Retirer le filigrane maintenant

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Universitaire Yahia FARES de Médéa
Faculté De Technologie
Département de Génie Civil

Projet de fin d'étude

Pour l'obtention du diplome de Master en Génie Civil

Option: Matériaux en Génie Civil

Thème:Etude de l'effet des ajouts minéraux sur les caractéristiques physico-mécanique et thermique du béton léger à base de polystyrène expansé.

pdfelement

Etudié par :

Mr Belal Farid
Mr Djelid Rabie

Encadré par :

Mm: HERIHIRI. O

Promotion Juin 2018

Retirer le filigrane maintenant

Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.*
*Nous tenons à exprimer mes profondes gratitudes à notre promotrice **M.Herihiri** pour l'encadrement de ce mémoire, pour sa disponibilité, son assistance et ses conseilles.*
*On remercie aussi **M. Djamila Boukhelkhel** pour ses conseilles et **chef** de laboratoire du Génie Civil pour son aide pendant les essais réalisés au laboratoire.*
*Et **tous les membres de jury** qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.*
On remercie surtout nos collègues de notre promotion de recherche chacun 'un de son nom
Enfin, nous remercions tous ceux qu'ont contribués de prés ou de loin, à la réalisation de ce travail

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

الملخــص

إن الاهتمام بمراعاة وحماية البيئة والموارد الطبيعية ومكافحة التلوث يؤدي إلى فكرة التنمية المستدامة القائمة على ركيزتين متكاملتين هما البيئة والاقتصاد .هذا الاتجاه يؤدي إلى استخدام مواد صديقة للبيئة ، وقد سمح لنا دمج هذه المواد الجديدة في الخرسانة بإنشاء مادة مركبة لها العديد من الميزات. ومن بين هذه المواد الإيكولوجية ، الركام الخفيف الوزن الذي يحتوي على العديد من خواص الخفة ، والعزل الحراري ، وامتصاص الصوت.

يهدف هذا البحث إلى تقييم الخصائص الفيزيوميكانيكية والحرارية للخرسانة المخففة بواسطة حبيبات البوليسترين الممدة في المحتويات الحجمية من 5٪ ، 15٪ ، 25٪ ، 35٪ ، 45٪ و 100٪ من جهة، من ناحية أخرى لدراسة تأثير الإضافات المعدنية (الحجر الجيري والرخام) على خصائص الخرسانة المخففة في الحالة الطرية والصلبة.

تتم صياغة الخرسانات التي تمت دراستها بواسطة طريقة .Dreux-Gorisse وهي مصنوعة بكمية من الأسمنت ثابتة. النسب المئوية للإضافات المعدنية هي 10 و 20 ٪ من كتلة الأسمنت ويتم إدخالها في الخرسانة أثناء الخلط. أتاحت النتائج التي تم الحصول عليها استخلاص استنتاجات حول سلوك خرسانة مخففة تتضمن إضافات معدنية.

الكلمات المفتاحية: مركب ، بوليسترين ، الإضافات ، خرسانة خفيفة الوزن ، الكتلة ، المقاومة ، الامتصاص.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Résumé

Le souci de prendre en compte et de protéger l'environnement, les ressources naturelles et de lutter contre la pollution amène à la notion du développement durable qui s'appuie sur deux piliers complémentaires qui sont l'environnement, l'économie. Cette tendance mène à l'utilisation des matériaux écologiques. L'incorporation de ces nouveaux matériaux dans le béton nous a permis de créer un matériau composite qui a de nombreuses caractéristiques.

Parmi ces éco-matériaux, les bétons de granulat Léger qui possèdent de nombreuses propriétés de légèreté, d'isolation thermique et d'absorption acoustique.

Ce travail à pour but, d'évaluer expérimentalement les propriétés physico-mécaniques et thermiques des bétons allégés par les billes de polystyrène expansé en teneurs volumique de 5% , 15%, 25%, 35%, 45% et 100% d'une part, d'autre part d'examiner l'effet des ajouts minéraux (calcaire, marbre) sur les propriétés du béton allégé à l'état frais et durci.

Les bétons étudiés sont formulés par la méthode de Dreux-Gorisse. Ils sont confectionnés avec des teneurs constantes en ciment. Les pourcentages d'ajouts minéraux sont de 10 et 20% par masse du ciment et leur introduction dans le béton se fait lors du malaxage. Les résultats obtenus ont permis de tirer des conclusions sur le comportement des bétons allégé incorporant des ajouts minéraux.

pdfelement

Mot clés : composite, polystyrène, ajout, béton léger, perte de masse, résistance, absorption.

Retirer le filigrane maintenant

Liste des Tableaux

Tableau I.1: Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité [Y. J ANNOT, 2008]. 8

Tableau I.2: Composition chimique type de pouzzolane naturelle algérienne ..... .

(Ghrici et al., 2006) 13

Tableau I.3: Composition minéralogique type de pouzzolane naturelle algérienne ..... .

(Ghrici et al., 2006) 13

Tableau I.4. Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes 19

Tableau .I.5. : Conductivité thermique de quelques matériaux **[YVES J, 2008.]** 20

Tableau.I.6. Détail de mélanges étudié [D. Saradhi Babu et al, 2005] 21

Tableau .I.7. L'affaissement [**A. Mulla1 , 2016]** 22

Tableau .I.8. Valeurs des conductivités du BLIT en fonction du dosage en Polystyrène [**J.M.Chaix et al, 1989**]. 30

Tableau II.1: Caractéristiques physiques des ajouts minéraux 32

Tableau II.2: Compositions chimiques des ajouts minéraux 32

Tableau II.3: Caractéristiques physiques du ciment 32

Tableau II.4: Composition chimique du ciment 33

Tableau II.5: Composition minéralogique du ciment CPJ-CEM I 42.5 selon Bogue 33

Tableau II.6: Caractéristiques physiques du sable 34

Tableau II.7: Analyse granulométrique du sable 34

Tableau II.8: propriétés physiques de la pierre concassée 36

Tableau II.9: Analyse granulométrique de la pierre concassée, fraction 3/8 36

Tableau II.10: Analyse granulométrique de la pierre concassée, fraction 8/16 36

Tableau II.11: Valeurs approximatives du coefficient Granulaire G* 39

Tableau II.12: Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats (si D ≠ 20 mm) 41

Tableau II.13: valeur du terme correcteur **K** en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibratation et de l'angularité des granulats, et permettant de calculer **Y** ordonnée du point de brisure de la courbe de référence. 41

Tableau II.14: Valeurs du coefficient de compacité γ 42

Tableau II.15: Consistance du béton suivant l'essai d'affaissement au cône d'Abrams 46

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Liste des Figures

Figure I-1. Différents granulats légers naturels [Le Hung Nguyen ,2013]..... 4

Figure I-2. Différents granulats légers artificiels [Le Hung Nguyen ,2013]..... 5

Figure I.3. Polymérisation du styrène **[Yves J ANNOT, 2008].**..... 6

Figure I.4. Microstructure d'une bille EPS **[B. Mario et al,** 1984]..... 7

Figure I.5. Photo au MEB montrant les Billes de polystyrène et la matrice cimentaire (photo Berthelot : PCM - LCPC), **[Yang Ke, 2008].**..... 7

Figure I.6. type de marbre..... 22

Figure.I.7 : Influence de la teneur en polystyrène sur l'étalement par la 1ère méthode pour.... .

E/C= 0.45&0.5..... 23

Figure .8. les propriétés relatives en fonction de la masse volumique **[Ben Sabaa et al 1997]**
..... 23

Figure.I. 9. Effet de la fumé de silice sur la résistance à la compression **[B.Chen et al, 1999].**
..... 24

figure .I.10 variation des contraintes a la compression a 28 jours en fonction des densités du béton allégé pour différents rapports eau /ciment, **[Guezouli.A et al, 2005]**..... 25

Figure. I.11: Effet de taille sur la résistance en compression du béton léger de polystyrène expansé d'après [Le Roy et al., 2005]..... 25

Figure.I.12.Variation de la résistance à la compression en fonction du temps. **D. Saradhi Babu et al (2005)**..... 26

Figure .I.13. la résistance à la compression, [**A. Mulla1 et al, 2016].**..... 26

Figure. I.14. Retrait et gonflement des bétons polystyrène et le témoin en fonction du temps. [**W.C. Tang et al 2008]**..... 27

Figure.I.15. Retrait des différents bétons élaborés, [B.Chen et al, 1999]..... 28

Figure .I.16. Variation de l'absorption initiale à 30 min et l'absorption finale. [**K.Ganesh Babu,2003**]…… …… .29

Figure.I.17. l'absorption des différentes composites en fonction du temps de traitement, [**Bengin M. A. Herki ,2017]**..... 30

Figure. II.1 : Analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/15 et sable)

Figure II.2: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône)……..37

Figure II.3: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams **(http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_six_exp.html)**.....40

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Figure II.4: Résistance à la compression sur cube……..47

Figure III.1. Evolution du rapport E/C en fonction du dosage en PSE. 53

Figure III .2. Evolution de la masse volumique en fonction du dosage en PSE. 54

Figure III.3. Evolution de la résistance RC en fonction du dosage en PSE à 7, 28, 56 et 90 jours. 55

Figure III.4. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 56

Figure III.5. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 56

Figure III.6. Evolution du retrait en fonction du dosage en PSE. 57

Figure III.7. Evolution du gonflement en fonction du dosage en PSE. 57

Figure III.8. Evolution de la perte de masse en fonction du dosage en PSE. 58

Figure III.9. Variations du gain de masse des bétons de PSE 59

Figure III.10. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 59

Figure III.11. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 61

Figure III.12. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 61

Les mêmes résultats trouvés pour le pourcentage d'ajouts 20%. 62

Figure III.13. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 62

Figure III.14. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE. 63

Figure III.15. Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en PSE. 63

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Sommaire

Sommaire ..... **Error! Bookmark not defined.**
Partie I ..... **Error! Bookmark not defined.**
I. Introduction 2
I.2. Bétons légers 2
I.3. Types de bétons légers 2
I.4. Classification des bétons légers 3
1.5. Avantages et inconvénients des bétons légers 3
1.5.1. Avantages techniques 3
1.5.2. Avantages de Mises En Œuvre 3
1.5.3. Avantages Economiques 4
1.6- Les inconvénients des bétons légers 4
1. 7. Les constituants du béton de granulats légers 4
I.7.1. Granulats naturels 4
I.7.2. Granulats artificiels 5
I.7.3. Granulats organiques 5
I.8. Les billes de polystyrène expansé 5
I.8. 1. Origine et composition chimique 6
I.8.2. Fabrication du polystyrène expansé 6
I.8. 3. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène 6
1. 9 . - Les liants hydrauliques 8
1. 9.1. Ajouts minéraux 9
I.9.2. Avantages d'utilisation des ajouts minéraux 10
I.9.3. Avantages fonctionnels ou d'ingénierie 10
I.9.4. Avantages économiques 10
I.9.5. Avantages écologiques et environnementaux 11
I.10. Caractère des ajouts minéraux 11
I.10.1.Ajouts minéraux : production, propriétés physiques et chimiques 12
I.10.2. La pouzzolane naturelle 12
I.10.3. Le calcaire 13
I.10.4. Le Marbre 14
I.10.5-Types de marbre [71] 15

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

I.11. Effets des ajouts minéraux 16
I.12. Effet chimique des ajouts minéraux 16
I.12.1. Ajouts hydrauliques latents 16
I.12.2. Ajouts pouzzolaniques 17
I.13. Effet de remplissage des ajouts minéraux, ou effet filler 17
I.14. Formulation des bétons légers avec ajouts minéraux 18
I.15. L'utilisation des ajouts en Algérie 18
I.16.Propriétés thermiques 19
I.17. Formulation des bétons de polystyrène expansé 20
I.18. propriétés des bétons de polystyrène expansé 21
I.18.1. Consistance 21
I.18.2. La résistance à la compression 22
I.18.3. Le retrait 26
I.18.4. Absorption 27
I.18.5. Conductivité Thermique 29
I.19. Conclusion 31
Chapitre II ..... **Error! Bookmark not defined.**
Expérimentation et Programme ..... **Error! Bookmark not defined.**
des Essais ..... **Error! Bookmark not defined.**
II.1. Introduction 32
II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés 32
II.2.1. Ajouts minéraux 33
II.2.2. Ciment 34
II.2.3. Sable 35
II.2.4. Polystyrène expansé 37
II.2.5. Pierre concassée 37
II.2.6. Eau de gâchage 37
II.3. Programme des essais 38
II.3.1. Première étape 38
II.3.2. Deuxième étape 39
Paramètres : 39
Essais : 39
II.4. Formulation des bétons 39
II.4.1. Méthode de Dreux-Gorisse (Dreux et Festa, 1998) 39
II.4.1.1. Détermination du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée 39

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

II.4.1.2. Détermination du dosage en ciment en utilisant l'abaque de la Figure II.1 qui donne le dosage en ciment C pour un affaissement au cône Af (qui est considéré comme une donnée) et un rapport C/E 40
II.4.1.3. Détermination du dosage en eau pour Dmax 40
II.4.1.4. Construction des courbes granulaires du sable et des fractions pierreuses et la courbe de référence suivant le point de brisure A de coordonnées X_A et Y_A. 40
II.4.1.5. Détermination du volume absolu des granulats dans le mélange de béton 41
II.4.1.6. Détermination des volumes absolus de chaque granulat 42
II.4.1.7. Détermination du dosage pondéral en granulats 43
II.4.2. Mode opératoire 43
II.4.3. Confection des éprouvettes 43
II.5. Méthodes d'essai sur béton 45
II.5.1. Béton frais 45
II.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams (Dupain, Lanchon & Saint Arroman, 1995) 45
II.5.2. Béton durci 46
II.5.2.1. La masse volumique 46
II.5.2.2. Résistance à la compression *Rc* 47
II.5.2.2. Vitesse des ondes soniques, NF EN 12504-4 47
II.5.2.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité 48
II.5.2.5. Variation dimensionnelle (retrait et gonflement) 49
II.5.2.2. Les propriétés thermiques 50
III.1. Introduction 52
III.2 Résultats des essais 53
III.2.1. Première étape 53
III.2.1.1. Effet de la variation du pourcentage de PSE sur le rapport E/C 53
III.2.1.2. Variations de la masse volumique des bétons de PSE 53
III.2.1.3. Variations des résistances à la compression des bétons de PSE 54
III.2.1.4. Variations des vitesses du son des bétons de PSE 55
III.2.1.5. Variations d'absorption capillaire des bétons de PSE 56
III.2.1.6. Variations retrait des bétons de PSE 57
III.2.1.7. Variations du gonflement des bétons de PSE 57
III.2.1.8. Variations de la perte de masse des bétons de PSE 58
III.2.1.9. Variations du gain de masse des bétons de PSE 58
III.2.1.10. Variations de la conductivité des bétons de PSE 59

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

III.1.11. Conclusion de la première étape 60

III.3. Deuxième étape 61

III.3.1. Variations des résistances à la compression des bétons de PSE avec 10 et 20% d'ajouts 61

III.3.2. Variations des la conductivité thermique des bétons de PSE 62

III.2.3. Variations d'absorption capillaire des bétons de PSE 63

III.3. Conclusion 64

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

INTRODUCTION GENERALE

Depuis l'apparition du concept de développement durable dans le domaine de la construction et des travaux publics, un ensemble de mesures ont donc été prises pour encourager les chercheurs, à opter de nouvelles techniques et de nouveaux matériaux de construction afin de réduire les consommations d'énergie et d'améliorer le confort de nos lieux de vie.

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 thermique, 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.

pdfelement

L'objectif de ce travail de formuler des bétons allégés par des perles de polystyrènes expansé d'une part, et d'évaluer expérimentalement l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés du béton de granulats légers (physiques, résistances mécaniques et durabilité) 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. Puis, étudier l'effet des ajouts minéraux incorporés dans les formulations de béton de PSE sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques.

Ce mémoire est constitué de trois chapitres, d'une introduction générale et d'une conclusion.

Le Chapitre 1 présente une revue de la littérature sur les bétons légers, nous exposons un aperçu détaillé sur les BL en tant que nouveau matériau. Puis en fait un survol sur les bétons de granulats légers et on expose leurs performances.

Le Chapitre 2 présente les données expérimentales sur les matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, le programme des essais réalisés, la méthode de formulation et explique brièvement les essais sur béton frais et béton durci.

Retirer le filigrane maintenant

Le Chapitre 3 présente les résultats et la discussion des résultats des essais effectués sur les bétons avec ajouts minéraux, et sur les bétons avec ajouts minéraux et adjuvant fluidifiant.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Chapitre I

Revue de la Littérature

I.1. Introduction

Le béton ordinaire est un matériau relativement simple à fabriquer dont les composantes sont bien connues. Cependant, l'arrivée de nouvelles contraintes techniques, économiques et environnementales a conduit les chercheurs à expérimenter de nouveaux matériaux au fil des années. Les bétons légers permettent de réaliser un gain de poids pour l'ouvrage auquel ils sont destinés. Ils sont également utilisés pour l'isolation thermique, la conductivité variant dans le même sens que la densité.

Dans ce chapitre, sont principalement étudiées les bétons légers à savoir définition, types et classes ainsi les propriétés physiques et mécaniques. Mais principalement les bétons de granulats légers, leurs constitutions et leurs caractéristiques du point de vue technologique et économique

pdfelement

I.2. Bétons légers

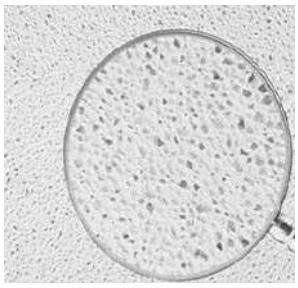
Les bétons légers sont des bétons à haute porosité et dont la masse volumique se situe dans les limites de 500 à 1800 kg/m^3. Suivant le mode de création de la porosité artificielle les bétons légers se subdivisent selon les groupes suivants : bétons légers à agrégats légers et poreux ; bétons à gros (béton caverneux), préparation avec un gros agrégat compact ou poreux d'une seule fraction sans sable; bétons cellulaires dont la structure est représentée par des cellules crées artificiellement et remplaçant les grains des agrégats. **(Komar, 1978)**. **[1]**

I.3. Types de bétons légers

Suivant le mode de création de la porosité artificielle les bétons légers se subdivisent selon les types suivants :

1- les bétons cellulaires ;
2- les bétons sans fines (caverneux) ;
3- les bétons de granulats légers (argile expansé ……;

Retirer le filigrane maintenant


Béton caverneux Béton cellulaire Béton de granulats légers

I.4. Classification des bétons légers

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

— de la masse volumique sèche, désignée par γbs ;

— de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

La masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi 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 :

1- le béton léger de structure: Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900, ce béton est utilisé pour des applications structurales avec une résistance à la compression minimale de 17 MPa. Tributaire

2- le béton léger de faible masse volumique : A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m3 n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique et pour les remplissages, $R_c < 7$ MPa.

3- le béton de résistance moyenne se situe entre les deux : Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa.

1.5. Avantages et inconvénients des bétons légers

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classés en trois catégories qui sont :

1.5.1. Avantages techniques

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1 ,8 en comparaison de 2 ,2 à 2,5 pour un béton classique.
- Isolant : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- Non inflammable : La chape en béton léger est classées M_0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

- Les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

1.5.2. Avantages de Mises En Œuvre

- Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers ;
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes);

1.5.3. Avantages Economiques

- Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau (Neville, 2000). **[2]**
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations (Neville, 2000). **[2]**
- Economie sur le ferraillage des éléments ;
- Le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire ;

1.6- Les inconvénients des bétons légers

- Résistance mécanique plus faible en général,
- Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes,
- Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût.
- L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton, sa densité et ses qualités mécaniques.

pdfelement

1. 7. Les constituants du béton de granulats légers

I.7.1. Granulats naturels

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour d es utilisations locales. La Figure I-1 présente quelques exemples de granulats naturels : Pierre ponce, la diatomite et le laitier volcanique. **[Le Hung Nguyen ,2013]**. **[3]**



Pierre ponce



Diatomite



Laitier volcanique

Retirer le filigrane maintenant

Figure I-1. Différents granulats légers naturels [Le Hung Nguyen ,2013]. [3]

I.7.2. Granulats artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie ; soit à partir de sous -produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expansé)**, [Le Hung Nguyen ,2013]**. **[4]** (Figure I-2).



Laitier refroidi à l'air / Laitier expansé / Argile expansée



Schiste expansé / Cendre volante / Polystyrène expansé

Figure I-2. Différents granulats légers artificiels [Le Hung Nguyen ,2013]. [4]

Les granulats légers artificiels fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau. Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à très haute température (1000°C à 1250°C environ), (Figure I-3). L'expansion de l'eau et la vitrification du minéral aboutissent à la formation de granulats plus ou moins sphériques, constitués d'une coque renfermant des bulles gazeuses dispersées dans une matrice. En jouant sur la marche des fours, on favorise plus ou moins l'expansion. Il apparaît alors une corrélation entre la taille moyenne des grains et leur densité absolue, les plus gros étant les moins denses.

Les granulats artificiels sont généralement assez ronds ; les argiles expansées sont lisses et les schistes sont parfois plus rugueux. Leur masse volumique en vrac varie entre 300 et 800 kg/m3.

I.7.3. Matériaux organiques

Produits organique, naturels ou artificiels, tels que liège, copeaux de bois, balle de riz, polystyrène expansé, matériaux dont l'utilisation rentre dans le cadre de valorisation

Retirer le filigrane maintenant

des déchets qui a un effet positif sur l'aspect environnemental et l'apport économique de ce type de granulats.

Le polystyrène expansé (PSE) est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires, c'est le granulat choisi pour alléger notre béton. Le PSE est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en Cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12})[**A. Laukaitis et al, 2005]. [5]**

I.8.2. Les Billes de polystyrène expansé

I.8.2.1. Origine et composition chimique

Le polystyrène expansé (PSE) est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et emballage des produits industriels ou alimentaires. [**A. Laukaitis et al, 2005]. [6]**

Le polystyrène est un thermoplastique dur, c'est un polymère vinylique. Structurellement c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone, le polystyrène est fabriqué par polymérisation radicalaire à partir d'un monomère de styrène C8H8.

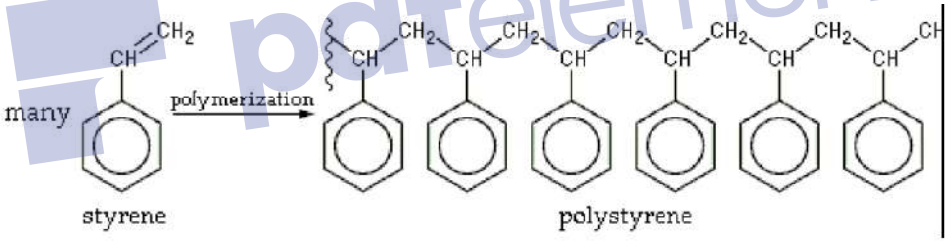


Figure I.3. Polymérisation du styrène **[Yves J ANNOT, 2008]. [7]**

I.8.2.2. Fabrication du polystyrène expansé

Le polystyrène brute est un matériau plus on moins lourds il se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée par polymérisation du styrène (perles de polystyrène cristal) additionnée d'agent porogène (pentane,C5H12) **[Yves J ANNOT, 2008]. [7]**

Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé sont :

-sa faible masse volumique ;

-Son pouvoir isolant thermique ;

-Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs) ;

Retirer le filigrane maintenant

-Son insensibilité à l'eau ;

-Sa recyclabilité.

I.8.2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène

- **Densité**

La densité du polystyrène à l'état brut voisine les 1000 kg/m3 [**Chauvin, J.J. et al, 1988**]. **[8]** Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m3.Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé. Le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air. Par exemple pour une densité de 32 kg/m3, le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de lamasse totale du polystyrène expansé. **[Yves J ANNOT, 2008]. [9]**

Généralement leur densité sèche est inférieure à 50 kg/m3.En outre, pour les granulats expansés, la densité dépend de la taille de billes : plus les billes sont grosses, plus leur densité est faible. A titre d'exemple pour ϕ =1mm la densité est de 33kg/m3, 19kg/m3pour ϕ = 2,5 mm et 17kg/m3 pour ϕ= 6,3kg/m3. **[Yang Ke, 2008].[10]**

- **Propriétés morphologique**

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques **[Yang Ke, 2008].[11]** La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau.

En effet, des essais réalisés par Yamura et al d'après **[Yang Ke, 2008],[11]** ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant, un mois n'ont pas absorbé d'eau.

Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

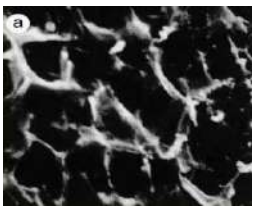


Figure I.4. Microstructure d'une bille EPS **[B. Mario et al,** 1984]**[10]**

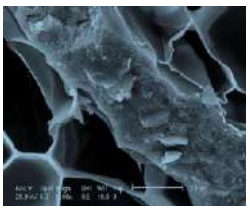


Figure I.5. Photo au MEB montrant les Billes de polystyrène et la matrice cimentaire (photo Berthelot : PCM - LCPC), **[Yang Ke, 2008].[11]**

- **Résistance à la chaleur**

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Le polystyrène expansé connaît un début de ramollissement et de déformation à une température de 100°c.

- **Résistance en compression du polystyrène**

La résistance à la compression du polystyrène dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense plus sa résistance est grande, mais à cause de sa flexibilité le polystyrène se comporte d'une manière assez complexe, [**Y. J ANNOT, 2008**]. **[12]**

Le tableau I.1 donne quelques valeurs de la résistance en compression du polystyrène expansé selon sa densité et pour une déformation de 10% selon la norme NF-T56-201 [**Y. J ANNOT, 2008**]. **[12]**

Tableau I.1: Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité [**Y. J ANNOT, 2008**]. **[12]**

Référence	ClasseQ1	ClasseQ2	ClasseQ3	ClasseQ4	ClasseQ5
Masse volumique (kg/m3)	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

Les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables devant celles de la matrice cimentaires. En effet, ces billes ont un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une résistance en de compression de l'ordre de 80 kPa [**Yang Ke,** 2008]. **[12]**

pdfelement

- **Conductivité thermique**

Le polystyrène est un matériau très réputé par ces performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5cm entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. Sachant que la mousse de PSE est constituée de 98 % d'air et de 2 % de polystyrène en volume, le bon coefficient d'isolation thermique est dû à la présence d'air emprisonné dans les cellules [**A.Laukaitis et al, 2005**]. **[13]** En général elle varie entre 0.027 à 0.037 W.m-1.K-1 Ces valeurs leurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux **[D.George et al, 1998]**. **[14]**

1.9 .1- Les liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des poudres minérales qui ont la propriété de réagir au contact de l'eau et de former des hydrates. Déjà il y a deux mille ans, les Romains avaient découvert le ciment lorsqu'ils s'aperçurent que la chaux résultant de la décarbonatation des calcaires, mélangée avec l'eau et des pouzzolanes (terres volcaniques faites de silice et d'alumine) donnait un mortier qui durcissait (**Tapit- Hamou, 1995**). **[15]**

Retirer le filigrane maintenant

Le ciment Portland demeure le liant hydraulique le plus utilisé au monde. Est composé de chaux (Cao), de fer (Fe_2O_3), de silice (SiO3, d'alumine ($A1_2O_3$), de gypse ($CaSO_4 2H_2O$) et de magnésie (MgO). En plus du gypse, le ciment Portland est constitué de quatre principales composantes : l'alite (C_3S) et la bélite (C_2S) combinées à une phase interstitielle de (C_3A) et de (C_4AF) appelée autrefois célite. Au contact de l'eau le ciment s'hydrate : c'est l'hydratation. Le processus d'hydratation, lent et progressif, est accompagné d'une perte progressive de plasticité jusqu'au durcissement complet de la pâte de ciment. Depuis quelques années, d'autres types de liants sont de plus en plus utilisés tels les ajouts minéraux. Ces ajouts sont employés en complément au ciment Portland, puisqu'ils confèrent au béton une bonification de certaines de ses propriétés.

Tous les genres de liants sont employés pour la préparation des bétons légers. Le choix d'un liant convenable dépond des facteurs suivants :

- Résistance requise du béton,
- Stabilité nécessaire dans les conditions données de l'ambiance,
- Régime de durcissement et autres.

1. 9 .2. Ajouts minéraux

Dans le domaine de génie civil, le terme ***ajout*** fait référence à n'importe quel élément autre que l'eau, les agrégats et le ciment, utilisé comme constituant du béton et ajouté à la gâchée immédiatement avant ou pendant le malaxage **(Malhotra & Mehta, 1996)**. **[16]**

Les ajouts minéraux **(Neville, 2000) 17]**également appelés : ajouts cimentaires **(Neville, 2000; Aïtcin, 2001)**, **[17]** fines complémentaires ou additions minérales, etc. sont des poudres minérales, soit élaborées par concassage de matières premières (naturelles) ou de sous produits industriels, soit directement récupérées dans des dépoussiéreurs industriels. Ces fines sont de granulométrie voisine de celle du ciment, voire plus fines. Elles peuvent soit avoir un caractère hydraulique latent, soit avoir un caractère pouzzolanique, soit être inertes chimiquement. Dans tous les cas, du fait de leur finesse, ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis de la compacité du squelette, c'est le rôle de remplissage **(Chanvillard, 1999)**. **[18]** Leurs particules très finement divisées peuvent être déjà contenues dans le ciment ou simplement être rajoutées dans le béton lors de son malaxage **(Aïtcin, 2001 ; De Larrard, 2002)**. **[19]** Ils sont utilisés comme remplacement du ciment et/ou les granulats (fins, fins et grossiers) dans le béton **(Malhotra & Mehta, 1996)**. **[20]**

Un ajout minéral qui est désigné par 'addition minérale' dans la norme européenne **EN 206-1** (NF P18-325-1) "Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et

Retirer le filigrane maintenant

conformité", est définit comme le "matériau minéral finement divisé et pouvant être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières". Cette norme divise les additions en deux types: additions quasiment inertes (type I) et les pouzzolanes ou additions à caractère hydraulique latent (type II). **(Newman & Choo, 2003) [21]**

I.9.2.1. Avantages d'utilisation des ajouts minéraux

D'après **Malhotra et Mehta (1996)**, **[22]** généralement, les avantages tirés de l'utilisation des ajouts minéraux dans les industries de ciment et de béton peuvent être divisés en trois catégories: avantages fonctionnels ou d'ingénierie, avantages économiques et avantages écologiques.

I.9.2.2. Avantages fonctionnels ou d'ingénierie

L'incorporation de particules finement divisées d'ajouts minéraux dans un mélange de béton a tendance à :

- améliorer la maniabilité ;
- réduire la demande en eau pour une consistance donnée (excepter pour les matériaux avec une surface spécifique très élevée - ajouts d'une grande finesse -, comme la fumée de silice) ;
- améliorer la résistance ultime (propriétés mécaniques) ;
- améliorer l'imperméabilité ;
- améliorer la durabilité face aux attaques chimiques ;
- diminuer la chaleur d'hydratation dégagée par le béton, d'où diminution de la fissuration d'origine thermique, etc.…

pdfelement

I.9.2.3. Avantages économiques

D'une part, le ciment Portland représente le composant le plus cher d'un mélange de béton, et comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, les coûts d'énergie se reflètent dans le coût du ciment.

D'autre part, la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits d'autres procédés industriels comme la sidérurgie et les centrales thermiques, et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation, et qui exigent relativement peu ou pas de dépense d'énergie pour être utilisés comme ajouts minéraux.

Donc, l'utilisation des ajouts minéraux en remplacement partiel du ciment peut aboutir à des économies substantielles dans l'énergie et dans les coûts de production, ce qui se reflète dans le prix du béton.

Retirer le filigrane maintenant

1.10. 1.Ajouts minéraux

Parmi les ajouts minéraux les plus communément utilisés mondialement on retrouve le laitier de haut fourneau, la cendre volante, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle et le calcaire. Ceux utilisés dans les cimenteries algériennes sont principalement le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle et le calcaire, vu leur disponibilité sur le territoire national.

1.10.2. La pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes, sont les matériaux possédant un caractère pouzzolanique. Généralement, les pouzzolanes peuvent être subdivisées en matériaux naturels et artificiels (sous-produit). Les premiers comme leur nom l'indique sont des roches naturelles et leurs traitements sont d'habitude limités au concassage, broyage, et tamisage. De tels matériaux incluent les cendres volcaniques et les dépôts de lave (par exemple les verres volcaniques et les tufs volcaniques) et sont connus, par conséquence, comme 'les pouzzolanes naturelles'. Un autre type de pouzzolane naturelle est la terre à diatomées, c'est-à-dire une terre qui est principalement composée des squelettes siliceux de diatomées déposés de l'eau fraîche ou de mer. Les argiles et les schistes qui sont des roches sédimentaires ne possèdent pas de propriétés pouzzolaniques. Cependant, quand ils sont traités thermiquement à des températures de 600-900°C, de tels matériaux deviennent pouzzolaniques et sont appelés 'pouzzolanes calcinées'. Les pouzzolanes calcinées sont en réalité des pouzzolanes artificielles, mais d'habitude ils sont groupés avec les pouzzolanes naturelles. Comme mentionné plus tôt, le deuxième groupe de pouzzolanes, sont des sous-produits de procédés industriels. Les matériaux les plus communs de ce groupe sont la cendre volante et la fumée de silice **(Soroka, 1993)**. **[24]**

La pouzzolane naturelle utilisée dans notre travail est une roche d'origine volcanique essentiellement composé de silice, (SiO_2) d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3) avec un pourcentage dépassant 70%. Elle est disponible en Algérie dans des gisements situés dans la région de Béni Saf à l'ouest Algérien, avec une composition chimique type (voir **Tableau I.2**) et une composition minéralogique type (voir **Tableau I.3**). **(Ghrici, Kenai & Meziane, 2006) [25]**

Tableau I.2: Composition chimique type de pouzzolane naturelle algérienne **(Ghrici et al., 2006) [25]**

Retirer le filigrane maintenant

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	CaO(free)	SO_3	IR*	LOI**
Pozzolana	46.86	16.62	9.37	9.38	2.84	–	0.36	–	5.79

* Insoluble residue

** Loss on ignition

Tableau I.3: Composition minéralogique type de pouzzolane naturelle algérienne **(Ghrici et al., 2006) [25]**

Mineral	Plagioclase	Augite	Analcine	Chlorite	Haematite	Glass content	Other
Percentage	40	15	12	6	8	14	8

Il est indispensable que la pouzzolane soit sous forme finement broyée, car seul cet état permet à la silice de se combiner avec l'hydroxyde de calcium (produit par l'hydratation du ciment portland) en présence d'eau pour former des silicates de calcium stables ayant des propriétés hydrauliques. La silice doit être amorphe, c'est-à-dire vitreuse, étant donné que la silice cristallisée a une très faible réactivité. **(Neville, 2000) [26]**

Car, ce n'est pas essentiellement la composition chimique, mais plutôt les caractéristiques minéralogiques et granulométriques qui déterminent, comment un ajout minéral influence les propriétés technologiques importantes du béton, comme l'ouvrabilité, la résistance, et l'imperméabilité. **(Malhotra & Mehta, 1996) [27]**

pdfelement

1.10.3. Le calcaire

Le calcaire est une roche sédimentaire formée essentiellement de carbonate de calcium $CaCO_3$ **(Le Petit Larousse, 2010). [28]**

Le calcaire a été longtemps utilisé dans la fabrication des ciments comme matière première. Il a aussi été utilisé comme constituant des ciments composés et comme ajout aux mortiers ou aux bétons, afin de corriger la granulométrie, et d'augmenter la compacité, et aussi pour économiser de l'énergie et réduire le coût de production du ciment. **(Venuat, 1989) [29]**

Le calcaire finement broyé est souvent dénommé filler calcaire, en référence à son rôle essentiel de remplissage de la granulométrie (' to fill ' en anglais signifie ' remplir '). Néanmoins, l'effet filler ne permet pas à lui seul d'expliquer la contribution observée de cet ajout aux performances mécaniques du béton (l'effet filler se manifeste lorsqu'un béton manque de fines pour être un empilement de compacité optimale. Par suite, l'ajout d'une fine complémentaire permet de réduire le dosage en eau à même ouvrabilité et donc augmente la

Retirer le filigrane maintenant

compacité). Plusieurs pistes sont à l'étude qui relèvent plus d'un aspect physique, annoncent que, lors de la réaction d'hydratation du ciment, les hydrates se développent (en parle de germination) sur un support. Ce support est dans un béton ordinaire le grain de clinker lui-même. Il se produit donc un bouclier d'hydrates autour de chaque grain de clinker qui à terme modifie la cinétique de la réaction et l'homogénéité de la distribution spatiale des hydrates. Les additions calcaires viendraient jouer le rôle de support pour les hydrates, libérant de fait momentanément les grains de clinker. A court terme, la réaction est alors plus rapide et plus homogène. Cet effet peut cependant s'atténuer lorsque la réaction arrive à terme. Notons que cet aspect de support pour la germination existe probablement aussi dans le cas des fines telles que les cendres volantes. **(Chanvillard, 1999) [30]**

1.10.4. Le Marbre

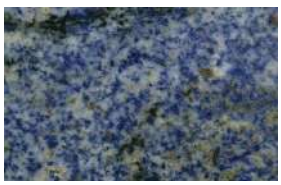
En géologie, le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire et constituée principalement de cristaux de calcite ($CaCO_3$). Selon A. KOMAR, les marbres sont des roches cristallines formées de calcaires ou dolomites. Leurs cristaux sont soudés ensemble sans ciment. La résistance des marbres atteint 300MPa. Leurs dureté est faible, de 3,0 à 3,5 et ils se prêtent facilement au sciage et au polissage. **(Komar, 1978). [33]**

Existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent). Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte.

pdfelement



Marbre rose



Marbre bleu

Le marbre est donc une roche métamorphique ayant subie des pressions et des températures élevées liées soit à un enfoncement dans le sous sol, soit mis en contact avec une roche éruptive.

Le marbre se différencie par :

- Son % en carbonate de calcium et de magnésium
- Sa couleur donnée par les oxydes métalliques présents au moment de la transformation
- Ces veinures (présence de matières organiques) caractéristiques du gisement d'extraction
- Son lieu de production

Retirer le filigrane maintenant

Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7.

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

Les produits marbrières algérienne sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procèdes utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières.
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponces.

1.10.5-Types de marbre

Les différents types de marbre Algériens qu'on peut trouver :

- Marbre blanc - marbre gris - marbre reseda vert : carrière de marbre de Fil-Fila
- Marbre rouge - marbre jaune et rose : gisement de marbre de Krystel
- Marbre Mahouna : la carrière de marbre de Mahouna
- Marbre onyx dore : filon d'onyx de Ain Smara
- Marbre onyx jaune : carrière de Bouhnifia
- Travertin : carrière de Sidi M'barek
- Tarbre blanc et vert : carrière de Honaine (Tlemcen).

pdfelement

1.14. Formulation des bétons avec les ajouts minéraux

Dans la formulation des bétons avec ajouts minéraux, les ajouts minéraux sont ajoutés au béton comme une partie du système cimentaire total. Ils peuvent être utilisés en plus de, ou comme remplacement partiel du Ciment Portland ou du Ciment Composé dans le béton, selon les propriétés des matériaux et l'effet désiré sur le béton. **(Kosmatka, Kerkhoff & Panarese, 2002) [41]**

Les quantités optimales d'ajouts minéraux utilisés avec le Ciment Portland ou le Ciment Composé sont déterminées par essai, par le coût relatif et la disponibilité des matériaux, et par les propriétés spécifiées du béton. **(Kosmatka et al., 2002) [42]**

Retirer le filigrane maintenant

Par exemple quand les ajouts minéraux sont utilisés pour améliorer une propriété particulière du béton, comme la résistance à la réactivité alcali-granulats. La quantité optimale à utiliser devrait être établie par essai pour déterminer (1) si le matériau améliore en effet la propriété et (2) le dosage correct, vu qu'un surdosage ou un sous-dosage peut être nuisible ou ne réalise pas l'effet désiré. Les ajouts minéraux aussi réagissent différemment avec les différents ciments. **(Kosmatka et al., 2002) [42]**

1.15. L'utilisation des ajouts en Algérie

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Béni – Saf. Le (tableau III.4) donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Tableau I.4 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes

Cimenterie	**Ajouts Utilisés**
Ain Touta	Laitier + calcaire
Ain El Kebira	Laitier + pouzzolane
Biskria	Calcaire + pouzzolane
Hamma Bouziane	Laitier + pouzzolane
Tebessa	Laitier
Metah	Tuf + Calcaire
Chlef	Calcaire
Béni Saf	Pouzzolane

pdfelement

1.16.Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux en présence d'un ou plusieurs types d'échange thermique. Le transfert thermique à travers un milieu s'effectue selon trois modes de transfert : conduction, convection, et rayonnement.

La conductibilité thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses

Retirer le filigrane maintenant

deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductibilité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise du liant. Or l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à granulats légers permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (la porosité), en y ajoutant l'air intra-particule (c.à.d. du granulat). A titre comparatif, un béton hydraulique (ρ = 2300 kg/m3) a une conductibilité thermique de 2.0 W/(m.K), tandis qu'un béton d'argile expansé (ρ = 1600 kg/m3) a une conductibilité thermique de 0.6 W/(m.K). **[M. MERZOUD, 2007].[43]**

Un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en (J.kg-1.K-1). 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. Il sera donc moins sensible aux variations de température du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte énergie 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. Enfin, à partir de la conductivité thermique λ et de la chaleur massique C, on définit la diffusivité a (m2 s-1)). Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de a est faible, plus la chaleur met du temps à traverser le matériau.

Le tableau suivant permet de comparer des caractéristiques thermiques de quelques matériaux.

Tableau .1.5 : Conductivité thermique de quelques matériaux **[YVES J, 2008.] [44]**

Matériaux	**Conductivité thermique**
Air	0.025
Eau	0.6
Ciment Portland	0.29
Béton	1.7
Parpaing béton	1.05
Mortier béton	1.5
Brique creuse	0.45
Bois	0.04- 0.4
Brique pleine	1.16
Liège	0.046
Verre cellulaire	0.050 – 0.63
Granulat de verre	0.06 – 0.11
Brique à alvéoles	0.149

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Béton cellulaire	0.13
Béton de fibre de bois	0.10 – 0.15
Polystyrène expansé	0.039

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Chapitre II

Expérimentation et Programme des Essais

II.1. Introduction

Dans ce chapitre sont rapportées les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans ce travail, le programme des essais effectués, la méthode de formulation de béton allégé, ainsi que les méthodes d'essai sur béton frais et béton durci.

II.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

II.2.1. Ajouts minéraux

Les deux ajouts minéraux étudiés dans ce mémoire sont : un ajout calcaire (Ca), et un ajout de marbre (M) ; qui ont été broyés puis passés au tamis 90µm.

Le calcaire* provient d'un gisement situé à hammame Si-Elhadj wilaya de Biskra le sud est de l'Algérie.

(*: fournie par la cimenterie de la farge Cilas Biskra).

pdfelement

II.2.2. Ciment

Le ciment utilisé pour la présente étude est du ciment portland composé CPA-CEM I 42.5 produit par la cimenterie de la société BISKRIA CIMENT situé à Branis wilaya de BISKRA, ALGERIE.

Les principales caractéristiques physiques, la composition chimique et la composition minéralogique de ce ciment sont récapitulés dans les **Tableaux II.3**, **II.4** et **II.5** respectivement.



Photo II.2. Ciment CPA- CEM I 42.5

Retirer le filigrane maintenant

Tableau II.3: Caractéristiques physiques du ciment

Ciment	Désignation	Masse volumique absolue (Kg/m^3)	Surface spécifique Blaine (cm^2/g)
CEM I 42.5	C	3150	3020

Tableau II.4: Composition chimique du ciment

Teneur %									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl	P.A.F
21,62	4,49	5,37	63,9	1,7-2,8	2.2-2.6	0,25	0,08	0.02 -0.05	1.0 -1.9

Tableau II.5: Composition minéralogique du ciment CPA-CEM I 42.5 selon Bogue

Teneur %			
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
56-66	5.0-15	1.4-3.0	10-15

pdfelement

II.2.3. Sable

Le sable utilisé pour toutes les formulations de cette étude, est un sable de rivière de la région d'El-Baaj, est une zone située entre les wilayas d'Oued Souf et de Biskra, Algérie.



Photo II.3: Sable d'el-baaj

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique du sable sont présentées dans les **Tableaux II.6** et **II.7**.

Retirer le filigrane maintenant

Tableau II.6: Caractéristiques physiques du sable

Propriétés		Sable
Masse volumique absolue, kg/m3		2540
Masse volumique apparente, kg/m3		1770
Module de finesse		2.78
Equivalent de sable (%)	Esv	66.330
	Esp	59.300

II.2.4. Polystyrène expansé

Les billes de polystyrènes expansés utilisés dans notre étude ont été fournies par la société L'EPE/Spa SOFATPO est une filiale du groupe EAGR (Entreprise Nationale de Génie Rural), son siège social et son unité de production sont situés au niveau de la zone industrielle de Oued Smar, Algérie.

Le polystyrène expansé est obtenu par polymérisation du produit de base qui est **le STYRENE** (granulé translucide).



Photo II.3: Les billes de polystyrène PSE

Ces granulats se présente sous forme de billes sphériques de petit diamètre (1 à 2 mm), contenant 98% d'air et peu de consommateur de matière première, le polystyrène ne contient ni gaz CFC, ni HFC, ni HCFC.

Retirer le filigrane maintenant

- **La densité :** la masse volumique apparente ρ_{app} = 20 Kg/m^3 et la masse volumique absolue ρ_{abs} = 30 Kg/m^3 .
- **Absorption d'eau par immersion :** en raison de sa structure à cellules fermées, le polystyrène est caractérisé par sa faible absorption de l'eau.
- **Tenue à la chaleur :** le polystyrène expansé se ramollit à partir d'une température 90°C.

II.2.5. Pierre concassée

De nature calcaire, elle provient de la carrière de MON GUORNO de la région de berrouaguia (médéa), Algérie, avec deux fractions granulaires de 3/8 mm et 8/16 mm.



Photo II.4: gravier 3/8 et 8/16

pdfelement

Les caractéristiques physiques et l'analyse granulométrique de la pierre concassée sont présentées aux **Tableaux II.9**, **II.10** et **II.11**.

Tableau II.9: propriétés physiques de la pierre concassée

Propriétés	Pierre concassée		Observations
	Fraction 3/8	Fraction 8/16	
Masse volumique absolue, kg/m^3	2.257	2.585	
Masse volumique apparente, kg/m^3	1.380	1.350	
Coefficient d'absorption, (%)			
Coefficient Los Angeles, (%)	19.92	26.50	Dure

Tableau II.10: Analyse granulométrique de la pierre concassée, fraction 3/8

Retirer le filigrane maintenant

Tamis, (mm)	Refus cumulés		Tamisât (%)
	(g)	(%)	
8	1.99	0.095	**99.90**
6.3	199.1	9.95	**90.05**
5	689.9	34.49	**65.505**
4	1253.4	62.56	**37.34**
3.15	1641.5	82.07	**17.925**
2.5	1895.5	94.975	**5.025**
1	**1989.3**	**99.465**	**0.535**

Tableau II.11: Analyse granulométrique de la pierre concassée, fraction 8/16

Tamis, (mm)	Refus cumulés		Tamisât (%)
	(g)	(%)	
16	5	0.16	99.83
12.5	569.6	18.98	81.01
10	1989.5	66.31	33.68
8	2678.5	89.28	10.71
6.3	2954.9	98.496	1.503
5	2991.0	99.7	0.3

pdfelement

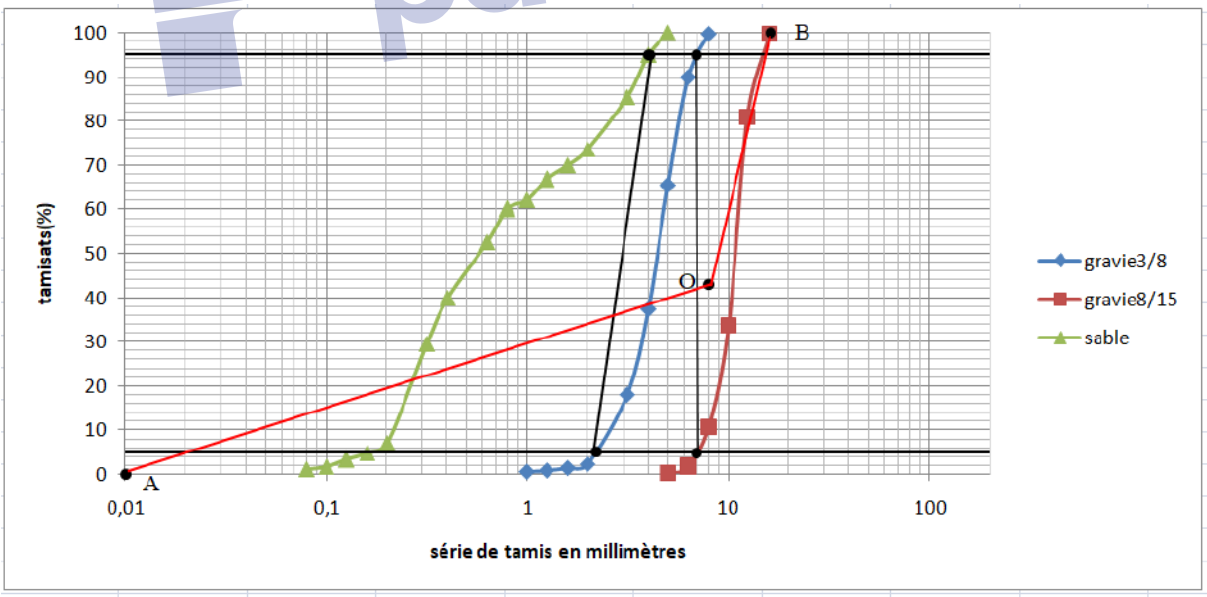


Figure. II.6 : Analyse granulométrique des granulats (GN 3/8, GN 8/15 et sable)

II.2.6. Eau de gâchage

Retirer le filigrane maintenant

L'eau de gâchage utilisée au cours des essais est une eau potable du robinet à une température 20±2°C de laboratoire de génie civil de l'université de MEDEA., exempte d'impuretés, conforme à la norme [NFP 18-303] [4].

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.3. Programme des essais

L'étude de l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi thermique des bétons, a été conduite en deux étapes. Chaque étape comprend : les paramètres pris en compte, les essais effectués sur béton frais et béton durci, ainsi que les résultats escomptés.

II.3.1. Première étape

1. **Paramètres :**
   - La méthode de formulation est celle de Dreux-Gorisse ;
   - Dosage de ciment : 400 kg/m^3 ;
   - le taux de substitution en polystyrène expansé PSE: 5%, 15, 25%,35%, 45% et 100%.
2. **Essais :**

- Béton frais :
  - Consistance : Affaissement au cône d'Abrams Af.
- Béton Durci :
  - Masse Volumique ;
  - Absorption ;
  - Retrait et gonflement ;
  - Résistance à la compression mesurée sur éprouvettes cubiques (10x10x10 cm) à 7, 28, 90 jours d'âge;
  - Résistance à la traction par flexion mesurée sur éprouvettes prismatiques (10x10x40 cm) à 7, 28, 90 jours d'âge ;
  - Résistance à la flexion mesurée sur éprouvettes prismatiques (10x10x40 cm) à 7, 28, 90 jours d'âge ;
  - Module d'élasticité dynamique ;
  - Conductivité thermique ;
  - Résistivité thermique.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

II.3.2. Deuxième étape

1. **Paramètres :**
   - Deux ajouts minéraux (Ca, Ma) avec différentes finesses ;
   - Deux pourcentages d'ajouts minéraux (10, 20%) ;
   - La méthode de formulation est celle de Dreux-Gorisse ;
   - Dosage de ciment : 400 kg/m^3
   - le taux de substitution en polystyrène expansé PSE: 5%, 15, 25%,35%, 45% et 100%.
2. **Essais :**

Les mêmes essais sont procédés afin d'examiner l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés des bétons de polystyrène expansé.

II.4. Formulation des bétons

Lorsqu'on mélange du ciment, du sable, du gravier et de l'eau, on obtient un béton. Mais on peut obtenir une infinité de bétons, en faisant varier les proportions des constituants ; et il est certain que parmi ces bétons, tant par leur nature propre qu'en raison du travail à exécuter, certains seront franchement mauvais, d'autres seront acceptables, d'autres enfin (les moins nombreux) seront bons. **(Lanchon, 1977)**

Les méthodes d'études de composition de bétons ont donc pour but, à partir de constituants données, de déterminer la composition d'un bon béton en vue d'un travail déterminé. **(Lanchon, 1977)**

Le choix des constituants d'un béton et de leurs proportions est aussi appelé « formulation d'un béton ». **(Neville, 2000)**

La méthode de formulation du béton choisie pour notre étude est celle de Dreux-gorisse, l'allègement de ce béton réalisé par la substitution volumique des pourcentages en sable par les billes de polystyrène expansé. On a fait varier le remplacement volumique en PSE de 5%, 15%, 25%, 35%, 45% et 100% .

II.4.2. Mode opératoire

Le malaxage des bétons élaborés au laboratoire a été effectué dans un malaxeur à cuve verticale tournante d'une capacité de 56 L. Il est prudent d'humidifier la bétonnière avant la

Retirer le filigrane maintenant

première gâche, les gâches s'articulent selon la procédure de gâchage en suivant les étapes suivantes:

- 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 ;



Photo II-5: Le malaxage des bétons au laboratoire

pdfelement

II.4.3. Confection des éprouvettes

Après homogénéisation du matériau frais, celui-ci est mis en place par vibration, sur table vibrante, dans des moules de dimensions choisies conformément à la norme NF P.18-400 [13].

Pour chaque essai et une composition donnée, trois échantillons ont été préparés et conservés avant et après démoulage en salle de conservation à température et hygrométrie contrôlées (20±2°C, HR=98%), pendant 28 jours. Avant les essais physico-mécaniques et thermique, les échantillons ont été séchés jusqu'à masse constante dans une étuve à 105±2°C.

Pour les essais de retrait et de Variation Dimensionnelle Extrêmes, les échantillons ont été munis à leurs extrémités de plots métalliques.

Retirer le filigrane maintenant

II.5. Méthodes d'essai sur béton

II.5.1. Béton frais

II.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams



Photo II.6: Essai d'affaissement au cône d'Abrams

Cet essai sert à déterminer la consistance des bétons c.-à.-d. caractériser par une valeur numérique la plus ou moins grande difficulté rencontrée dans la mise en œuvre (malaxage, transport et mise en place) des bétons.

L'appareil de mesure de l'affaissement est composé d'un moule en acier de forme tronconique et sans fond, une tige de piquage, d'un portique de mesure, et d'une surface d'appui.

pdfelement

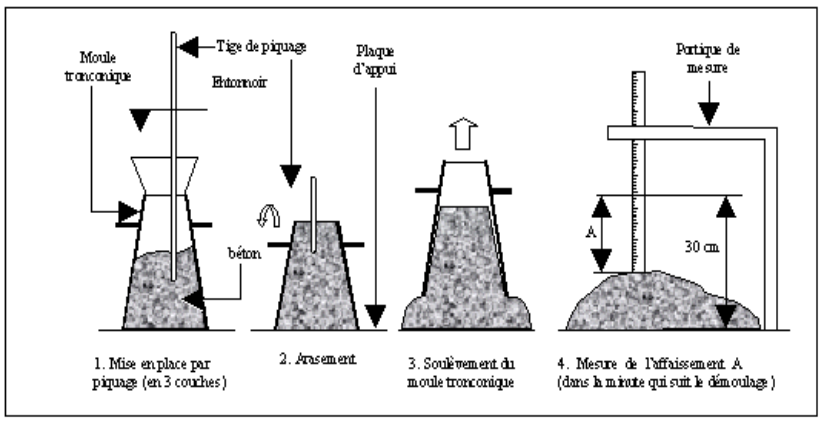


Figure II.2: Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams
(http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_six_exp.html)

Selon la norme NFP 18-451, après avoir huilé le moule, il est fixé sur la surface d'appui légèrement humidifiée. Le béton est ensuite introduit dans le premier tiers du moule, et vibré en appliquant 25 coups de tige. L'opération est recommencée pour le deuxième tiers du

Retirer le filigrane maintenant

moule, le béton est de nouveau vibré 25 fois avec la tige en pénétrant la couche précédente. Le dernier tiers du moule est remplit généreusement et piqué 25 fois puis araser en faisant rouler la tige sur le dessus du moule. Le cône de béton est délicatement démoulé, celui-ci s'affaisse sous son propre poids selon sa consistance. Celle-ci est caractérisée par cet affaissement, noté ***A***, et dont la lecture est procédé dans la minute en mesurant la distance entre le point haut du béton et le portique de mesure.

Suivant la valeur de son affaissement ***Af*** un béton peut être ferme, plastique, très plastique ou fluide.

Tableau II.20 : Consistance du béton suivant l'essai d'affaissement au cône d'Abrams **(Dupain et al., 1995)**

Affaissement au cône ***Af***	Consistance	Désignation (Norme NF P 18-305)	Classe (Norme ENV 206)
De 1 à 4 cm	Ferme	F	S1
De 5 à 9cm	Plastique	P	S2
De 10 à 15 cm	Très Plastique	TP	S3
Supérieur à 16 cm	Fluide	F	S4

pdfelement

II.5.2. Béton durci

II.5.2.1. La masse volumique

La masse volumique sèche du composite a été évaluée par pesée, à l'aide d'une balance à 0.01 g près, et mesure des 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.



Photo II-7: La balance

Retirer le filigrane maintenant

II.5.2.2. Résistance à la compression *Rc*



Photo II.8: Essai de compression sur cube de (10x10x10) cm

Selon la norme NF P 18-406 l'*essai de compression* consiste à soumettre une éprouvette de béton de forme cylindrique (16 x 32) à une charge axiale croissante de compression jusqu'à la rupture, entre les plateaux d'une presse ; et cela pour déterminer la résistance à la compression ***Rc*** (en MPa)**,** qui est le rapport entre la charge de rupture ***F*** (en N) et la section transversale ***S*** (en mm²) de l'éprouvette .

$$Rc = F / S$$

Dans notre travail la résistance à la compression est mesurée sur éprouvettes de forme cubique de 10x10x10 cm.

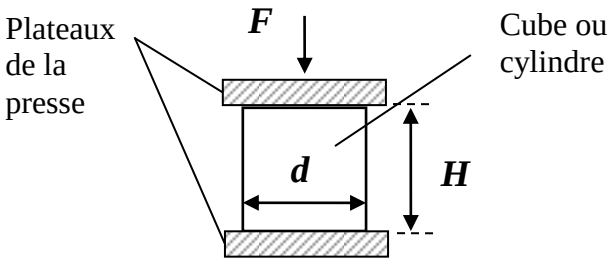


Figure II.3: Résistance à la compression sur cube

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

II.5.2.2. Vitesse des ondes soniques, NF EN 12504-4

La vitesse de propagation des ondes sonores a été évalue selon la norme **NF EN 12504-4.**
Le principe du méthode, consiste de générer un train d'ondes longitudinales produit par un transducteur électro-acoustique maintenu au contact d'une surface du béton soumis à l'essai. Après avoir parcouru une longueur connue dans le béton, le train de vibrations est converti en signal électrique par un deuxième transducteur, et des compteurs électroniques de mesure du temps permettent de mesurer le temps de parcours de l'impulsion.



Photo .9: La mesure de vitesse des ondes à l'aide d'ultrason

pdfelement

La vitesse de propagation du son à travers le béton est déterminée par la formule suivante :

$$V = \frac{L}{T}$$

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.

II.5.2.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure d'absorption de l'eau de béton, on prend les éprouvettes de béton (cubiques 10×10x10 cm) déjà sécher et on le pesé (m_0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau de profondeur et de suivre l'évolution de la masse de ces éprouvette au cours du temps. La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein (Photo. **II.6**), pendant chaque intervalle de temps (60s, 5min, 10min, 20min, 30 min ,1 h, 2h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), le différent de poids c'est le poids de l'eau absorbé (mim0) (ASTM C1585 – 11).

Retirer le filigrane maintenant

Les essais sont réalisés dans les conditions de laboratoire (T= 20 ± 2°C).



Photo II.10 : La mesure de l'absorption capillaire.

II.5.2.5. Variation dimensionnelle (retrait et gonflement)

Mesure des variations de longueur

Selon la norme NFP 15-433, la mesure du retrait de séchage et le gonflement a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 7x7x28 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 béton sont mesurés du 1j jusqu'à 60j La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 20°C ±2**.**

pdfelement



Photo II.11 : La mesure à l'aide de retractomètre

II.5.2.2. Les propriétés thermiques

Retirer le filigrane maintenant

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. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesuré à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme ISO 8497-1**.**

- **Le CT- METRE Norme de référence NF EN 993-15**

Le CT Mètre est un appareil permettant de mesurer la conductivité thermique de matériaux. Sa simplicité d'utilisation et sa taille réduite en font un accessoire portable unique, très pratique pour effectuer les mesures sur le terrain.



Photo II.12: Le CT-METRE

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

Désignation des bétons

Les différents composites de béton avec ou sans polystyrène et ajouts minéraux sont désignés de la façon suivante :

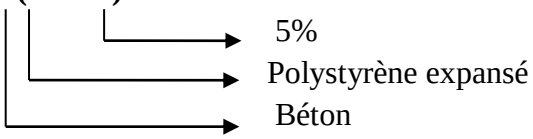
a) Bétons sans polystyrène, ni ajouts

BT
- Témoin
- Béton

b) Bétons avec de polystyrène expansé (5%, 15%, 25%, 35% et 45%)

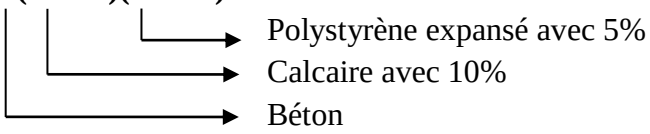
Retirer le filigrane maintenant

B(PSE-5)

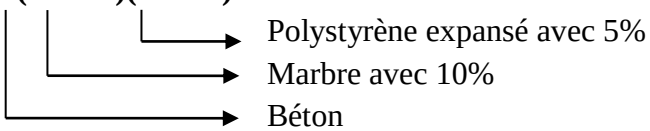


c) Bétons avec polystyrène et ajouts minéraux (10% et 20%)

B(Ca-10)(PSE-5)



B(Ma-10)(PSE-5)



pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Chapitre III

Résultats et Discussions

3.1. Introduction

Dans ce chapitre sont présentés les résultats des essais conduits sur bétons frais et durci, énoncés dans le chapitre précédent, en suivant le programme des essais.

L'objectif de l'étude expérimentale est de caractériser l'évolution des propriétés rhéologiques, mécaniques et thermiques du matériau étudié, incorporant certains pourcentages de PSE, puis certains pourcentages d'ajouts minéraux. Dans ce but, nous étudions dans un premier temps l'effet des remplacements du sable par les billes de PSE sur l'évolution de la consistance, de la masse volumique, sur la résistance à la compression et sur le comportement hydrique, et dans un second temps, l'effet des ajouts minéraux incorporés dans les formulations de béton de PSE avec ajouts minéraux sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques.

pdfelement

3.2 Résultats des essais

3.2.1. Première étape

3.2.1.1. Effet de la variation du pourcentage de PSE sur le rapport E/C

Afin de formuler un béton plastique nous avons fixés l'affaissement au cône d'Abrams Aff = 7cm. L'incorporation des billes de polystyrène expansé dans les mélanges de béton, avec des pourcentages de 5, 15, 25, 35, 45 et 100% par la substitution du volume des granulats fins, engendre une variation du rapport E/C.

Les variations du rapport E/C des bétons légers à base de ciment CPA-CEM I 42.5, avec un dosage fixe de ciment 400 kg/m3 par la méthode de Dreux-Gorisse, sont représentées sur la Figure 3.1.

Retirer le filigrane maintenant

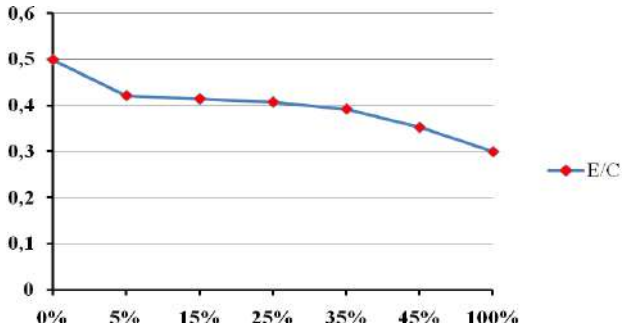


Figure 3.1. Evolution du rapport E/C en fonction du dosage en PSE.

On constate sur la Figure 3.1 que le rapport E/C des bétons de PSE frais décroit en fonction de l'augmentation de la substitution de sable par les billes de PSE avec une diminution de 17%, on peut donc noter qu'une 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.

pdfelement

3.2.1.2. Variations de la masse volumique des bétons de PSE

Sur la Figure 3.2, on suit la variation de la masse volumique des composites formulés par la méthode de Dreux-Gorisse, à 28 jours.

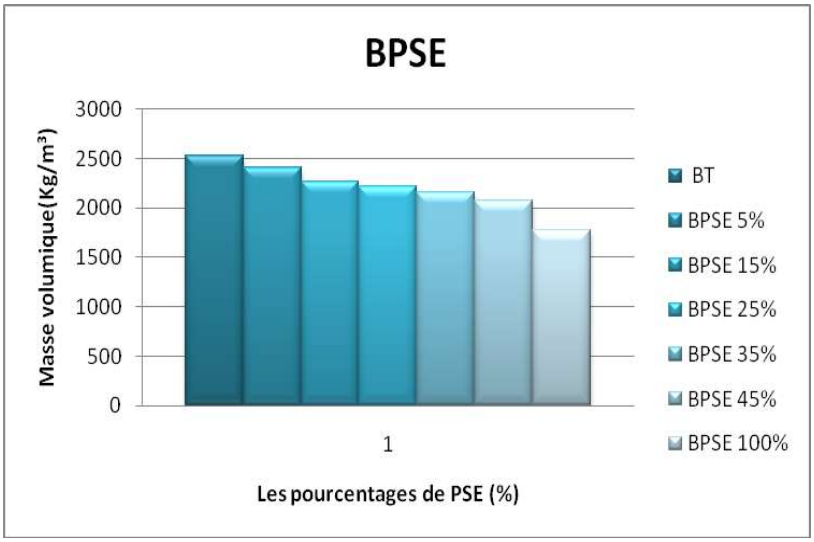


Figure 3 .2. Evolution de la masse volumique en fonction du dosage en PSE.

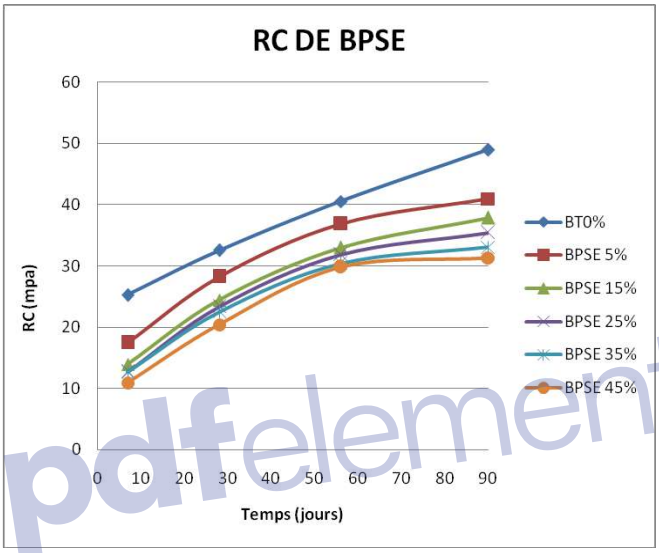
Retirer le filigrane maintenant

Selon la figure 3.2, la masse volumique varie de 2525,25 kg/m^3, à 1773,323 kg/m^3, pour une teneur en PSE allant de 0% à 100%. Ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 30%, cette faible densité utile dans les travaux l'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 la teneur en bille de PSE.

3.2.1.3. Variations des résistances à la compression des bétons de PSE

Comme on le voit sur la figure 3.3, les résistances des bétons allégés ont cette allure.

1.



pdfelement

Figure 3.3. Evolution de la résistance RC en fonction du dosage en PSE à 7, 28, 56 et 90 jours.

Elles diminuent considérablement avec l'augmentation de la teneur volumique en granulats légers, mais reste dans les valeurs compatibles avec l'utilisation en isolants porteurs (semi-structurel) pour une substitution de 100%. A 28 jours, pour une teneur en PSE de 100%, la résistance à la compression décroît de 32,55 MPa à 17,5 MPa. Soit une réduction de l'ordre de 46,27%. Nous constatons aussi l'augmentation de la résistance en fonction du temps.

3.2.1.4. Variations des vitesses du son des bétons de PSE

L'évolution de la résistance à la compression du composite, à différentes pourcentage en PSE, est donnée par la figure 3.3.

Retirer le filigrane maintenant

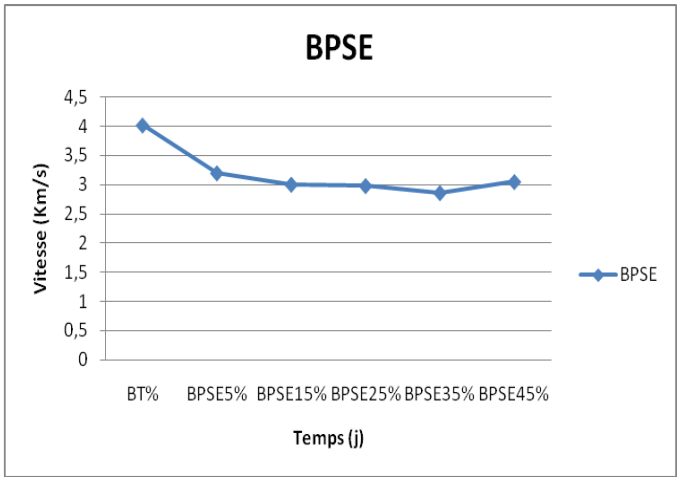


Figure 3.4. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

Elle a varie de 4019 m/s à 782 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 100%. 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 la matrice. Les ondes doivent contourner ces bulles d'air pour se propager dans la pâte de ciment. Ceci met ainsi en évidence la capacité à atténuer les ondes ultrasonores ainsi que l'amortissement des vibrations, caractéristique d'une bonne isolation phonique.

3.2.1.5. Variations d'absorption capillaire des bétons de PSE

L'évolution de l'absorption capillaire d'eau en fonction de la racine du temps, correspondant à la première phase d'absorption, est donnée par la figure 3.5.

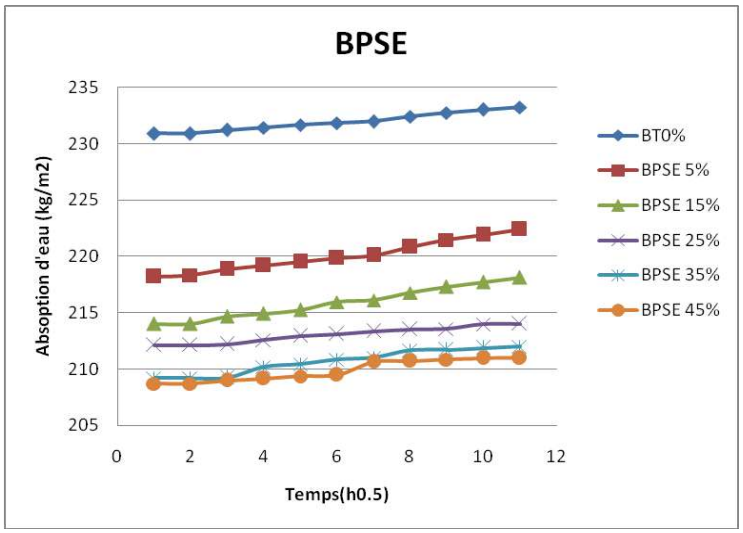


Figure 3.5. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la capacité d'absorption d'eau de tous les bétons de PSE est augmentée en fonction de l'incorporation des billes de PSE.

Retirer le filigrane maintenant

3.2.1.6. Variations retrait des bétons de PSE

L'évolution des variations dimensionnelles du composite, à différentes teneurs en PSE, en fonction de la durée de cure est donnée par la figure 3.6.

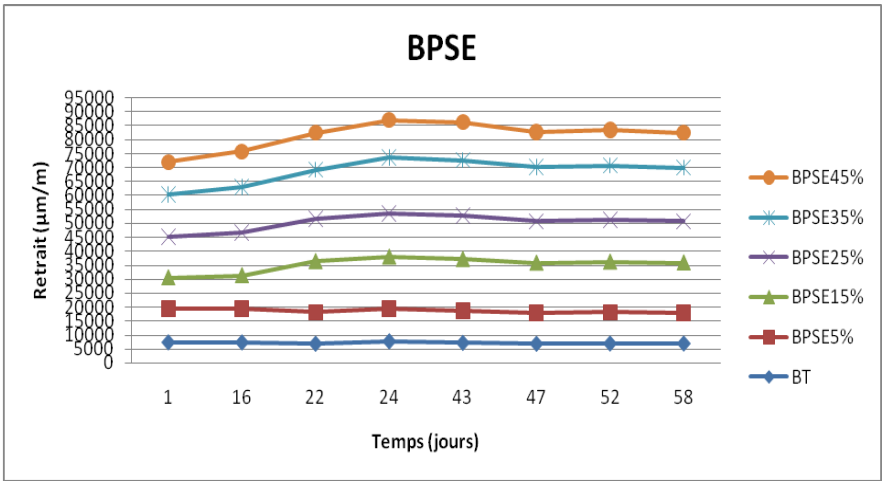


Figure 3.6. Evolution du retrait en fonction du dosage en PSE.

On constate que les déformations dépendent du pourcentage de PSE. Les déformations se produisent principalement avant 28jours. Au-delà, elles se diminuent puis stabilisent progressivement.

3.2.1.7. 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 3.7.

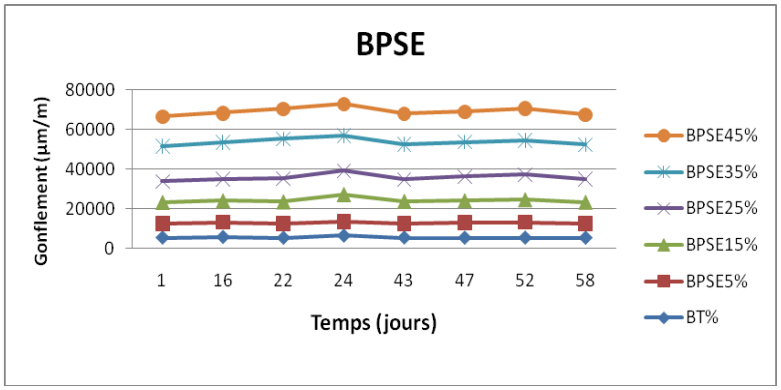


Figure 3.7. Evolution du gonflement en fonction du dosage en PSE.

D'après la figure 3.7, on remarque que, de façon générale une augmentation en fonction de l'augmentation des teneurs en PSE. Ceci nous permet de conclure que les bétons de PSE

Retirer le filigrane maintenant

élaborés sont des matériaux peu ou pratiquement non absorptifs pour le même pourcentage de PSE.

3.2.1.8. Variations de la perte de masse des bétons de PSE

Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes présentées par la figure 3.8

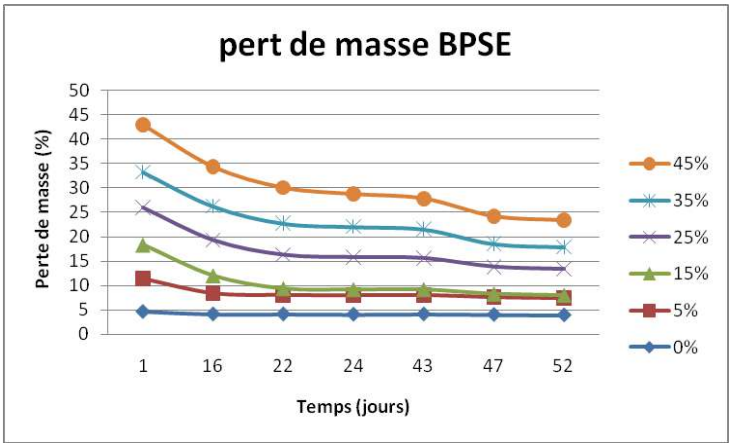


Figure 3.8. Evolution de la perte de masse en fonction du dosage en PSE.

A travers la figure 3.8, nous distinguons que la substitution du sable par les billes de polystyrènes expansés provoque une perte progressive de masse en fonction de l'augmentation du pourcentage des billes de PSE.

3.2.1.9. Variations du gain de masse des bétons de PSE

La figure 3.9, suit la variation de la masse volumique des composites formulés.

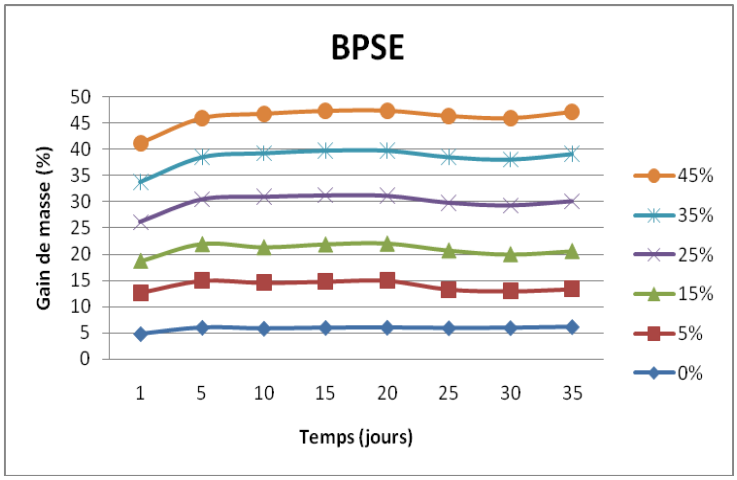


Figure 3.9. Variations du gain de masse des bétons de PSE

Les résultats montrent que l'augmentation de teneurs en PSE produit des gonflements, cette augmentation est due à l'augmentation des porosités.

Retirer le filigrane maintenant

3.2.1.10. Variations de la conductivité des bétons de PSE

Les variations de la conductivité thermique des BPSE sont représentées sur la figure 3.10.

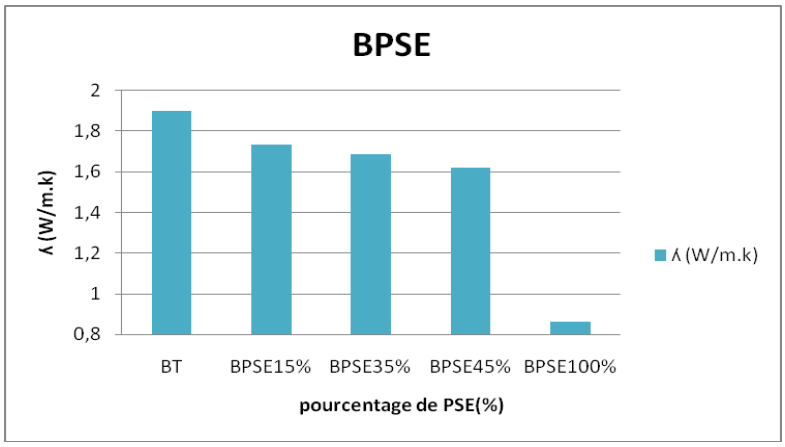


Figure 3.10. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

Les résultats obtenus dans la figure ci-dessus montrent que la conductivité thermique des BPSE diminue avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène.

Elle a varié de λ = 1,897 W/m.k à 1,49 W/m.k, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45%. Soit une réduction de l'ordre de 20,45%. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores.

Pour le pourcentage 100% λ = 0,8 W/m.k, elle est d'environ 60% moins que celle d'un béton témoin. Alors, c'est un béton thermiquement performant.

pdfelement

3.1.5. Conclusion de la première étape

De ce qui précède et pour des raisons d'économie et structurale, vu que, les résistances des bétons allégé et vu les gains au niveau de la masse volumique ainsi la conductivité thermique, enregistrés par les bétons allégé sans ajouts minéraux formulés à 28 jours nous avons choisie : BPSE (25%), BP(45%) et le béton témoin , avec des quantités d'ajouts de 10 et 20% pour le calcaire et le marbre, pour la suite de notre travail. Afin d'améliorer certaines caractéristiques hydriques et mécaniques.

3.2. Deuxième étape

Les trois (03) formulations issues de la première étape de point de vue économique et structurel, avec une formulation pour chaque type d'ajouts (calcaire (C) et marbre (M)) sont : BPSEC (10-20), béton de polystyrène expansé avec ajout calcaire 10 et 20% d'ajout calcaire. BPSEM (10- 20), béton a base de polystyrène expansé avec ajout marbre 10 et 20% d'ajout.

Retirer le filigrane maintenant

Et enfin un béton à 0% de PSE avec les mêmes types et pourcentages d'ajouts dans le but de la comparaison.

A chacune de ces trois formulations, afin de suivre l'effet de ce dernier sur la consistance, et sur la résistance à la compression et les critères de durabilité de ces trois composites. On étudie ici l'effet combiné des teneurs en PSE et des ajouts minéraux sur la consistance et la résistance à la compression des bétons.

3.2.1. Variations des résistances à la compression des bétons de PSE avec 10 et 20% d'ajouts

Les variations de la résistance des composites formulés avec 10% de calcaire et 10% de marbre des BPSE sont représentées sur la figure 3.11.

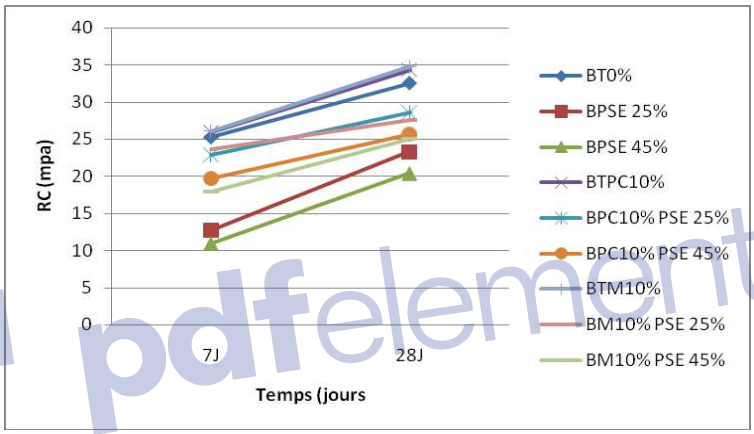


Figure 3.11. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

Les résultats montrent que les fillers améliorent la résistance à la compression, mais le calcaire présente les meilleures résistances à cause de la finesse de mouture qui modifie la microstructure.

Les variations de la résistance des composites formulés avec 20% de calcaire et 20% de marbre des BPSE sont représentées sur la figure 3.12.

Retirer le filigrane maintenant

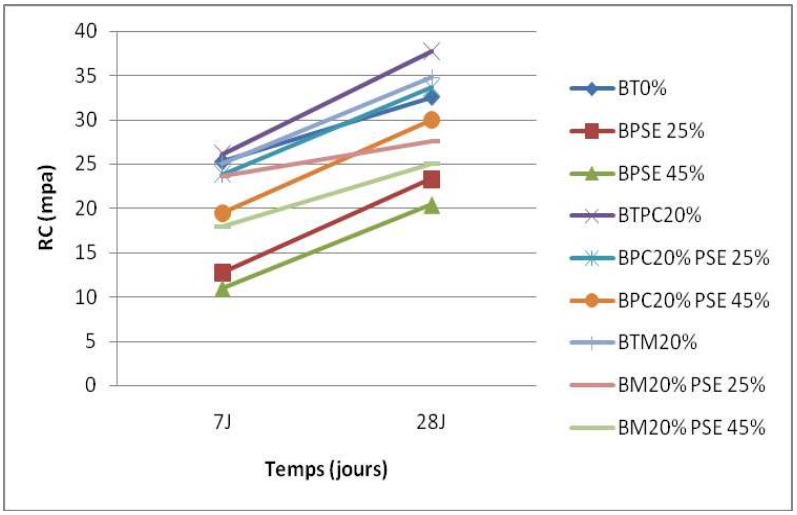


Figure 3.12. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

Les mêmes résultats trouvés pour le pourcentage d'ajouts 20%.

3.2.2. Variations des la conductivité thermique des bétons de PSE

Les variations de la résistance des composites formulés avec 10% de calcaire et 10% de marbre des BPSE sont représentées sur la figure 3.13.

pdfelement

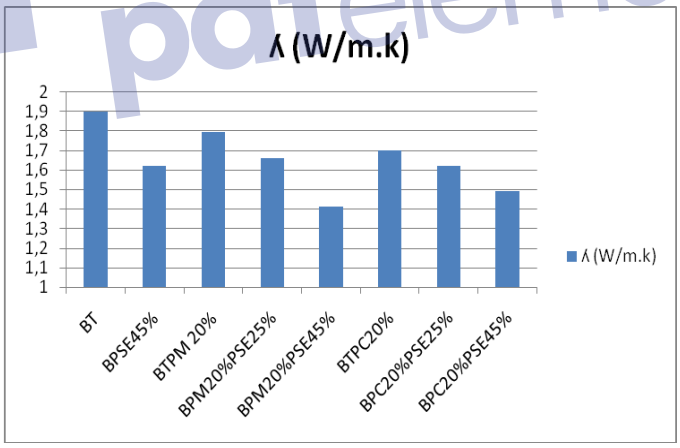


Figure 3.13. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.

La figure 3.13, montre l'augmentation du pourcentage de PSE mène à des meilleurs propriétés thermiques. Ainsi, la conductivité thermique diminue lorsqu'on remplace de calcaire par le marbre.

Retirer le filigrane maintenant

3.2.3. Variations d'absorption capillaire des bétons de PSE

Les variations de la résistance des composites formulés avec 10% de calcaire et 10% de marbre des BPSE sont représentées sur la figure 3.14.

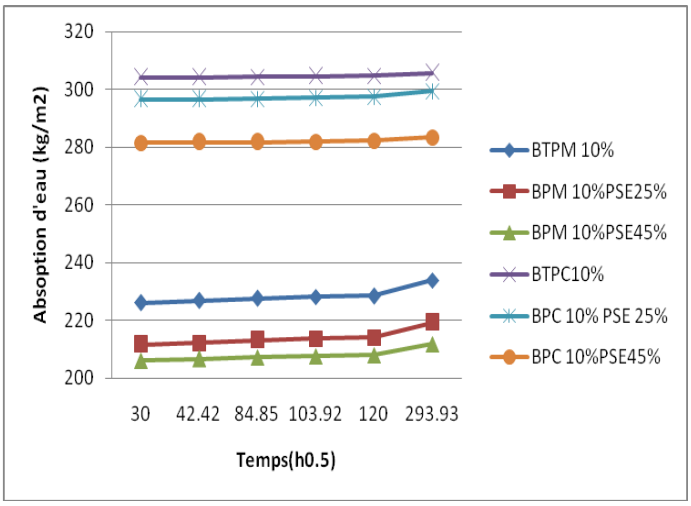
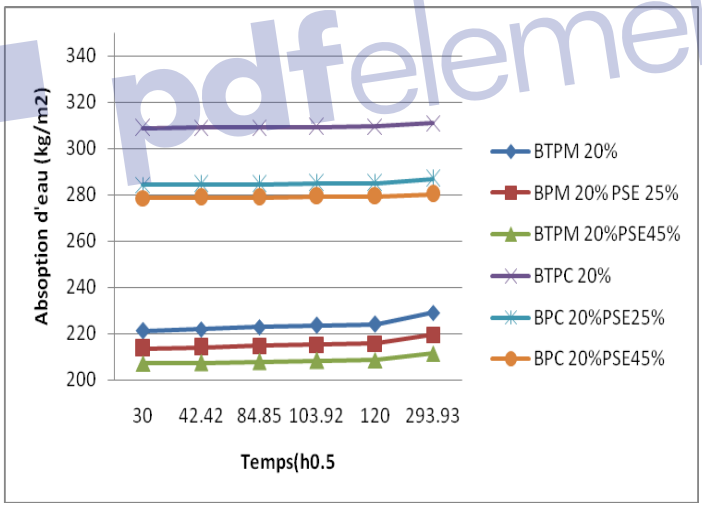


Figure 3.14. Evolution de la vitesse du son en fonction du dosage en PSE.



pdfelement

Figure 3.15. Evolution de l'absorption d'eau en fonction du dosage en PSE.

Selon les figures 3.14 et 3.15, l'absorption pour chaque pourcentage est presque constante en revanche quand on augmente la teneur en PSE l'absorption diminue.

Les mêmes constats trouvés pour 20% d'ajout, les fillers calcaire présentent un taux d'absorption important par rapport à l'absorption des fillers marbre.

Retirer le filigrane maintenant

3.3. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents résultats des essais expérimentaux des bétons allégés par les billes de polystyrène expansé de teneurs allant de 5, 15, 25, 35, 45 et 100%.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

CONCLUSIONS GENERALES

Notre étude a permis de mettre en évidence l'effet de la substitution des perles de polystyrène expansé et l'incorporation des ajouts minéraux sur le comportement physico - mécanique et thermique pour les différents composite formulé.

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de conclure que :

❖ **Pour les Bétons légers sans ajouts**

- Le rapport E/C des bétons de PSE frais décroit en fonction de l'augmentation de la substitution de sable par les billes de PSE avec une diminution de 17% ;
- La masse volumique varie de 2525,25 kg/m^3, à 1773,323 kg/m^3, pour une teneur en PSE allant de 0% à 100%. Ce qui correspond à une réduction de l'ordre de 30%, cette faible densité utile dans les travaux l'allégement des structures,
- De façon générale la substitution des granulats usuels par les billes de polystyrène expansé influe négativement sur les propriétés physiques (γ) et la vitesse du son, ainsi mécaniques (Rc) ;
- Pour une teneur en PSE de 100%, la résistance à la compression décroît de 32,55 MPa à 17,5 MPa. Soit une réduction de l'ordre de 46,27% ;
- La vitesse des son a varie de 4019 m/s à 782 m/s, pour une teneur en PSE allant de 0 à 100%. L'écart observé est dû à la nature du PSE qui favorise l'absorption des ondes ultrasonores ;
- la capacité d'absorption d'eau de tous les bétons de PSE est augmentée en fonction de l'incorporation des billes de PSE.
- Les déformations se produisent principalement avant 28jours. Au-delà, elles se diminuent puis stabilisent progressivement ;
- La conductivité thermique varié de λ = 1,897 W/m.k à 1,49 W/m.k, pour une teneur en PSE allant de 0 à 45%. Soit une réduction de l'ordre de 20,45%.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

- Pour le pourcentage 100% λ = 0,8 W/m.k, elle est d'environ 60% moins que celle d'un béton témoin. Alors, c'est un béton thermiquement performant.

❖ **Pour les Bétons légers avec ajouts**

- La présence des ajouts minéraux améliorent les caractéristiques mécaniques des bétons témoins et des bétons de PSE ;
- Les fillers améliorent la résistance à la compression, mais le calcaire présente les meilleures résistances que le marbre, à cause de la finesse de mouture qui modifie la microstructure ;
- la conductivité thermique diminue lorsqu'on remplace de calcaire par le marbre ;
- l'absorption pour chaque pourcentage de PSE est presque constante en revanche quand on augmente la teneur en PSE l'absorption diminue.
- Pour 20% d'ajout, les fillers calcaire présentent un taux d'absorption important par rapport à l'absorption des fillers marbre.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Bibliographie

KOMAR, 1978 « *matériaux et éléments de construction* ». Traduit du russe par Fréodor Siniaver et Oleg Partchevski Edition Mir 1978.

Y. J ANNOT (12-18/11/08): « *Métrologie thermique* » .Séminaire PER AUF, LEA Dakar,

Chauvin, J.J, Grimaldi, G. (Sept. 1988), « *Les bétons de sable* »; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; N°157, pp.9-15.

A.Laukaitis, R.Zurauskas, J.Keiene (2005): « *The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties* » ;Cement concrete composite 27(2005) pp .41-47

George dreux Jean festa (1998): « *Nouveau guide du béton et de ses constituants* » ;Eyrolles Paris.

Yang Ke (2008) : *Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers (expérience et modélisation*); Thèse de doctorat de l'université de cergy-pontois

https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_marbres_modernes

BerraMario,Ferrara Gerardo (1984): « *Propriétés des bétons réalisés avec des granulats de différentes densités* » ;bulletin de l'association internationale de Géologie de l'ingénieure N°30,Paris.

George dreux Jean festa (1998) : *Nouveau guide du béton et de ses constituants* ;Eyrolles Paris

K.w.Meeks and N.J.Carino (Mars 1999):« *Curing of High-performance Concrete :Report of the state of the art* ».Building and Fire Research Laboratory National Institue of Standarts and Technology Gaithersburg, MD 20899,181pages.

Zhen H. D. etChi S. P., 2014, « *Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars* », The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

K .Miled (2005) : Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé. Thèse de doctorat; Ecole nationale des ponts et chaussées de paris.

V. CEREZO (2005) : « *Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un atériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique* ». Thèse de doctorat; INSA de Lyon.

M. Shink (Avril 2003) : « *Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des Bétons de granulats légers* ». Thèse de doctorat de l'université de Laval.

Cormon. P (1973): Bétons légers d'aujourd'hui ; Collection U.T.I. Editions Eyrolles,Paris.

American Concrete Institute (1970), « Guide pour le béton de structure à base des granulats légers ». Traduction du CATED,SDT BTP.

A. Short, W. Kinniburgh,(1978): « *Lightweight Concrete* », third ed., Applied Science Publishers LTD, London, England,.

ACI 213R-87(1994) : « *Guide for structural lightweight aggregate concrete* », .1 CI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit ,Michigan.

RILEM(1970): « *Terminologie et définition. Matériaux et construction* » N°13. Commission des bétons légers.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Aman Mulla1 , Amol Shelake, « *Lightweight Expanded Polystyrene Beads Concrete* » International Journal of Research in Advent Technology (E-ISSN: 2321-9637) Special Issue "VishwaCon'16", 19 March 2016

K .Miled (2005) : *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé*. Thèse de doctorat; Ecole nationale des ponts et chaussées de paris.

Ben Sabaa* and Rasiah Sri Ravindrarajah (1999) « *workability assessment for polystyrene aggregate concrete* ». Proceedings of the CONPAT 99: V IBEROAMERICAN Congress of Building Pathologies, VII Quality Control Congress, 18-21 October 1999, Montevideo, Uruguay.

D. Saradhi Babu,T, K. Ganesh Babu (2005), T.H. Weea « *Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash* ». Cement and Concrete Research 35 (2005) 1218–1223

W. Herihiri (2010), « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers », mémoire de magistère université de Biskra, Algérie.

W.C. Tang *, Y. Lo, A. Nadeem « *Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete* ». Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, HKSAR, China. Cement & Concrete Composites 30 (2008) 403–409.

Bengin M. A. Herki « *Combined Effects of Densified Polystyrene and Unprocessed Fly Ash on Concrete Engineering Properties* ». © 2017 by the author. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

M. MERZOUD « *élaboration et caractérisation d'un matériau composite a base de fibres de diss dans la fabrication de la maçonnerie* » thèse de doctorat université d'Annaba, 2007.

YVES J., « *Théorie et pratique de la métrologie thermique* » Ecole des mines Nancy, Edition 2008.

A. GUEZOULI &A. BENAISSA *«le polys beto un nouveau matériau de construction»*. Décembre 2005.

K. Ganesh babu, D. Saradhi Babu(2003): « *Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume* », Cement and Concrete Research 33(2003), pp.755-762.

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

Neville, A. M. (2000). Propriétés des bétons. Paris : Editions Eyrolles

Malhotra, V. M., & Mehta, P. K. (1996). Pozzolanic and cementitious materials. Amsterdam : Overseas Publishers Association.

Aïtcin, P.-C. (2001). Bétons haute performance. Paris : Editions Eyrolles.

Lanchon, R. (1977). Cours de laboratoire : granulats, bétons, sols. Paris : Des forges.

Chanvillard, G. (1999). Le matériau béton: connaissances générales. Lyon : Aléas Editeur

De Larrard, F. (2002). Constituants du matériau béton. Dans F. De Larrard (Ed.), Construire en béton : L'essentiel sur les matériaux (pp. 21-37). Paris : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

Newman, J., & Choo, B. S. (2003). Advanced concrete technology : Constituent materials. Great Britain : Butterworth-Heinemann.

pdfelement

Retirer le filigrane maintenant

Soroka, I. (1993). Concrete in hot environnements. London : E & FN SPON.

Ghrici, M., Kenai, S., & Meziane, E. (2006). Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana. J Mater Sci, 41, 6965-6972.

Le Petit Larousse (2010).

Venuat, M. (1989). La Pratique des ciments, mortiers et bétons, Tome 1 (2e éd.). Paris : Éditions du Moniteur.

Lawrence, P., Cyr, M., & Ringot, E., (2005). Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. Cement and Concrete Research , 35, 1092-1105.

Bessa, A. (2003). Evaluation de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment dans les mortiers. Dans XXIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil, Prix « Rene Houpert », Université La Rochelle, 2-3 Juin 2003 (pp. 39-48).

Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., & Panarese, W.C. (2002). Design and control of concrete mixtures, 14th edition. USA : Portland Cement Association.

Malier, Y. (1992). L'utilisation du BHP dans une approche « système » de la construction. Dans Y. Malier (Ed.), Les bétons à hautes performances, caractérisation, durabilité, applications [55] (pp. 03-21). Paris : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

Lawrence, P., Cyr, M., & Ringot, E., (2005). Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. Cement and Concrete Research , 35, 1092-1105.

NF EN993-15.Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses -Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle) Octobre 2005.

ASTM, C1585 – 11 (2012) Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes

ISO 8497,1994 Isolation thermique: Détermination des propriétés relatives au transfert de chaleur en régime stationnaire dans les isolants thermiques pour conduites.

NF EN 12504-4 P 18-447,2005. « Essais pour béton dans les structures Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son » mai 2005.

pdfelement