7) montre l'évolution des coefficients de transmission et de réflexion en fonction de la teneur en bille de polystyrène expansé.

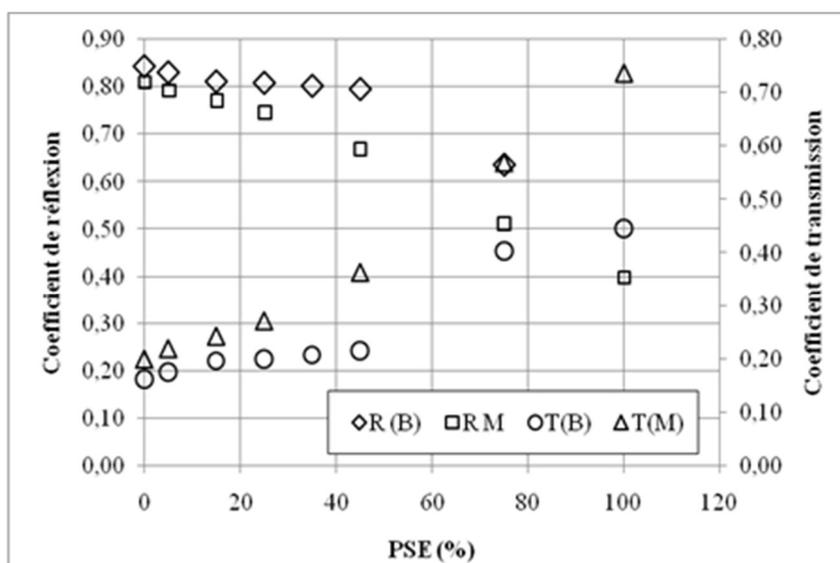


Figure V.7: Les coefficients de réflexion et de transmission en fonction du pourcentage des billes en PSE

Pour le coefficient de réflexion des deux familles (mortier/béton), la valeur la plus robuste a été enregistrée à 0% de remplacement en bille de PSE avec les valeurs : $R_m = 0.81$ et $R_B = 0.84$ pour le mortier témoin et le béton témoin respectivement. À ces valeurs de coefficient de réflexion, l'absorption est presque nulle grâce à la réflexion qui dépasse 80%. Alors, l'emploi de ces matériaux comme réflecteur est possible. D'autre part, à 100% de remplacement en bille de PSE dont la valeur la plus faible a été enregistrée avec les valeurs : $R_m = 0.40$ et $R_B = 0.60$ pour le mortier MPSE100 et le béton BPSE100 respectivement. Les spécimens avec 100% de remplacement, réfléchit 40% et 60% de la puissance de l'onde incidente dans le mortier et le béton respectivement, donc peuvent rendre le coefficient d'absorption sonore maximum.

Concernant le coefficient de transmission, c'est logique que les résultats soient opposés. Selon la figure V.7, l'allure des courbes de transmission et de réflexion sont presque symétrique. Les coefficients enregistrés sont compris entre [0.2 , 0.74] et entre [0.16 , 0.45] pour les échantillons de mortier et béton respectivement. On peut conclure que tout l'échantillon de brique est bon pour absorber le son à basse fréquence. Ainsi, nous avons constaté que l'écart entre les valeurs, soit celle de réflexion ou celle de transmission, évolué lorsque la teneur en bille de PSE est élevée.

V.3.4 Relation entre le coefficient (α) et la vitesse du son

Tout comme le coefficient d'absorption acoustique, la vitesse de l'onde sonore, à travers un milieu, est influée par ses propriétés physiques (tels que la densité, la porosité, la perméabilité, etc..). La figure (V.8) montre côte à côte l'allure de l'évolution de la vitesse du son et le coefficient d'absorption acoustique en fonction de la teneur en bille de PSE.

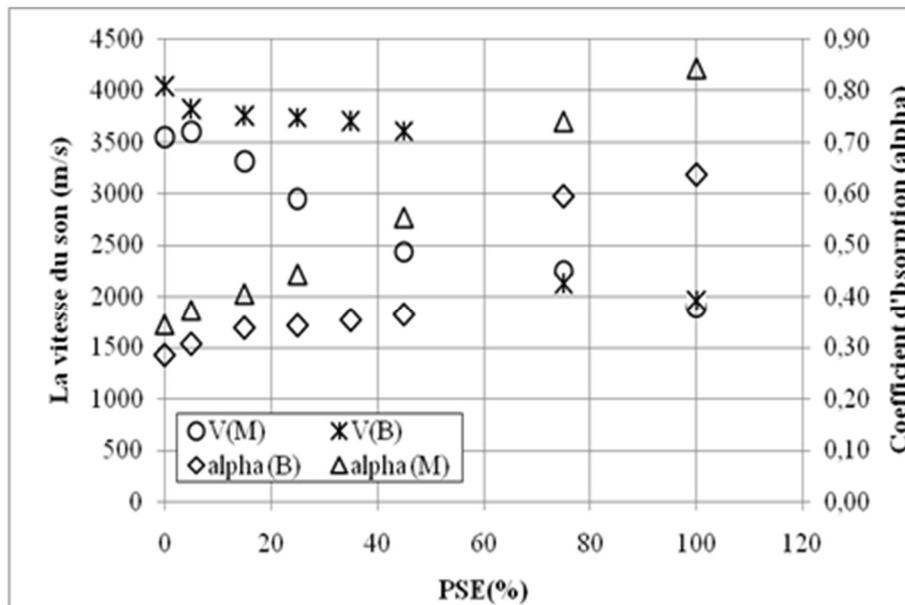


Figure V.8 : Evolution en fonction de teneur en PSE de la vitesse du son et le coefficient d'absorption acoustique

L'augmentation du taux de remplacement en bille de PSE conduit à l'augmentation du coefficient d'absorption acoustique (α) et à une diminution de la vitesse de propagation des ondes sonores. La vitesse de déplacement du son dépend du milieu dans lequel il est propagé. Lorsqu'elle est grande, cela signifie que le parcours de l'onde sonore est court, et le coefficient d'absorption dans ce cas sera faible.

Afin de préciser la relation entre la vitesse et le coefficient d'absorption acoustique, il paraît intéressant de procéder à une corrélation entre ces deux propriétés. La figure V.9 illustre la fonction de corrélation proposée entre le coefficient d'absorption acoustique et la vitesse de propagation de l'onde acoustique à travers l'épaisseur des spécimens des composites. L'analyse des courbes obtenues met en évidence l'existence d'une relation opposée, en effet, l'augmentation de la vitesse de l'onde sonore se traduit par une diminution du coefficient d'absorption (α).

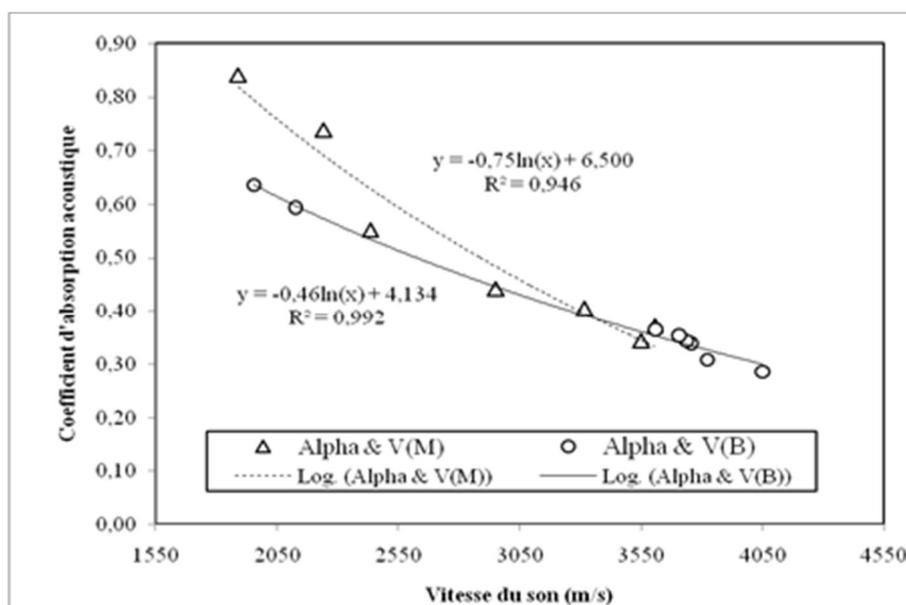


Figure V.9 : Évolution du coefficient d'absorption acoustique en fonction de la vitesse du onde sonore

L'expression proposée à la corrélation directe entre le coefficient d'absorption acoustique et la vitesse de propagation de l'onde acoustique, est une fonction de forme logarithmique présentée par:

- l'équation pour les mortiers de PSE $\alpha_m = -0.75 \ln V_m + 6.5$ avec $R^2 = 0.946$
- Pour les bétons de PSE $\alpha_m = -0.46 \ln V_m + 4.13$ avec $R^2 = 0.992$

V.3.5 La relation entre le coefficient d'absorption (α) et R_c

D'après le chapitre III, Il est évident que la résistance à la compression du béton de PSE est toujours inférieure à celle du béton témoin. Contrairement au coefficient d'absorption acoustique qui croit dans le sens de l'augmentation de la teneurs en bille de PSE. Ce constat à été expliqué par l'influence de la quantité des billes de PSE d'une coté et d'autre coté la qualité de la zone d'interaction. La figure (V.10), présente l'évolution de la résistance à la comprssion et le coefficient d'absorption acoustique en fonction de la teneur en bille de PSE.

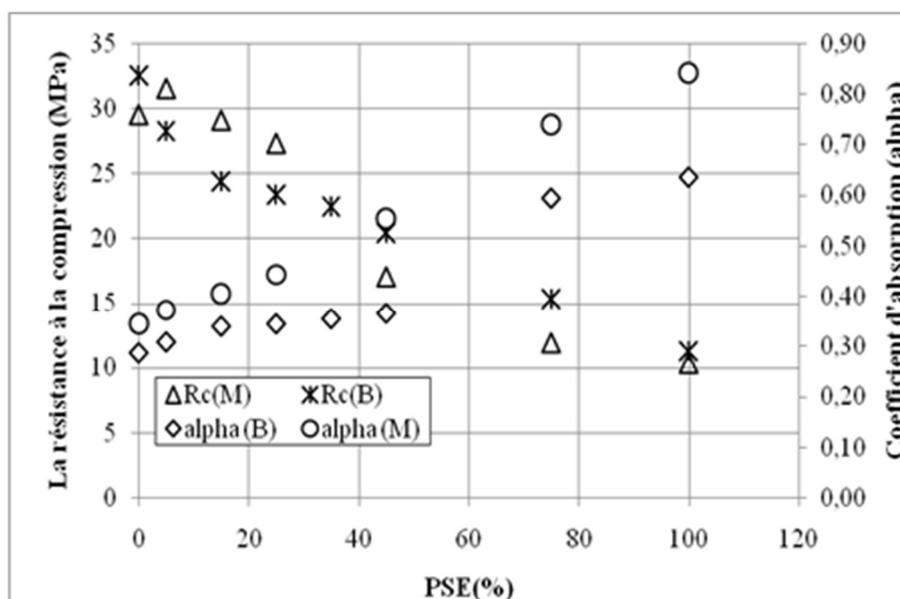


Figure V.10 : Évolution du Coefficient d'absorption acoustique et fonction de la résistance à la compression en fonction du dosage en PSE.

La relation entre α et R_c est présentée sur la figure (V.11), la relation proposée estime le coefficient d'absorption en fonction de la résistance à la compression d'une manière satisfaisante est comme suit:

- Pour mortier : $\alpha_m = -0.4 \ln(R_c) + 1.76$ avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.97$.
- Pour béton : $\alpha_B = -0.34 \ln(R_c) + 1.55$ avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.91$.

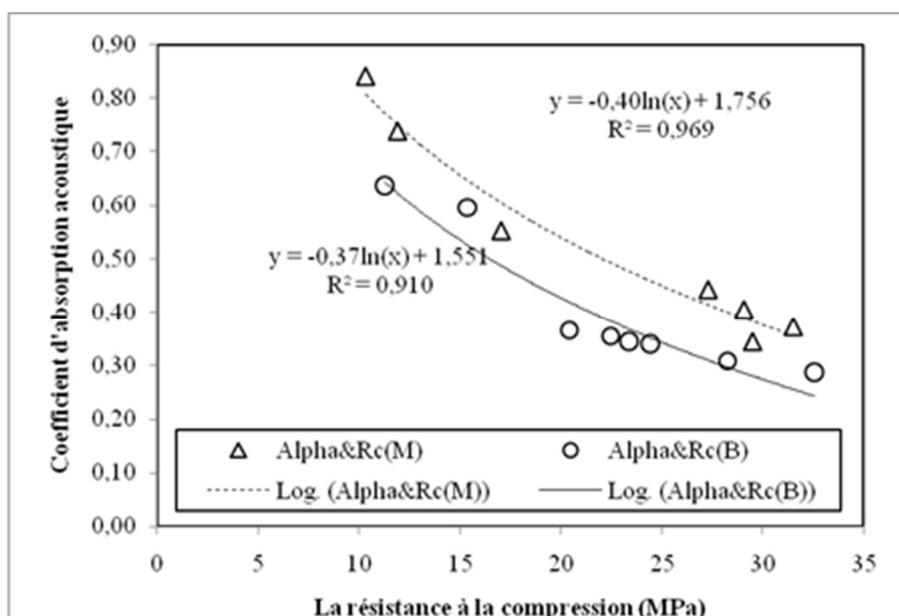


Figure V.11 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction de la résistance à la compression

V.3.6 La relation entre le coefficient d'absorption α et E_d

Pour étudier la relation entre le coefficient d'absorption (α) et le module d'élasticité dynamique, on représente sur la Figure (V.12) les courbes de corrélation des deux familles (mortier /béton). Globalement, l'augmentation du module d'élasticité est traduite par une diminution du coefficient d'absorption acoustique.

La comparaison entre l'allure des deux courbes (mortier /béton), montre un écart important pour les valeurs élevées du coefficient d'absorption acoustique. En revanche, la différence se réduit pour les faibles valeurs de ce coefficient.

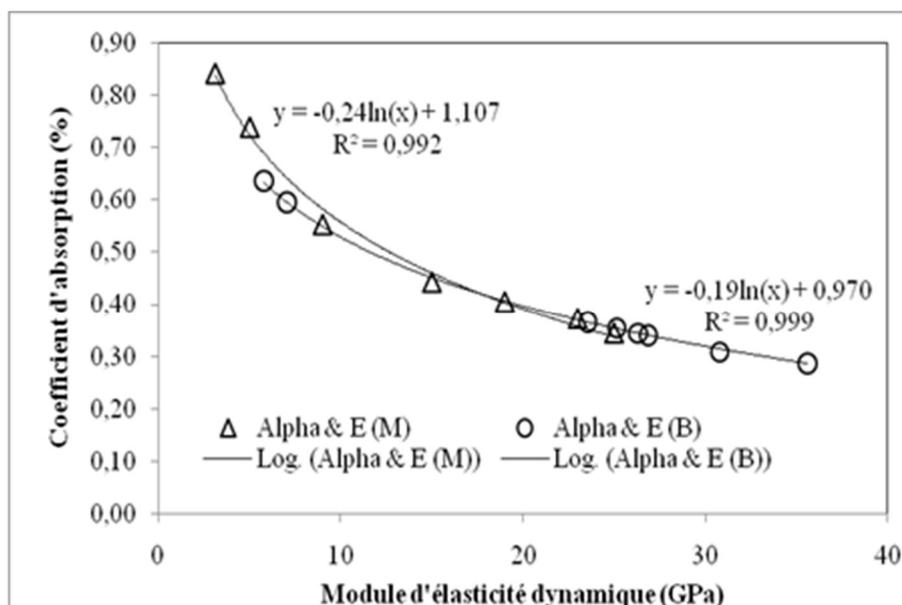


Figure V.12 : Coefficient d'absorption acoustique en fonction du module d'élasticité dynamique

Dans ce cas, les expressions des deux courbes de mortier et de béton se présentent comme suit :

- Pour mortier : $\alpha_m = -0,24 \ln(E_m) + 1,10$ avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,99$.
- Pour béton : $\alpha_B = -0,19 \ln(E_B) + 0,97$ avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,99$.

V.4 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à l'étude des propriétés acoustiques des deux familles de PSE (mortier/béton). Les valeurs d'impédance acoustique, du coefficient d'absorption, du coefficient réflexion et de transmission ont été déterminées pour les différentes formulations. À la lumière des résultats obtenus on a pu tirer quelques recommandations vis-à-vis l'exploitation des billes de polystyrène expansé.

Tout abord, le but était de contribuer à la valorisation des billes de PSE comme la substitution des sables corrigés dans le mélange de mortier et de béton et d'apercevoir s'ils apportent un intérêt quelconque en tant qu'isolant acoustique. L'évaluation expérimentale des propriétés acoustique des composites étudiés a montré que l'augmentation de la teneur

en billes de PSE affecte leurs propriétés acoustiques en les rendant plus absorbant des sons. Ainsi, la porosité et la densité de ces composites légers ont aussi montré leur effet sur l'augmentation de leurs coefficients d'absorption acoustique, et par conséquent, l'augmentation de la capacité d'isolation phonique par rapport au composite qui ne contient pas ces billes de PSE. D'ailleurs, L'inclusion des billes de PSE dans les mortiers à faibles teneurs (< 50%) n'améliore pas ses propriétés d'isolation acoustiques, puisque la valeur de coefficient d'absorption (α) est inférieure à 0.5, donc on peut les considérer comme des matériaux non absorbant. Cependant, pour les mortiers avec un taux de remplacement dépassant 50%, ils ont des meilleures performances d'absorption acoustique. En effet, dans ce cas on distingue deux classes selon la norme ISO 11654 (1997), la classe C et B pour le remplacement en billes de PSE de 75% et 100% respectivement. Grâce à ses bonnes qualités d'absorption acoustique, ces deux composites (MPSE75 et MPSE100) trouvent des applications dans les murs antibruit. En conséquence, les composites formulés avec plus de 50 % de billes de PSE permet de rendre l'affaiblissement acoustique plus meilleure.

De plus, les valeurs d'impédance acoustique et le coefficient de réflexion acoustique augmentent avec la diminution de la substitution du sable corrigé par les billes de PSE compte tenu de la faible porosité de ces composites. Contrairement au coefficient de transmission qui évolue lorsque la teneur en bille de PSE est élevée.

Aussi, la déduction des relations de corrélation entre le coefficient d'absorption acoustique et les caractéristiques (la vitesse du son (V), la résistance à la compression (R_c) et le module d'élasticité (E) des spécimens de matériaux est bénéfique afin d'évaluer leurs performances et l'emploi possible de ces matériaux comme réflecteur, absorbeur ou barrière acoustique pour des applications en acoustique.

Enfin, les résultats obtenus sont basés sur des essais réalisées à l'aide de l'instrument de mesure « ultrason » qui génère une série d'onde sonore avec un seule type de fréquence (55 KHZ). Donc, les résultats ne pourra être confirmé qu'en réalisant une caractérisation complète des grandeurs acoustiques à l'aide des instruments plus spécialisés.

Conclusion générale

Actuellement, le développement technologique dans le domaine de la construction, comme dans tout autre secteur, est lié par trois facteurs essentiels d'innovation : l'économie, le confort et l'environnement. Le récent développement de la technologie du béton mène toujours plus fréquemment à l'emploi de bétons spéciaux ayant un poids différent de celui du béton normal. Bien que connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, les bétons légers ont été employés dans notre pays d'une façon timide et individuelle, mais ils connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt, qui semble tout à fait mérité en raison de leurs propriétés techniques et économiques intéressantes. Ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de la partie fine du granulat. L'utilisation d'un béton de masse volumique plus faible peut être bénéfique en termes d'éléments portants de sections plus petites et de la réduction correspondante aux fondations aussi de construire sur un sol de faible capacité portante. Ainsi les bétons légers, ils ont une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

L'objectif de ce travail expérimental était la contribution à la valorisation et l'exploitation du sable des dunes, comme matériau local inexploitable, et le polystyrène expansé, comme déchets industriels solides afin de profiter de ses avantages. Dans ce sens, en premier temps, et puisque le sable de dunes généralement de granulométrie (0/2) la correction par le sable de carrière parue étape fondamentale afin de fabriquer un composite résistant. Puis, et dans un second temps, vers la l'allègement de ces composites résistants à travers le remplacement du sable corrigé par les billes de PSE. Deux familles de composite cimentaire ont été confectionnées, le mortier et le béton car d'un côté les propriétés du mortier montre une idée sur les propriétés des matériaux sélectionnés, d'autre côté chacun d'eux a son importance dans le domaine de construction. L'investigation est divisée en trois axes, d'abord l'étude des propriétés physico-mécaniques et des approches de durabilité, ensuite les propriétés thermiques et acoustiques. L'incorporant des billes de polystyrène expansé (PSE) a été choisi comme suit: des teneurs volumiques allant de 0 ; 5 ; 15 ; 25 ; 50 ; 75 et 100% pour les mortiers de PSE et de 0 ; 15 ; 25 ; 35 ; 45 ; 75 et 100% pour les bétons de PSE, comme la substitution du sable de dune corrigé par le sable de carrière. La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

En premier lieu, cette étude montre que la valorisation du sable de dune corrigé par le sable de carrière est tout à fait possible dans les bétons légers, et que la méthode de correction choisie, celle d'Abrams, est adéquate pour la correction granulaire. D'ailleurs, les bétons obtenus présentent des performances mécaniques satisfaisantes.

A l'état frais, la substitution du sable corrigé par le polystyrène mène à l'augmentation de la maniabilité du mortier et du béton. En fixant le temps d'écoulement ($t < 10s$) afin

d'avoir un mortier fluide, on a pu confectionner tous les mélanges du mortier de PSE avec des rapports E/C variables de 0.55 à 0.27 pour le mortier de 0.5% de plastifiant, et de 0.5 à 0.26 pour le mortier de 1% de plastifiant. La variation du rapport E/C est liée à la variation du pourcentage de dosage volumique en bille de PSE, qui est caractérisée par une nature hydrophobe, et à la diminution du rapport volumique Sable/PSE. L'emploi du plastifiant s'avère très intéressant pour maîtriser les critères d'ouvrabilité des composites. De plus, les valeurs de l'air occlus de mortier de polystyrène est plus importantes que celles de mortier témoin. Pour les mélanges de (0,5%) de plastifiant, à partir du spécimen de 15 % de PSE, la teneur en air augmente de 46,77% par rapport au mortier témoin. Quant aux mortiers de (1%) plastifiant le pourcentage d'air occlus varie de 5,6 à 8,9%, donc une progression de 37%. Cependant, les spécimens de 5% en PSE montrent une réduction de 20 % et 17,8% pour les mortiers de 0,5 et 1% respectivement. L'augmentation s'explique par l'accroissement de la porosité qui peut être attribuée à la morphologie de PSE caractérisée par une nature hydrophobe. En ce qui concerne l'état frais des bétons de PSE, pareille que les mélanges de mortiers, l'ouvrabilité a été fixée dans la classe du béton plastique. Toutefois, le gravier emprisonne les billes de PSE et les empêche de flotter à la surface du mélange par la propriété d'Archimède. Aussi, le rapport E/C des bétons de PSE décroît en fonction de l'augmentation de la substitution de sable par les billes de PSE avec une diminution de 17%, Ce constat est bénéfique car la diminution de la quantité d'eau de gâchage permettrait d'améliorer les propriétés mécaniques et hydriques du matériau.

A l'état durci, c'est évident que l'incorporation des billes de PSE subit la diminution de la densité des mortiers qui arrive à dépasser 50% pour la substitution totale du sable corrigé par les billes de PSE. Cette dégression positive de la densité va faciliter la mise en œuvre du béton sur les chantiers et minimiser le poids mort des structures. Ces résultats étaient attendus parce que la densité du PSE est inférieure à celle du mélange témoin. En revanche, l'augmentation des teneurs en billes de PSE influe négativement les performances mécaniques du mortier cimentaire, malgré que le 5% de polystyrène expansé a réussi d'améliorer de près 8% la résistance à la compression pour les deux dosages de plastifiant, contrairement aux autre pourcentages où la résistance diminue de 60,73% et 64,91% pour 0,5 et 1% de plastifiant.

Dans le béton durci, de façon générale, la substitution du sable corrigé par les billes de polystyrène expansé influe négativement sur les propriétés physiques et mécaniques. Selon les valeurs de densités trouvées, deux classes de béton se manifestent en appliquant la norme EN 206. Ces deux classes concernent le béton léger 2.0 de densité variée de 1.8 à 2.1 où la teneur en billes de PSE est 5 ; 15 ; 25 ; 35 et 45% et le béton léger 1.8 dont la densité variée de 1.6 à 1.8 pour 75 et 100% de PSE. En effet, nos bétons dont seuls les granulats fins (le sable qui représente 37% du volume total du granulat) qui ont été remplacés par les billes de PSE, donc c'est logique de ne pas atteindre des classes plus légères même avec 100% de remplacement du sable. La diminution de la masse volumique est toujours accompagnée par la diminution de résistance mécanique, dans ce sens, les résultats affirment la décroissance. D'ailleurs,

la résistance à la compression décroît de 32,55 MPa pour les bétons témoins, jusqu'à atteindre une résistance minimale de l'ordre de 11,24 MPa dont la substitution est de 100%. Une classification pour ces bétons légers basée sur la corrélation entre la masse volumique et la résistance à la compression après 28 jours de cure parue logique, puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées, selon la norme ACI 213R -8713.141 trois types de béton ont été constatés (Tableau III.1). L'évolution des modules d'élasticité présente la même tendance que celle de la résistance, de façon générale, l'augmentation du pourcentage des billes de PSE génère une diminution du module de Young E_d , il est varié entre 5,758 et 35,583 GPa et diminue régulièrement lorsque la quantité des billes de PSE augmente. Cette diminution est due au faible module d'élasticité des billes de PSE par rapport à celui des granulats naturels, donc une plus grande déformabilité dans les BPSE, Notamment pour les mélanges de 75 et 100% de PSE dont les modules sont très faibles et varient entre 5.758 et 7,013 GPa.

De plus, les critères hydriques des BPSE sont influencé par la quantité des fluides, d'ailleurs une forte absorption capillaire d'eau a été constatée dans les PSE dont les teneurs sont: 5 ; 15 et 25%. Contrairement à ce qui a été observé pour les teneurs supérieurs où égale 35%. Le composite avec une absorption d'eau plus grande par capillarité était le béton de 5% de PSE et le béton avec une absorption d'eau plus faible par capillarité était le béton de 100% en billes de PSE. Ainsi, le retrait le plus élevé dans toutes les séries a été enregistré entre 1000 et 1 200 micromètres après 90 jours pour 100% de billes de PSE. Donc, la présence de ces billes a un effet néfaste sur la stabilité dimensionnelle, ce phénomène est lié à la faible rigidité des billes de PSE ainsi que la faible zone d'interaction entre la pâte de ciment et les granulats. Globalement, l'augmentation du gonflement est liée à de l'augmentation des teneurs en PSE. Ceci nous a permet de conclure que la présence des billes de PSE dans les bétons élaborés a augmenté la capacité d'absorption d'eau donc un taux important des vides au niveau des interfaces pâte – bille de PSE.

La porosité des composites de PSE croît avec la croissance du taux de la substitution du sable corrigé par les billes de PSE de façon proportionnelle avec la porosité dans les composites. À l'exception du mélange de 5 % PSE où on aperçoit une légère diminution. L'augmentation de la porosité due à la mauvaise liaison entre les billes de PSE et la pâte fait élargir les vides au niveau de la zone interfaciale et donc le taux de porosité croit. Par conséquent la diminution de la densité qui est notre objectif malgré son impact négatif sur la résistance spécialement pour les teneurs élevés des billes de PSE (>25%).

De plus, notre investigation sur le comportement des spécimens en BPSE dans le milieu acide (HCL), a montré que l'utilisation de ces billes a rendu le béton léger moins sensible. D'ailleurs, la perte de masse du BT dépasse celle du composite contenant les billes de PSE. Ainsi, après 90 jours d'exposition à la solution de HCL, une zone dégradée d'ordre de (10 mm) se manifeste à la surface des spécimens. En plus, le processus de vieillissement par immersion dans une solution acide chlorhydrique HCl a produit des pertes de masse importantes. Concernant la perte de résistance, le béton

sans billes de PSE est sensiblement dégradé, soit une perte de résistance de l'ordre de 17,05%. Pour une teneur en PSE de 5%, la perte de la résistance est de l'ordre de 7,92%, l'explication de ce constat est orientée vers la présence de granulats de PSE qui limite du processus de dissolution.

L'analyse des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons après traitement thermique allant de 200°C, 400°C et 600°C montre que la présence des billes de PSE diminue la perte de masse pour les différents composites. Le béton témoin et le BPSE 5% présentent les valeurs les plus élevées quel que soit le degré de la température de chauffe. La perte de masse varie entre 0,399 % et 8,807% pour tous les types de BL. Pour la vitesse du son des spécimens calciné, elle varie de 4048,58 à 1566,6 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45% et de température de 20°C à 600°C respectivement. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores d'un côté, d'autre côté l'effet de la température de chauffe sur les billes de PSE qui ont commencé à se fusionner à partir de 150 °C. En plus, les résultats d'écrasement des éprouvettes calcinées sous différentes températures, indiquent que lorsque la température de chauffe dépasse 200°C, la dégradation des propriétés mécaniques des bétons de PSE devienne importante. Cette dégradation liée bien sûr à l'augmentation de la température d'une côté, d'autre côté revient à l'augmentation de la porosité due à la fusion des billes de PSE.

Les résultats tirés par les essais de carbonatation, montrent que l'augmentation du taux de substitution des billes de PSE a permis l'accroissement de la zone carbonatée jusqu'à 25% de bille de PSE dont la valeur la plus élevée a été enregistrée avec un moyen égale 17.2mm. Puis, au-delà de 25% en PSE on trouve que l'allure de l'histogramme descend considérablement jusqu'à la valeur 1.5mm pour la substitution 100% donc inférieure à la profondeur du béton de référence (2,3mm).

De plus, notre investigation sur le comportement des spécimens en BPSE dans le milieu acide (HCL), a montré que l'utilisation de ces billes a rendu le béton léger moins sensible au milieu acide. D'ailleurs, la perte de masse du BT dépasse celle du composite contenant les billes de PSE. Ainsi, après 90 jours d'exposition à la solution de HCL, une zone dégradée d'ordre de (10 mm) se manifeste à la surface des spécimens. En plus, le processus de vieillissement par immersion dans une solution acide chlorhydrique HCL a produit des pertes de masse importantes. Concernant la perte de résistance, le béton sans billes de PSE est sensiblement dégradé, soit une perte de résistance de l'ordre de 17,05%. Pour une teneur en PSE de 5%, la perte de la résistance est de l'ordre de 7,92%, l'explication de ce constat orientée vers la présence de granulats de PSE qui limite le processus de dissolution.

L'étude de l'effet de la haute température sur des bétons de PSE a été faite par l'analyse des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons après traitement thermique allant de 200°C, 400°C et 600°C. Elle montre que la présence des billes de PSE diminue la perte de masse pour les différents composites. Le béton témoin et le BPSE 5% présentent les valeurs les plus élevées quel que soit le degré de température

de chauffe. La perte de masse varie entre 0.399 % et 8,807% pour tous les types de BL, donc, la présence des billes de PSE a permis de minimiser le développement de dégradation sous l'effet de la température élevée.

Quant à la vitesse du son, elle varie de 4048,58 à 1566,6 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45% et de température de 20°C à 600°C respectivement. L'écart observé est logique dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores d'un côté, d'autre côté l'effet de la température de chauffe sur les billes de PSE qui ont commencé à fusionner à partir de 150 °C. En plus, les résultats d'écrasement des éprouvettes calcinées sous différentes températures, indique que lorsque la température de chauffe dépasse 200°C, la dégradation des propriétés mécaniques des bétons de PSE devienne importante. Cette dégradation liée bien sûr à l'augmentation de la température d'une côté, d'autre côté revient à l'augmentation de la porosité due à la fusion des billes de PSE.

Au microscope électronique à balayage MEB, on a observé une mauvaise adhérence entre la matrice et les billes de PSE. A cause de l'hydrophobie des billes en PSE qui repousse le fluide qui les sépare de la pâte de ciment. Dans le cas des composites à fort pourcentage de PSE où les billes se rassemblent donc la distance entre les granulats est moindre et ils forment une zone de séparation autour d'eux, par conséquent l'épaisseur de la matrice cimentaire est moindre. En conséquence, chaque regroupement des billes de PSE peut faire de petites fractions dans la matrice entourée, donc l'accrochage entre la pâte et les billes de PSE est fortement réduit. Ce phénomène augmente les vides et l'absorption d'eau.

En thermique, les résultats montrent que l'exploitation de ces billes dans les mélanges cimentaires, permet de minimiser les déperditions thermiques par conduction. Ceci nous permet de conclure la possibilité de changer la méthode d'isolation thermique à l'aide des plaques en polystyrène, à celle du mortier de béton de PSE non seulement isolant thermiquement mais aussi résistant. En effet, les valeurs de conductivité sèche sont entre 20 et 40 %, inférieures aux conductivités obtenues sous HR = 50 % et HR = 100 %. La conductivité thermique des bétons contenant des billes de PSE est inférieure de 3.68 % ; 8.42% ; 11.05% ; 15.76% ; 26.32% ; 46.32 % et 55.79% pour BPSE5 ; BPSE15 ; BPSE25 ; BPSE35 ; BPSE45 et BPSE100 respectivement par rapport au béton témoin. C'est le béton avec 100% en bille de PSE qui exhibe une meilleure performance thermique, d'ailleurs, la substitution totale du sable corrigé par les billes de PSE engendre 26.47% en porosité ouverte, en plus la porosité fermée des billes de PSE, est responsable de la réduction de 55.79% et 30.53% de conductivité thermique et de masse volumique respectivement.

En acoustique, l'évaluation expérimentale des propriétés acoustique des mortiers étudiés a montré que l'augmentation de la teneur en billes de PSE améliore leurs propriétés acoustiques en les rendant plus absorbant. D'ailleurs, l'inclusion des billes de PSE dans les mortiers à faibles teneurs (< 50%) n'améliore pas ses propriétés d'isolation acoustiques, puisque la valeur de coefficient d'absorption (α) est inférieure

à 0,5, donc on peut les considérer comme des matériaux non absorbant. Cependant, pour les mortiers avec un taux de remplacement dépassant 50%, ils ont des meilleures performances d'absorption acoustique. Dans ce cas on distingue deux classes selon la norme ISO 11654 (1997), la classe C et B pour le remplacement en billes de PSE de 75% et 100% respectivement. Grâce à ses bonnes qualités d'absorption acoustique, ces deux composites (MPSE75 et MPSE100) trouvent des applications dans les murs antibruit. En conséquence, les composites formulés avec plus de 50% de billes de PSE permettent de rendre l'affaiblissement acoustique plus meilleure.

Concernant les éprouvettes de béton, nous avons trouvé des faibles valeurs pour les spécimens ayant une teneur moindre de 35% en PSE, elles possèdent des valeurs de (α) inférieure à 0,5. En outre, nous avons trouvé que les spécimens de 45% en PSE, pourraient avoir la classe D. Toutefois, les spécimens ayant les pourcentages 75% et 100% domineraient dans la classe C. Ces améliorations, du coefficient d'absorption acoustique, sont dues aux frottements visqueux existant entre le fluide et le squelette granulaire.

En conclusion, cette étude a permis d'obtenir une meilleure vision quant aux performances du mortier/béton allégé par l'incorporation des billes de PSE. Des gammes de variations des propriétés en fonction du dosage en bille de PSE mènent à élargir le domaine d'utilisation de ces composites. L'incorporation des billes de PSE dans la matrice cimentaire, contribue de façon significative à l'amélioration des propriétés de durabilité et d'isolation (thermique et acoustique) selon le taux de substitution. Les travaux devraient se poursuivre en développant positivement les propriétés des bétons dont le taux du PSE plus élevé, jusqu'à la satisfaction des attentes des constructeurs.

Recommandations et perspectives

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette recherche pourraient mener à des futurs développements dans le domaine de la fabrication des bétons légers. Pour cela on recommande aux chercheurs d'approfondir dans ces recherches et surtout d'étudier :

- ✓ Les propriétés d'isolation acoustique de béton de polystyrène en utilisant des moyens plus développés ;
- ✓ Les bétons spéciaux (BAPL, BHPL) à base de polystyrène ;
- ✓ L'effet des faibles dosages en ciment sur les bétons de PSE et les moyens de compactage.

Références bibliographiques

18-452, N. F. P. (Mai 1988.). « Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux Maniabilimètre » Normes AFNOR 8894-1, N. E. I. (2010). Matériaux réfractaires-détermination de la conductivité thermique- Partie 1 : Méthodes du fil chaud (« croisillon » et « thermomètre à résistance, »).

8894-1, N. E. I. (2010). Matériaux réfractaires-détermination de la conductivité thermique- Partie 1 : Méthodes du fil chaud (« croisillon » et « thermomètre à résistance,

A. Bentur, S.-i Igarashi, K. Kovler, Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research*, 31:1587–1591, 2001.

A. M. Neville, "Propriétés des bétons", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p., (2000).

A.Komar. (1978). Matériaux et éléments de construction.

Aboul-Nour, L. A., Zaghlal, A., Yahia, M., Malek, K.A. . (2020). Flexural behavior of structural lightweight concrete beam. *International Journal of Civil Engineering and Technology.*, 11, pp.329-339.

ACI 213R-03, "Guide for structural lightweight-aggregate concrete", Reported by ACI Committee 213, American concrete institute, 2003.

ACI Committee 213R-03. Guide for structural lightweight-aggregate concrete. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2003

AFNOR. Auscultation sonique, mesure du temps de propagation d'onde ultrasonore dans le béton.

Ali, M. R., Maslehuddin, M., Shameem, M., & Barry, M. S. (2018). Thermal-resistant lightweight concrete with polyethylene beads as coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, 164, 739-749. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.012>

Amel, L., Simon, A., Quenard, D., & Zerizer, A. (2014). Détermination des paramètres acoustiques des matériaux bio sourcés pour un usage en bâtiments Cas d'application : bois de Pin d'Alep et liège algérien.

Arvin, M. R., Abbasi, M., & Khalvati Fahlani, H. (2021). Shear behavior of geocell-geofoam composite. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(1), 188-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.09.012>

Askar, L. K., Albarwary, I. H. M., & Askar, M. K. (2019). Use of Expanded Polystyrene (EPS) Beads in Silica-Fume Concrete. *Journal of Duhok University*, 22(1), 30-38.

- Assaad, J. J., El Mir, A. . (2020). Durability of polymer-modified lightweight flowable concrete made using expanded polystyrene. *Construction and Building Materials.*, 249, 118764.(<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118764>).
- Avesani Neto, J. O., & Rodrigues, D. (2021). Instrumented load tests and layered elastic theory analysis of a large-scale EPS block embankment. *Transportation Geotechnics*, 26, 100442. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100442>
- Babu, K. G., Babu, D.S. . (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research.*, 33([https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01055-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01055-4)), 755-762. .
- Benmalek, M., & Riad, D. (2003). Valorisation des sables dunaires et des sous-produits de la région de Laghouat : élaboration et caractérisation d'un béton de sable pour structures modérément sollicitées.
- Bicer, A. (2021). Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as concrete aggregate. *Journal of Building Engineering*, 42, 102472. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102472>
- Bouhezila, F., Amirouche, I., Guemraouie, Y., & Hallal, I. E. (2018). L'apport des matériaux de construction au projet d'architecture: cas du béton léger. Université de Jijel.
- Brachet, M. (1976). Bilan et perspective d'emploi des bétons légers de structure-1) ponts en béton de granulats légers réalisés en France. *Ann itbtp*(345 (béton/162)).
- Cadere, C. A., Barbuta, M., Rosca, B., Serbanoiu, A. A., Burlacu, A., & Oancea, I. (2018). Engineering properties of concrete with polystyrene granules. *Procedia Manufacturing*, 22, 288-293. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.044>
- Calais, T. (2013). Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger: Québec.
- Carvalho, C., & Motta, L. (2019). Study about concrete with recycled expanded polystyrene. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12, 1390-1407.
- Casteilla, D. R. e. a. (2000). « Granulats, sols, ciment et béton : Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » (Vol. 2eme édition): édition Paris.
- Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Chen, B., Liu, J., & Chen, L. Z. (2010). Experimental study of lightweight expanded polystyrene aggregate concrete containing silica fume and polypropylene fibers. *Journal of Shanghai Jiaotong University*.

- Chen, W. (2011). Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables. Ecole centrale de Lille.
- Chung, S.-Y., Sikora, P., Kim, D. J., El Madawy, M. E., & Abd Elrahman, M. (2021). Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete. *Materials Characterization*, 173, 110907. doi:
- Civil, T. D. D. E. G. (2014). Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites.
- D.P. Bentz, K.A. Snyder, Protected paste volume in concrete; Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, *Cement and Concrete Research*, 29(11):1863–1867, 1999.
- Demirboga, R., & Kan, A. (2012). Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 35, 730–734. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.105
- Dixit, A., Dai Pang, S., Kang, S.H., Moon, J. . (2019). Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. . *Cement and Concrete Composites*. , 102(<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023>), 185-197.
- Dreux, G., & Festa, J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants: Eyrolles.
- Dueramae, S., Sanboonsiri, S., Suntadyon, T., Aoudta, B., Tangchirapat, W., Jongpradist, P., Jaturapitakkul, C. (2021). Properties of lightweight alkali activated controlled Low-Strength material using calcium carbide residue – Fly ash mixture and containing EPS beads. *Construction and Building Materials*, 297, 123769. doi:
- Dutruel, F. (1987). Les blocs en béton à isolation intégrée. *Building Research and Information*, 15(1-6), 234-237.
- EIA. (2016). Energy Information Administration. International Energy Outlook.
- Farran, J., 1956. Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et des matériaux enrobés. *Revue des Matériaux de Construction et des Travaux publics*, 490/491, pp.155–172.
- Fernando, P. L. N., Jayasinghe, M. T. R., & Jayasinghe, C. (2017). Structural feasibility of Expanded Polystyrene (EPS) based lightweight concrete sandwich wall panels. *Construction and building materials*, 139, 45-51.
- Feron, C., Autuori, P., & Joyeux, D. (2006). Vers des moyens de prévenir l'écaillage du béton en tunnel : Rédigé dans le cadre du GT 37 de l'AFTES Tenue au feu des structures.

G. Coquilat, C. Lejeune, R. Lesage, R. Oger « Granulats légers existants (argile, schiste, laitier) : caractéristiques mode opératoires fiches d'information », M. Arnould and M. Virlogeux, editors, Granulats et bétons légers; bilan de 10 ans de recherche, pages 70–89, Paris, 1986, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

G. FAGERLUND, Frost resistance of concrete with porous aggregate, Report of cement and concrete institute in Sweden, 1978.

Gawale, R., Mishra, S., Sambare, H., Kothari, J., & Patil, M. (2016). Light Weight Concrete by Using EPS Beads. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(03), 470-476. »).

Gendron, F. (2019). Carbonatation des matériaux cimentaires: étude de la diffusion du CO₂. Université de La Rochelle.

Gomes, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2020). Environmental life cycle assessment of the manufacture of EPS granulates, lightweight concrete with EPS and high-density EPS boards. *Journal of Building Engineering*, 28, 101031. doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101031>

Guennoun.R. (2003). Etude et formulation d'un béton de sable de dune. ENP, Alger, Algérie., ENP, Alger, Algérie.

Hachemi, S. (2015). Etude du Comportement du béton soumis à haute température: Influence du type de béton et de la nature des constituants. Université Mohamed Khider-Biskra.

Hager, I., & Pimienta, P. (2005). Déformation thermique transitoire des bétons à haute performance: Etude expérimentale. *Revue européenne de génie civil*, 9(3), 373-383.

Hatem, K. (2016). Influence de la température et de l'hygrométrie sur le comportement instantané du béton.

Herihiri, O. (2010). Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. Université Mohamed Khider-Biskra.

Herki, B. (2017). Absorption Characteristics of Lightweight Concrete Containing Densified Polystyrene. *Civil Engineering Journal*, 3, 594-609. doi: 10.28991/cej-2017-00000115

Hocine, A. (2009). Etude des bétons à base des sables de dune. université Mohamed khider Biskra.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123769>

<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110907>

ITBTP. (1976). Recommandations provisoires pour l'utilisation des bétons de granulats légers. annales de l'ITBTP.

- J. Muller-Rochholz, Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement, *The International journal of lightweight concrete*, 1(2):87–90, 1979.
- J. PUNKKI, O.E. GJØRV, P.J.M MONTEIRO, Microstructure of high-strength lightweight aggregate concrete, 4th International Symposium on utilization of highstrength/high-performance concrete, pages 1281–1287, Paris, 1996.
- K. Kohno, T. Okamoto, Y. Isikawa, T. Sibata, H. Mori, Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Research*, 29(4):611–614, 1999.
- K. Miled, R. Le Roy, k. Sab, c. Boulay «Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode » *Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées*, BCC, 58, BD Lefebvre, 75732 Paris cedex 15, France Received 25 February 2003.
- Kalifa P., T. M. (1998). Comportement des BHP à haute températures - Etat de la question et résultats expérimentaux. cahier du CSTB.
- Kamali, S., Moranville, M., & Leclercq, S. (2008). Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: Experiments and modelling. *Cement and Concrete Research*, 38(4): 575–585. *Cement and Concrete Research*, 38(4): 575–585.
- Ke, Y., Beaucour, A., Ortola, S., Dumontet, H., & Cabrillac, R. (2006). Comportement mécanique des bétons de granulats légers; étude expérimentale et modélisation. XXIV^{ème} Rencontres du Génie Civil et Urbain, Construire: les nouveaux défis.
- Khetab. R. (2006). valorisation du sable de dune. Alger.
- Kim, H. K., Jeon, J., & Lee, H. (2012). Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight concrete with a high volume of entrained air. *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, 29. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.067
- Koabaz, M., Renault, N., Pliya, P., & Gallias, J.-L. (2011). Evaluation par la méthode d'impact-écho de l'endommagement du béton exposé à haute température.
- Koksal, F., Mutluay, E., Gencil, O. . (2020). Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 236, 2020, 117789.(<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117789>).
- Kuhail, Z., Shihada, S. . (2003). Mechanical properties of polystyrenelightweight concrete. *Journal of Islamic University of Gaza*., 11, pp. 93-114.

Laneyrie, C. (2014). Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des béton des granulats recyclés. Université de Cergy Pontoise.

Laoubi, H., Djoudi, A., Dheilily, R., Bederina, M., Goullieux, A., Quéneudéc, M. . (2019). Durability of a lightweight construction material made with dune sand and expanded polystyrene. *Journal of Adhesion Science and Technology* , 33(<https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1637091>), 2157-2179.

Larrard, F. d. (2002). Construire en béton l'essentiel sur les matériaux.

Laukaitis, A., Zurauskas, R., and Keriene, J. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cem. Concr. Compos.*, 27(1) :41-47.

Li, Z., Chen, W., Hao, H., Khan, M. Z. N., & Pham, T. M. (2021). Dynamic compressive properties of novel lightweight ambient-cured EPS geopolymer composite. *Construction and Building Materials*, 273, 122044. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122044>

Liu, P., Gong, Y. F., Tian, G. H., & Miao, Z. K. (2021). Preparation and experimental study on the thermal characteristics of lightweight prefabricated nano-silica aerogel foam concrete wallboards. *Construction and Building Materials*, 272, 121895. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121895>

Lo Monte, F., & Gambarova, P. (2014). Extreme Concretes Exposed to High Temperature: the Effect of Expanded Polystyrene Beads and Baritic Aggregates. Paper presented at the 8th International Conference “Structures in Fire”-SIF 14.

M. Virlogeux, Généralités sur les caractères des bétons légers, M. Arnould and M. Virlogeux, editors, *Granulats et bétons légers; bilan de 10 ans de recherche*, pages 111–246, Paris, 1986, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

M.-H. Zhang, O. E. Gjrv, Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research*, 20(6):884 890, 1990.

M.-H. Zhang, O.E. GJ_RV, “Microstructure of interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste”, *Cement and Concrete Research*, 20(4):610{618, 1990.

M.-H. ZHANG, O.E. GJØRV, Microstructure of interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, *Cement and Concrete Research*, 20(4):610–618, 1990.

M.Z. Bessenouci, N. E. B.-T., S. Bendimerad, Z. Nakoul, S. Khelladi, A. Hakem., (2014). Influence of humidity on the apparent thermal conductivity of concrete pozzolan, *Phys. Procedia* 150-156.

Macías, A., Goni, S., & Madrid, J. (1999). Limitations of Köch-Steinegger test to evaluate the durability of cement pastes in acid medium. *Cement and Concrete Research*, 29(12), 2005-2009.

Madandoust, R., Ranjbar, M., & Mousavi, S. (2011). An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, 25, 3721-3731. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.018

Manual, C.-F. (1977). *lightweight aggregate concrete*. the Construction Press

Manuel, C.-F. (1980). Béton de granulats légers. *Annales de l'ITBTP Janvier-Mai et Décembre*.

Messan, A. (2006). Contribution à l'étude du comportement au très jeune âge des structures minces en mortier. Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc.

Michel Murillo, A., Valery Abisambra, G., Aura Acosta, P., Claudia Quesada, Q., Tutikian, B. F., & Ehrenbring, H. Z. (2021). Comparison of the fire resistance behaviour of structural insulated panels with expanded polystyrene core treated with intumescent coating. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 1958-1969. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.079>

Miled, K. (2005). Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé.

Mindeguia, J.-C. (2009). Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons. Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Mindeguia, J.-C., Carré, H., La Borderie, C., & Pimienta, P. (2012). Analyse expérimentale du risque d'instabilité thermique des bétons en situation d'incendie: AUGC-IBPSA.

Momtazi, A. S., Mirgozar, A., A.K, H., & Atigh, H. R. (2010). Durability of lightweight concrete containing EPS in salty exposure conditions. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 75-84.

Moon, A., & Patel, A. (2021). Sustainable Construction Using EPS Beads in Light Weight Blocks to form Innovative Foam Concrete as a Green Building Material. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

Moulaï Abdellah Bouabdallah, Amel Bouabdallah, Houari Abdelhadi, Abdelhafid Ferhaoui, «Etude comparative des bétons légers a base des granulats et des déchets de bois non traités et un béton ordinaire » Séminaire national sur « La Gestion intégrée des déchets » organisé par l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique, E.N.S.E.T. d'ORAN, 29 & 30 Mai 2007

Mulla, A., & Shelake, A. (2016). Lightweight Expanded Polystyrene Beads Concrete. *Int J Res Advent Technol*, 17

Nellgård, J. (2017). Experimental Fire Study of Expanded Polystyrene Insulation in Concrete and Lightweight Concrete Wall Constructions.

- NFP, -. (1981). Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques: NFP 18-400.
- Nguyen, L. H. (2013). Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées: approche expérimentale et modélisation numérique. Cergy-Pontoise. pp. 160-172. (<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>).
- Nikbin, I. M., Golshekan, M. . (2018). The effect of expanded polystyrene synthetic particles on the fracture parameters, brittleness and mechanical properties of concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics.*, 94, pp. 160-172. (<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.02.002>).
- Noumowe, A. (1995). Effet de hautes températures (20-600 C) sur le béton: cas particulier du béton a hautes performances. Lyon, INSA.
- P. Gaudon, R. Struillou « recherches sur la résistance mécanique des granulats légers », M. Arnould and M. Virlogeux, editors, *Granulats et bétons légers; bilan de 10 ans de recherche*, pages 60–68, Paris, 1986, Presses de l'Ecole ' Nationale des Ponts et Chaussées.
- pp. 90-100. (<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.276>).
- R. Wasserman, A. Bentur, Interfacial interactions in lightweight concrete for structural applications, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10(2):79 90, 1996.
- Rahim JA , Hamzah SH , Saman HM . Expanded polystyrene fibred lightweight concrete (epsf-lwc) as a load bearing wall panel. *Jurnal Teknologi* 2015;76(9) .
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Ramli Sulong NH , Mustapa SAS , Abdul Rashid MK . Application of expanded polystyrene (eps) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science* 2019;136(20):47529 .
- Ramli Sulong, N. H., Mustapa, S. A. S., & Abdul Rashid, M. K. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(20), 47529.
- Rasiah, S., & J, C. (2016). Temperature development in concrete containing expanded polystyrene beads.
- Rosca, B. (2021). Comparative aspects regarding a novel lightweight concrete of structural grade containing brick aggregate as coarse particles and expanded polystyrene beads. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4979-4986. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.415>

S. Klarsfeld. (1984). Guarded hot plate method for thermal conductivity measurements *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods* (Vol. 1).

S. L. Sarkar, S. Chandra, L. Berntsson, Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 14:239-248, 1992.

Sabaa, B., & Rasiah, S. (1997). Engineering properties of lightweight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. Fall Meeting, Symposium MM, *Advances in Materials for Cementitious Composites* December 1997.

Sadrmomtazi, A., Sobhani, J., Mirgozar, A., & Najimi, M. (2012). Properties of multi-strength grade EPS concrete containing silica fume and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 35, 211–219. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.049

Saheed, S., Amran, Y. H. M., El-Zeadani, M., Aziz, F. N. A., Fediuk, R., Alyousef, R., & Alabduljabbar, H. (2021). Structural behavior of out-of-plane loaded precast lightweight EPS-foam concrete C-shaped slabs. *Journal of Building Engineering*, 33, 101597. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101597>

Saikia, D. N., & Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236–244. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049

Sassine, R. (2014). Un modèle numérique permettant de simuler le comportement élastique des bétons légers avec prise en compte de leur mésostructure. Université Montpellier 2.

Satish Chandra, Leif Berntsson «Lightweight Aggregate Concrete» Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden Noyes Publications William Andrew Publishing Norwich (2002)

Sayadi, A., Tapia, J., Neitzert, T., & Clifton, G. (2016). Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 716-724. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218

Shao, X., Du, Y. F., Zheng, X. L., Wang, J., Wang, Y., Zhao, S., . . . Li, L. (2020). Reduced fire hazards of expandable polystyrene building materials via intumescent flame-retardant coatings. *Journal of Materials Science*, 55, 7555-7572.

Shink, M. (2003). Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers.

Siad, H., Mesbah, H. A., Khelafi, H., Kamali-Bernard, S., & Mouli, M. (2010). Effect of mineral admixture on resistance to sulphuric and hydrochloric acid attacks in self-compacting concrete. *Canadian journal of civil engineering*, 37(3), 441-449.

- Sohel, K. M. A., Al-Jabri, K., Zhang, M.H., Richard Liew, J.Y. . (2018). Flexural fatigue behavior of ultra-lightweight cement composite and high strength lightweight aggregate concrete. . *Construction and Building Materials.*, 173,
- Sri Ravindrarajah, R. and Tuck, A. (1994). Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads. *Cement and Concrete Composites*, 16 :273-277.
- Stephant, S. (2015). Etude de l'influence de l'hydratation des laitiers sur les propriétés de transfert gazeux dans les matériaux cimentaires. Université de Bourgogne.
- Tafraoui, A. (2007). Caractérisation et valorisation du sable de l'erg occidental Algérien dans le BUHP et l'outillage. Alger.
- Tasdemir, C., Sengul, O., & Tbdemir, M. A. (2017). A comparative study on the thermal conductivities and mechanical properties of lightweight concretes. *Energy and Buildings*, 151, 469-475.
- Tayal, A., Gupta, G., Choudhary, P., Tomar, T., Kumar, N., & Mittal, S. (2018). Lightweight Concrete using Recycled Expanded Polystyrene Beads. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET) Volume*, 5.
- Vakhshouri, B., & Nejadi, S. (2017). Compressive strength and mixture proportions of self-compacting lightweight concrete. *Computers and Concrete*, 19. doi: 10.12989/cac.2017.19.5.000
- Vakhshouri, B., Rasiyah, S. R., & Nejadi, S. (2019). Analytical study of the drying shrinkage in light-weight concrete containing EPS beads. *Advances in Cement Research*, 31(7), 308-318. doi: 10.1680/jadcr.17.00017
- Vakhshouri, B., Rasiyah, S., & Nejadi, S. (2018). Analytical Study of the Drying shrinkage in Light-Weight Concrete Containing EPS Beads. *Advances in Cement Research*, 31. doi: 10.1680/jadcr.17.00017
- Wang, W., Wang, J., Guo, L., Liu, Y., & Zhang, R. (2021). Cyclic performance tests and numerical analysis of prefabricated CFS shear walls filled with lightweight EPS mortars. *Engineering Structures*, 243, 112554. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112554>
- Wibowo, A., Lianasari, E., M, Z., & Kurniawan, T. (2021). The Strength And Water Absorption Of Heated Expanded Polystyrene Beads Lightweight-Concrete. *International Journal of GEOMATE*, 21, 150-156. doi: 10.21660/2021.83.j2146
- Xing, Z. (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température. Université de Cergy Pontoise.
- Xu, Y., Jiang, L., Liu, J., Zhang, Y., Xu, J., & He, G. (2016). Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete. *Journal of Thermal Science and Technology*, 11. doi: 10.1299/jtst.2016jtst0023

Références bibliographiques

Yvrard, J.-P. (1998). Expérimentation et modélisation du comportement mécanique du polystyrène expansé. Lille 1.

Zeghidi, M. Etude des caractéristiques et durabilité des bétons légers à base de polystyrène.