République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Dr.Yahia Farés de Médéa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie de la Matière

Filière : Génie Civil

Memoire de Fin d'Etude

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Génie Civil

Option :Construction et Matériaux

THéme

Elaboration d'un composite à base de granulat léger

Réalisé par:

- *Laidi Wissam*
- *Ben Yahia Nesrine*

Encadré par :

M: Herihiri Wided

Mr. Guendouz. M

Promotion 2014/2015


بسم الله الرحمن الرحيم


اصبر على مر الجفا من معلم
فإن رسوب العلم في نفراته
ومن لم يذق مر التعلم ساعة
تجرع ذل الجهل طول حياته
ومن فاته التعليم وقت شبابه
فكبّر عليه أربعاً لوفاته
وذات الفتى والله بالعلم والتقى
إذا لم يكونا لا اعتبار لذاته
مجموعة لفلي سمايل
lovely0smile.com

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.hriehrie pour l'encadrement de ce mémoire, pour sa disponibilité, son assistance et ses conseilles.

On remercie aussi M. Djamila Boukhelkhel et Zahira rahal chef de laboratoire du Génie Civil pour

son aide pendant les essais réalisés au la boratoire.

Et tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner mon 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

merçi

Dédicace

Je dédié ce lapidaire travail :

À mes très chers parents qui m'ont de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie.

Merci mes parents

À mes très chers frères et sœurs.

À tous mes amis et mes collègues.

En fin, je remercie mon binôme **wissam** qui a contribué à la réalisation de ce

Modeste travail.

NESRIN

Dédicace

Je dédié ce lapidaire travail :

À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.
Qu'Allah me les garde.
À mes chers frères et sœurs.
À toute ma famille.

À mes très chères amies et surtout à mon binôme NESRINE qui a partagé avec moi les bons et les mauvais moments. Ça ma fait plaisir de trouver en lui l'amie avant le binôme.
Enfin, À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Wissam

Sommaire

Résumé

Introduction générale

Problématique

L'objectif

Plan de travail

Chapitre-I- Synthèse bibliographique

I.1Introduction 01
I.2.Béton Léger..... 01
I.2.1.Définition de béton léger...... 01
I.2.2.Les différents Types de bétons léger..... 03
I.2.3.Composition des bétons légers..... 05
I.2.4.Domaine d'utilisation..... 05
I.2.4.1.des bétons d'isolation pure, non porteurs..... 05
I.2.4.2.Des bétons porteurs et isolants..... 05
I.2.4.3.des bétons légers de structure 06
I.2.5.Réglementation..... 06
I.2.6.Caractéristiques des bétons légers..... 07
I.2.7.Classification des bétons légers 08
I.2.7.1. le béton léger de structure..... 08
I.2.7.2. le béton léger de faible masse volumique 08
I.2.7.3. le béton de résistance moyenne se situe entre les deux 09
I.2.8. Les avantages des bétons légers 09
I.2.8.1. Avantages techniques 09
I.2.8.2. Avantages de Mises En Œuvre 10
I.2.8.3. Avantages Economiques 10
I.3.Béton de granulat léger..... 13
I.3.1.L'historique du béton des granulats légers 15
I.3.2. les Granulats légers pour béton léger 15
I.3.3.Différents types de granulats légers 16
I.3.3.1.Granulats naturels 16
I.3.3.2.Granulats artificiel..... **20**
I.3.4.Le polystyrène..... 21
I.3.4.1.L'histoire de l'invention du polystyrène expansé..... 22
I.3.4.2.Les types de polystyrène 23
I.3.4.2.1. Le polystyrène cristal ou dense..... 23
I.3.4.2.. Le polystyrène choc ou haut impact..... 23
I.3.4.2.3. le polystyrène expansé..... 24
I.3.4.3.Composition chimique de polystyrène..... 25
I.3.4.4.Matières premières du polystyrène expansé..... 25
I.3.4.5.Fabrication du polystyrène expansé..... 26
I.3.4.6.Propriétés du polystyrène..... 26
I.3.4.7.Billes de polystyrène..... 26

I.3.4.8.Les caractéristiques de polystyrène expansé……. 27
I.3.4.9. Les Avantages de polystyrène expansé…… 27
I.3.4.10.Différence entre le polystyrène non traite et le polysbeto…… 27
I.3.4.10.1.le polystyrène normal non traité…….. 28
I.3.4.10.2.Le polystyrène traité (Le Polys béto) …….. 29
I.3.5. Composition chimique et minéralogique……... 30
I.3.5.1.Granulats en argile expansée et schiste expansé…… 30
I.3.5.2. Granulats en laitiers expansé……. 30
I.3.5.3.Pierre ponce et granulats de cendres volantes frittées …….. 31
I.3.6. L'absorption d'eau……. 32
I.3.7.La Porosité…….. 33
I.3.8.Propriétés des bétons de granulats légers……... 33
I.3.8.1.Ouvrabilité…….. 34
I.3.8.2.Résistance…….. 35
I.3.8.3.Module d'élasticité ……. 35
I.3.8.4.Coefficient de Poisson……. 35
I.3.8.5.Fluage…… 36
I.3.8.6.Retrait…… 37
I.3.8.7.Conductivité thermique……. 37
I.4.Conclusion…….. 38

Chapitre –II- Matériaux et essais

II.1. Introduction …….. 39
II.2. Programme expérimental…….. 39
II.2.1. Matériaux utilisées…….. 39
II.2.1.1. Le ciment…….. 39
II.2.1.2. Le sable…….. 41
II.2.1.3. Les polystyrènes expansés……. 42
II.2.1.4.adjuvant «plastifiant »…… 43
II.2.1.5. L'eau de gâchage…….. 43
II.2.2.Protocol d'essais…….. 43
II.2.3. Préparation des matériaux……... 44
II.2.4. Confection et Conservation des éprouvettes……... 44
II.2.5. Composition des mortiers…….. 44
II.2.6. Equipement nécessaire…… 47
II.2.7. Les essais……. 47
II.2.7.1 Les essais effectués sur les granulats..... 47
II.2.7.1.1. Masses volumiques …… 48
II.2.7.1.2. Equivalent de sable ……. **49**
II.2.7.1.3.Granulométrie ……..... 50
II.2.7.2. Les essais effectués sur le mortier ……..... 51
II.2.7.2.1.à l'état frais …… 51
II.2.7.2.1.1. Ouvrabilité du mortier…….. 51
II.2.7.2.1.2. La masse volumique……. 53
II.2.7.2.1.3. Air occlus ……. **53**
II.2.7.2.2. à l'état durci ……. 55
II.2.7.2.2.1. Essai de traction par flexion ……. 56

II.2.7.2.2.2. Essai de compression ……. **57**
II.2.7.2.2.3. Le CT- METRE.....…..... 57
II.2.7.2.2.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité……. 58
II.2.7.2.2.5.Essai de la masse volumique…… 58
II.3.conclusion…….. 58

Chapitre –III- Résultats et interprétation

III.1.Introduction …….. 59
III.2.Formulation de béton alléger…… 59
III.3.Caractérisation des granulats …… 60
III.3.1.Equivalent de sable…… 60
III.3.2. La Masse volumiques…….. 60
III.3.3. La granulométrie de sable utilisés…… 61
III.3.3.1. Le sable roulé …….. 61
III.3.3.2. Le sable Concassé……... 61
III.3.3.3. Correction des sables…….. 62
III.4. Caractérisation des mortiers…….. 63
III.4.1.1. Les essais réalisés à l'état frais …… 63
III.4.1.1.1. La maniabilité …… 63
III.4.1.1.2. L'air occlus …… 64
III.4.1.1.3. La densité …….. 65
III.4.2.2.L'état durci…….. 68
III.4.2.2.1. La densité…… 68
III.4.2.2.2.Résistance à la compression …… 72
III.4.2.2.3. Résistance à la traction par flexion ……... 75
III.4.2.2.4.l'absorption d'eau …….. 76
III.4.2.2.5.conductivité thermiques…….. 79
CONCLUSION Générale 79
80

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Chapitre – I – syntheses bibliographique		
Figure I.1	Représentation schématique des différents types de béton léger	2
Figure I.2	Masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours	8
Figure I.3	**.** Babylone, Irak, construit par Sofia, sumerians dans le 3^{éme} millenium .B.C.10	10
Figure I.4	Cathédrale de rue Sofia, Hagia commissionné par l'empereur justinian au 4^{éme} siècles A.D.à Istanbul, Turquie	11
Figure I.5	Eglise romain, construit en J.-C118	11
Figure I.6	Pont du Gard built in ca. A.D. 14	11
Figure I.7	Le grand amphithéâtre romain, construit coliseum, construit entre A.D.7.et 82	11
Figure I.8	Pyramides au Mexique, pendant la période maya, à l'A.D. 624-987	11
Figure I.9	Mohenjo-Daro et Harappa, 2500 B.C	15
Figure I.10	Différents granulats légers naturels	16
Figure I.11	Différents granulats légers artificiels	17
Figure I.12	Four à très haute température à1250°C, GEM, France	23
Figure I.13	Les déférents types de polystyrène	24
Figure I.14	Structure chimique du polystyrène	24
Figure I.15	Structure alvéolaire du polystyrène	27
Figure I.16	Le polystyrène est inflammable	32
Figure I.17	Évolution de l'absorption de gros granulats légers	32
Figure I.18	Absorption d'eau en fonction du temps des granulats	32
Figure I.19	Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique	34
Figure I.20	Développement du retrait en fonction du temps	36
Chapitre –II- Matériaux et essais		
Figure II.1	Ciment de CHELEF	39
Figure II.2	Le ciment utilisé	41

Figure II.3	Les sables utilisé	41
Figure II.4	Mesure des billes de polystyrène	42
Figure II.5	Plastifiant	43
Figure II.6	Equipement nécessaire	48
Figure II.7	Le cône et le récipient	49
Figure II.8	Les éprouvettes de mesure	49
Figure II.9	Procédure de mesure de l'équivalent de sable	50
Figure II.10	Séries de tamis	50
Figure II.11	Maniabilimètre à mortier	51
Figure II.12	Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à mortier	52
Figure II.13	Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement	52
Figure II.14	Mesure de la masse volumique	53
Figure II.15	Aéromètre à mortier	54
Figure II.16	Etat final du mortier dans la cuve avant mesure	55
Figure II.17	Dispositif pour l'essai de résistance à la traction	55
Figure II.18	Dispositif de rupture à la compression	56
Figure II.19	Le CT-mètre	57
Figure II.20	Absorption d'eau par capillarité	58
Figure II.21.	Essai de la masse volumique	58
Chapitre –III- résultats et interprétation		
Figure III.1	La courbe granulométrique des sables utilisés	62
Figure III.2	Le temps d'écoulement des mortiers pour le dosage du ciment C =450 kg/m^3	63
Figure III.3	Le temps d'écoulement des mortiers pour le dosage du ciment C = 500 kg/m^3	64
Figure III.4	L'air occlus en fonction de pourcentage de polystyrène.	65
Figure III.5	La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des	66

	mortiers réalisés des avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 0.5%.	
Figure III.6	La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 1%.	67
Figure III.7	La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 0.5%.	67
Figure III .8	La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 1%.	68
Figure III.9	. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 0.5%.	70
Figure III.10	La masse volumique adjuvant en fonction des pourcentages de PSE avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 1%.	70
Figure III.11	La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 0.5%.	71
Figure III.12	La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 1%.	71
Figure III.13	Résistance à la compression (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 450 kg et 0.5% plastifiant	73
Figure III.14	Résistance à la compression (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 450 kg et 1% plastifiant	74
Figure III.15	Résistance à la compression (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 500 kg et 0.5% plastifiant.	74
Figure III.16	Résistance à la compression (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 500 kg et 1% plastifian	75
Figure III.17	Résistance à la traction (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 450 kg et 0.5% plastifiant.	77
Figure III.18	Résistance à la traction (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 450 kg et 1% plastifiant.	77
Figure III.19	Résistance à la traction (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 500 kg et 0.5% plastifiant.	78
Figure III.20	Résistance à la traction (MPA) en fanction des jours des mortiers réalisés avec les dosages, C= 500 kg et 1% plastifiant.	78
Figure III.21	L'absorption d'eau des mortiers réalisés pour 0.5% plastifiant	79

Figure III.22	L’absorption d’eau des mortiers réalisés pour 1% plastifiant	79
Figure III.23	La variation de La conductivité thermique en fonction du pourcentage de PSE pour C= 450kg	81
Figure III.24	La variation de La conductivité thermique en fonction du pourcentage de PSE pour C 450 kg	81

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Chapitre –I- Synthèse bibliographique		
Tableau I.1	**.** L'absorption d'eau de granulat léger	5
Tableau I.2	classification des bétons légers en fonction de la densité	7
Tableau I.3	classification des bétons légers en fonction de la densité	8
Tableau I.4	Composition chimique des granulats d'argile et schiste expansés	30
Tableau I.5	Composition chimique des granulats en laitier expansé	30
Tableau I.6	Composition chimique de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes frittées	30
Tableau I.7	Les valeurs de la masse volumique et la conductivité thermique de béton des granulats légers	37
Chapitre –II- Matériaux et essais		
Tableau II.1	Essai physiques sur ciment	40
Tableau II.2	Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge	41
Tableau II.3	Caractéristiques de polystyrène POLYS BETO	42
Tableau II.4	Compositions de mortiers pour $1m^3$ avec C = 450Kg et 0.5 % Plastifiant	45
Tableau II.5	Composition de mortier pour $1m^3$ avec C= 450 Kg et plastifiant 1%	45
Tableau II.6	Composition de mortier pour $1m^3$ avec C = 500Kg et 0.5 % plastifiant	46
Tableau II.7	Composition de mortier pour $1m^3$ avec C = 500Kg et 1% plastifiant.	46
Chapitre –III- Résultat et interprétation		
Tableau III.1	L'équivalent de sable des différents sables utilisés	60
Tableau III.2	Les masses volumiques de sable utilisé	60
Tableau III.3	Compacité, porosité et indice des vides de sable utilisé	60
Tableau III.4	L'analyse granulométrique du sable roulé	61
Tableau III.5	L'analyse granulométrique du sable concassé	61
Tableau III.6	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et 0,5 % plastifiant	65

Tableau III.7	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et1% plastifiant	66
Tableau III.8	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et0.5% plastifiant	66
Tableau III.9	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et1% plastifiant	66
Tableau III.10	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et0.5% plastifiant	69
Tableau III.11	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et1% plastifiant	69
Tableau III.12	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et0.5% plastifiant	69
Tableau III.13	La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et1% plastifiant	69
Tableau III.14	Résistance à la compression (MPA) pour C = 450kg	72
Tableau III.15	Résistance à la compression (MPA) pour C = 500kg	73
Tableau III.16	Résistance à la traction (MPA) pour C = 450 kg.	76
Tableau III.17	Résistance à la traction (MPA) pour C= 500Kg.	76
Tableau III.18	La conductivité thermique des mortiers réalisé pour le dosage C=450 kg et 0 ,5% plastifiant	80
Tableau III.19	La conductivité thermique des mortiers réalisé pour le dosage C = 450kg et 1% plastifiant	80

Résumé

La masse volumique du béton ordinaire variée de 2200 à 2600 kg/m^3 tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1900 kg/m^3, 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 technologie de ces bétons peut être rentable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développent.

L'Algérie est un pays chaud. En été les constructions ont besoin de matériaux d'isolation thermique. Le polystyrène expansé c'est un matériau climatiseur, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée, en été. Il offre un espace sec et confortable : il élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs. Ce matériau est aussi respectueux de l'environnement. Le polystyrène est un produit écologique, il n'est certes pas biodégradable, mais il est recyclable. D'où notre intérêt pour ce thème de recherche.

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des bétons de granulats légers. Alors on a formulé une série des composites à base de polystyrène expansé, Sa méthode de formulation basée sur le remplacement d'ensembles naturels par le volume complémentaire d'ensembles artificiels selon des pourcentage bien choisies ainsi on a varier le rapport E/C et la quantité du ciment puis utilisé un plastifiant réducteur d'eau "Medafluid 104", afin d'avoir ses effets sur les propriétés rhéologique, physique, thermique et mécanique tels que : temps d'écoulement, l'air occlue, la masse volumique, la conductivité thermique et la résistance (compression, flexion et traction).

L'analyse des résultats confirme qu'il est convenablement réaliste de commencer à développer les bétons légers a travers l'utilisation des granulats artificiels spécialement ceux qui on peut produire dans notre pays suivant les matières première, À cet effet en va réduire la grande consommation des granulats usuels.

الملخص

كثافة الخرسانة العادية تتراوح بين 2200 -2600 كغ / م^3 في حين يتراوح وزن الخرسانة الخفيفة ما بين 300 و 1900 كغ / م^3، والخرسانة خفيفة الوزن تستخدم لتحقيق وزن اخف للبنايات. كما أنها تستخدم للعزل الحراري، لذلك تكنولوجيا هذه الخرسانة يمكن أن تكون مربحة لبناء، وخاصة في البلدان النامية.

الجزائر بلد حار. في الصيف المباني تحتاج مواد العزل الحراري، البوليستيرين هو مادة مكيفة للهواء، والتي تمتص الحرارة الزائدة أثناء النهار في فصل الصيف. إنه يوفر مساحة جافة ومريحة: كما أنه يزيل الرطوبة التي قد تتكثف على الجدران. هذه المواد هي أيضا صديقة للبيئة. فمن المؤكد أنها لا تتحلل، وإنما هو لإعادة التدوير. ولهذا اهتممنا في هذا البحث الى تقديم هذا النوع الخاص من الخرسانة.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة الخرسانة خفيفة الوزن من خلال الخصائص الفيزيائية، الميكانيكية والحرارية. حيث قدمنا سلسلة من المركبات تحتوي البوليستيرين، طريقة التركيب تقوم على استبدال مجموعات طبيعية من الحجم الإضافي للمجموعات الاصطناعية وفقا لنسب اختيرت بشكل جيد وتغيير نسبة الماء /الاسمنت و كمية من الاسمنت واستخدمت الإضافات " Medafluid 104" من أجل أن يكون لها تأثير على خصائص الانسيابية والفيزيائية والحرارية والميكانيكية مثل الوقت التدفق، والهواء المغطي، الكثافة، الموصلية الحرارية وقوة (ضغط، والانحناء والتوتر).

تحليل النتائج يؤكد أنه من الممكن تطوير الخرسانة خفيفة الوزن من خلال استخدام الركام الاصطناعي وخاصة تلك التي يمكن أن تنتج في بلادنا، هذا انطلاقا من توفر المواد الأولية وبالتالي التقليل من استخدام الحصى التقليدي.

Summary

The density of ordinary concrete ranges from 2200 to 2600 kg / m^3 ;while, the lightweight concrete ranges between 300 and 1900 kg / m^3. The use of lightweight concrete allows to construct lightweight buildings. They are also used for heat insulation. The technology of these concretes can be profitable for the construction, especially in developing countries.

Algeria is a hot country. In summer, the buildings need thermal insulation materials. Expanded polystyrene is an air conditioner material, which absorbs the excess heat during the day in summer. It offers dry and comfortable space ; it eliminates moisture that may condense on the walls. This material is also environmentally friendly because it is not biodegradable, but rather recyclable. This is what urges us to choose this research topic.

The main objective of this research is to study the physical, mechanical and thermal lightweight aggregate concrete. So, we have made a series of composites based on expanded polystyrene, The method of formulation is based on the replacement of natural sets by the additional volume of artificial sets according to percentages that were well chosen and varying the ratio W / C and quantity of cement. Then, we have used a water reducing plasticizer "Medafluid 104" in order to see its effect on rheological, physical, thermal and mechanical properties such as flow time, the occluded air, density, thermal conductivity and strength (compression, bending and tension).

The Analysis of the obtained results confirms that it is possible to properly start developing the lightweight concrete through the use of artificial aggregates especially those that can be produced in our country using the raw materials. This will reduce the consumption of ordinary aggregates.

INTRODUCTION GENERALE

1. Problématique

On regroupe sous le terme béton léger l'ensemble des bétons dont la densité est inférieure à celle d'un béton ordinaire (égale à environ 2.4). Une telle densité peut être obtenue grâce à la substitution des granulats classiques (sable, gravillon) par des granulats plus légers, souvent artificiels tels que : l'argile expansé, le schiste expansé, laitier expansé, les cendres volants, PSE, etc. et naturel tels que : pierre panse, diatomite, laitier volcanique, etc. Ces bétons, qui sont aujourd'hui bien appréhendés au niveau de leur formulation et leur mise en œuvre (Arnould et Virlogeux, 1986; de Larrard, 1995), présentent des densités se situant en général dans la fourchette.

Néanmoins, on peut atteindre des densités plus faibles, en utilisant des inclusions extrêmement légères telles que des billes de polystyrène expansé (Bagon et Frondistou-Yannas, 1976; Patron et Shendy-El-Barbary, 1982; Sri Ravindrarajah et Tuck, 1994; Kayyali et Haque, 1996; Ganesh Babu et Saradhi Babu, 2002; Chen et Liu, 2004; Le Roy et al, 2005; Laukaitis et al, 2005). En outre, grâce à l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance, ces bétons de polystyrène peuvent avoir des résistances de bétons de structure. Par conséquent, ils représentent, grâce à leur légèreté, une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art et d'offshore.

Par ailleurs, les bétons légers de polystyrène ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments (à l'instar du Béton Isolant Porteur (BIP) du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment CSTB).

2. Objectifs

L'objectifs de ce travail est d'étudiée et mieux comprendre les différentes aspects des bétons légers, ainsi de présenter les principaux paramètres qui gouvernent la conception d'un béton léger avec matériaux disponible comme source de granulats légers.

L'étude consiste aussi à l'évaluation expérimentale de l'influence des pourcentages des agrégats artificiels « polystyrène expansé » sur les caractéristiques physico –mécaniques, rhéologiques ainsi que thermiques des mortiers conçus à base de ces agrégats.

3. Plan de travail

Ce travail est divisé en trois chapitre étroitement liées, le premier chapitre présente une synthèse sur l'état de recherches relatives au béton léger BL, 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.

Cette étude nous a permis de formuler un certain nombre de formulation des Bétons légers.

Le deuxième chapitre regroupe les caractéristiques des matériaux utilisés durant notre étude, les procédures de confection des mélanges, ainsi que les différents essais effectués.

Dans le troisième chapitre sont présentés la problématique évoquée dans la recherche bibliographique, l'objectif visé dans cette étude ainsi que les différents paramètres étudiés. Enfin, nous exposons en détail les résultats obtenus et leurs discutions.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale rassemblant une synthèse des résultats et une présentation des perspectives a envisagé lors d'études complémentaires.

Chapitre I : synthèse bibliographique

I.1. Introduction

Le béton conventionnel 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.

L'objectif de ce chapitre est de donner une description générale des bétons légers et ses caractéristiques.

Dans ce premier chapitre, nous présentons tout d'abord, quelques généralités sur le béton léger, puis des notions générales sur les bétons de granulat légers**.** Ceci nous conduira à poser la problématique de notre étude pour définir et justifier les axes de cette recherche.

I.2.Béton léger

I.2.1.Définition de béton léger

Béton léger dont la masse volumique après séchage est inferieure a 2000 kg/m^3 (béton de granulats légers, béton cellulaire, béton caverneux, etc.). Par rapport à un béton de poids normal, il possède généralement une résistance mécanique moindre et une plus grande déformabilité mais une meilleure résistance thermique. Il est utilise en remplissage, pour des éléments porteurs et isolants, en réhabilitation, etc**. [1]**

I.2.2.Les différents Types de bétons légers

On diminue la masse volumique du béton en remplaçant une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton sont : dans la matrice (**béton cellulaire**), entre les gros granulats (**béton caverneux** ou sans fines, c.-à-d. sans sable) et dans les granulats (**béton de granulats légers**). La figure I.1 illustre ces trois types de béton. Evidemment, il est possible d'effectuer des combinaisons comme un béton léger de type caverneux fabriqué en utilisant des granulats légers. L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Les bétons légers peuvent être utilisés dans les structures lorsque leur résistance est élevée ou bien constituer une isolation particulière efficace lorsqu'ils sont légers. **[1]**

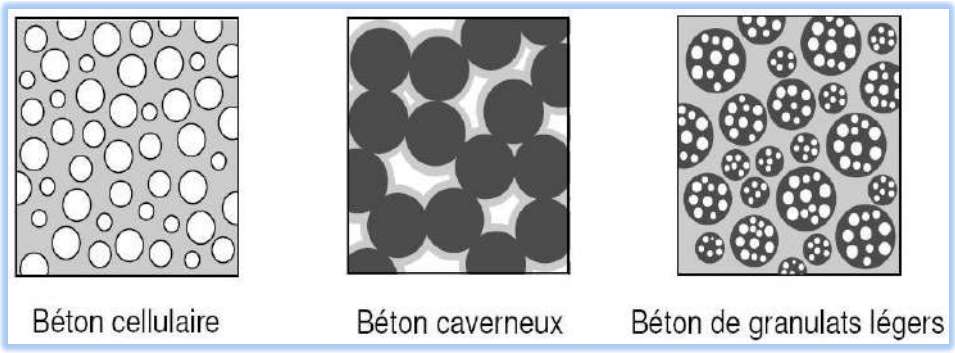


Figure I.1. Représentation schématique des différents types de béton léger, d'après Short & Kinniburgh **[1]**

- ✓ **Le béton caverneux**

(Densité de 400 à 900 kg/m3 et résistance à la compression de 4 à 8 MPa), ils comportent une forte proportion de granulats légers pour 1 m3 de béton, 150 à 300 kg de ciment pour 1000 litres de granulats légers. On les utilise pour leur qualité isolante. Ils sont destinés au remplissage de plancher ou aux dalles sur terre-plein lorsque la hauteur à rattraper est importante. On les recouvre d'une chape de mortier ou de béton armé. **[1]**

- ✓ **Les bétons de granulats légers**

D'une masse volumique de 1500 à 1900 kg/m^3 (2200 à 2600 kg/m3 pour les bétons ordinaires), ont une résistance comparable aux bétons de granulats rigides tout en étant de 25 à 35 % plus légers. Ces bétons permettent ainsi une plus grande souplesse quant à la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies. En effet, la réduction de la charge morte sur les structures permet entre autres d'utiliser des portées plus longues ou de diminuer les sections des éléments porteurs, de réduire la quantité d'acier d'armature et même les dimensions des fondations. Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les coûts de transport et d'installation. En plus de sa légèreté, le béton léger présente une bonne isolation thermique par rapport au béton normale. Toutes ces caractéristiques expliquent l'intérêt grandissant que l'on porte au béton léger, notamment pour la réhabilitation. Les résistances des bétons légers décroissent avec la densité qui peut descendre jusqu'à 400 kg/m3. Du point de vue thermique, il existe une corrélation directe entre la densité, la résistance à la compression et la conductivité thermique (qui caractérise le pouvoir isolant). En effet, la résistance à la compression et la conductivité thermique varient en même temps que la densité. Lorsque celle-ci diminue, les résistances mécaniques deviennent plus faibles

ainsi que la conductivité thermique, ce qui augmente le pouvoir isolant (plus d'air est piégé dans le béton). **[1]**

- ✓ **Le béton cellulaire**

Est un matériau de construction 100 % naturel, sain et à faible impact sur l'environnement. Il est destiné au gros œuvre sous la forme d'un système constructif complet : blocs pour murs extérieurs et de refends, planchers et toiture. Utilisé tout aussi bien par des auto constructeurs et des artisans que prescrit par des maîtres d'œuvre, il est accessible à tous, séduit les amateurs de maison saine et concilie béton et nature**... [1]**

I.2.3.Composition des bétons légers

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la **composition** (bétons caverneux) ou sur l'emploi de **granulats allégés** (des billes de schiste expansé, d'argile expansée ou de polystyrène, voire des particules de liège ou de bois remplacent les gravillons habituels). **Des adjuvants** comme les entraîneurs d'air peuvent aussi être ajoutés pour un allègement maximum. On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux : c'est le cas du **béton cellulaire.**

D'une façon générale, le principe de la détermination des proportions du mélange pour confectionner des bétons de granulats légers est pratiquement le même que celui concernant les bétons traditionnels ; toutefois un paramètre nouveau, la densité souhaitée, appareil dans l'énoncé du problème et c'est pourquoi nous avants étudié une méthode de composition prenant en compte ce paramètre. **[2]**

Le calcul des quantités de granulats s'effectue en volume absolu, mais le dosage pondéral nécessite la connaissance de la masse spécifique des granulats prémouillés qui, en général, n'est pas connue avec une très grande précision. Ces granulats présentent presque tous, en effet, une tendance très marquée à l'absorption d'eau. Par exemple, pour un granulat d'argile expansée 10/20 mm l'absorption en poids est indiquée en valeurs moyennes, dans le tableau I.1. **[2]**

Par imbibition sous vide, l'absorption peut dépasser 75% pour les plus gros granulats. Cette tendance est due à la porosité << ouverte des granulats et elle est moins marquée lorsque

ceux-ci sont superficiellement comme « vitrifiés ». C'est-à-dire, présentent une surface lisse peu « ouverte ». **[2]**

De plus, selon le degré d'imbibition le foisonnement peut prendre une valeur importante surtout pour les éléments fins comme les sables concassés de granulats légers. **[2]**

Il en résulte essentiellement deux conséquences :

- Le dosage pondéral des granulats est délicat et peut être source d'erreur selon le degré d'imbibition ; il est préférable, en générale, de prévoir un dosage volumétrique à moins de pouvoir contrôler efficacement le pourcentage d'eau absorbée et d'en tenir compte en majorant d'autant le poids des granulats supposés secs dans la formule de dosage.
- L'absorption importante qui se manifeste des le début du gâchage diminue progressivement et rapidement le dosage en eau inter granulaire et de ce fait la plasticité du béton. Il est donc conseillé d'humidifier préalablement ces matériaux de façon a ralentir cette absorption d'eau et de stabiliser à peu prés la plasticité du matériau au moins pendant sa période d'emploi que l'on s'efforcer de rendre aussi courte que possible : certains professionnels préconisent. Pour l'argile expansée un premouillage entrainant une absorption d'eau de l'ordre de 10 à 15% en poids. D'autres sont partisans d'employer des granulats saturés égouttés. **[2]**

Cependant. Ces matériaux sont trop différents de l'un à l'autre pour qu'une règle commune puisse leur être appliquée et une fois rapidement déterminée une formule de dosage approximativement valable. L'expérimentation par des essais d'étude prend alors une part encore plus importante et nécessaire que pour les bétons classiques de granulats denses**. [2]**

Absorption d'eau en poids par immersion pour un granulat léger (eau totale retenue absorbée et adsorbée). Ces valeurs sont données à titre indicatif car elles varient sensiblement d'un granulat à l'autre et selon que le granulat est plus au moins égoutté. **[2]**

Tableau I.1. L'absorption d'eau de granulat léger **[2]**

Au bout de	5 minutes	1 heure	8 heures	1 jour	7 jours	28 jours
Absorption forte	10 %	15 %	20 %	23 %	30 %	45 %
Absorption faible	5 %	7 %	10 %	12 %	15 %	15 %

I.2.4.Domaine d'utilisation

Les domaines d'utilisation préférentiels des bétons légers sont divers, on peut les divisés en trois domaines d'utilisation ;

I.2.4.1.des bétons d'isolation pure, non porteurs : leur masse volumique est faible (600 kg/m3) de même que leur résistance à la compression (de 1,5 à 5 MPa). Ces bétons sont utilisés principalement :

- ✓ en forme de pente isolante pour toiture-terrasse ;
- ✓ en isolation de sols sur terre plein ;
- ✓ La préfabrication des éléments architecturaux ;
- ✓ La protection d'étanchéité sur terrasse ;
- ✓ chapes, planché, dalles d'isolation ;
- ✓ Remplissage de vides et comblement de galeries et de canalisation ;
- ✓ Le rattrapage de niveau

I.2.4.2.Des bétons porteurs et isolants: leur masse volumique varie de 1 000 à 1 300 kg/m3 et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- ✓ Des murs banchés ou préfabriqués ;
- ✓ Des blocs à maçonner ;
- ✓ Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage
- ✓ Les planchers des constructions métalliques à grandes surfaces ;
- ✓ La protection incendie ;…….

I.2.4.3.des bétons légers de structure, ils ont une masse volumique de 1 700 à 1 800 kg/m3 et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. Les granulats légers doivent répondre à un certain nombre de critères concernant le pourcentage de grains cassés, la masse volumique (en vrac ou des grains), le coefficient d'absorption d'eau, la résistance à la compression des grains, la composition chimique, la propreté, la granularité.

Ces bétons sont utilisés pour :

- ✓ Ouvrage ou le poids mort est important par rapport au poids total (chargement compris) ;
- ✓ Immeuble de grande hauteur ;
- ✓ Portée importantes (poutres, voiles) ;
- ✓ Structures marines immeubles ;
- ✓ Surélévation d'immeubles existants ;
- ✓ Restauration d'anciens immeubles ;
- ✓ Etc.

I.2.5.Réglementation

Les perspectives qui paraissaient s'ouvrir il y a vingt-cinq ans au développement des bétons légers de structure en France ont conduit en 1976 à la publication de Recommandations provisoires pour l'emploi du béton léger publiées conjointement par la Profession et par l'Administration. Mais le texte de référence est actuellement l'annexe 5 des Règles BPEL 91 pour le calcul et l'exécution des ouvrages précontraints. Cette annexe, intitulée « ouvrages en béton de granulats légers » tient compte de l'évolution des connaissances depuis 1976. Elle n'est applicable qu'aux bétons légers pleins de structure. **[3]**

Les données de ce texte s'écartent toutefois sensiblement de celles du Comité euro-international du béton, qu'il s'agisse du Code-Modèle CEB/FIP pour les structures en béton ou du Manuel de calcul et de technologie CEB/FIP pour les bétons de granulats légers **[3],** ou de la partie 4 de l'Euro code 2 pour le calcul des structures en béton**.[3]**

I.2.6.Caractéristiques des bétons légers

Les bétons légers offrent **une densité très inférieure** à celle d'un produit classique : de 300 à 1800 kg/m3, contre 2300 kg/m3 pour un béton classique. Pour certains bétons légers, elle peut descendre jusqu'à des densités voisines de 0,4kg/m3. **[4]**

La résistance d'un béton léger est **très inférieure** à celle d'un béton traditionnel. Pour les densités les plus basses, il ne peut être question de béton "structurel" mais seulement de béton de "remplissage". **[4]**

Ces bétons légers possèdent un **pouvoir isolant** sur le plan **thermique et acoustique. [4]**

I.2.7.Classification des bétons légers:

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général le béton peut être classé en quatre groupes, selon sa masse volumique γ :

- béton très lourd : $\gamma > 2\ 500\ kg/m^3$;
- béton lourd (béton courant) : γ entre 1 800 et 2 500 kg/m^3 ;
- béton léger : $\gamma = 500$ à 1 800 kg/m^3 ;
- béton très léger : $\gamma < 500$ kg/m3.

Les bétons légers ont des caractères assez différents de ceux des bétons traditionnels.
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 γ_{bs} ;

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

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en Kg/m^3. **[2]**

Tableau I.2 : classification des bétons légers en fonction de la densité **[2]**

Classe de densité	**1,0**	**1,2**	**1,4**	**1,6**	**1,8**	**2,0**
Kg/m^3	901 à 1000	1001 à 1200	1201 à 1400	1401 à 1600	1601 à 1800	1801 à 2000

La nouvelle version de la norme EN 206 classe les bétons suivant les fourchettes de masse volumiques indiquées dans le tableau I.3:

Tableau I.3 : classification des bétons légers en fonction de la densité **[6]**

Classe de masses volumiques	**LC 1, 0**	**LC1, 2**	**LC1, 4**	**LC1, 6**	**LC1, 8**	**LC2, 0**
Kg/m^3	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

Une autre classification pour béton léger basée sur la masse volumique est logique, puisque 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/m^3) en trois catégories :

I.2.7.1. le béton léger de structure : 1350 – 1900 kg/m^3

Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

I.2.7.2. le béton léger de faible masse volumique : 300 – 800 kg/m^3

A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m^3 n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, R_c < 7 MPa

I.2.7.3. le béton de résistance moyenne se situe entre les deux :

Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa

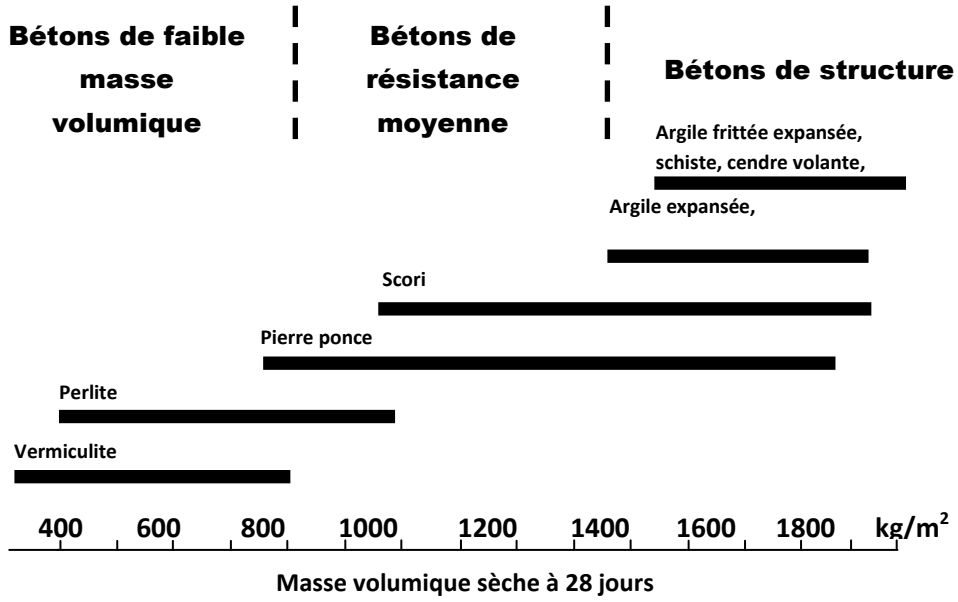


Figure I.2. Masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours **[5]**

I.2.8. Les Avantages des bétons légers :

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

I.2.8.1. Avantages techniques :

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1 ,2 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 M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- Imputrescible : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

I.2.8.2. Avantages de Mises En Œuvre :

- Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- Maniabilité : pompables 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);

I.2.8.3. Avantages Economiques :

- une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau (Neville, 2000).
- 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).
- économie 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 ;

I.3.Béton de granulat léger

I.3.1.L'historique du béton des granulats légers

Le béton de granulat léger, BGL, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scoria, etc.…Les Sumériens ont employé ceci dans le bâtiment Babylone dans le 3ème millénium A.C. (fig. I.3).Les Grecs et les Romains ont employé la ponce dans la construction des bâtiments. Certaines de ces magnifiques structures de l'antiquité existent toujours, comme la cathédrale de Sainte Sofie « ou le Hagia Sofia », à Istanbul, Turquie, construite par deux ingénieurs, Isidore de Miletus et Anthemius de Tralles, commissionné par l'empereur Justinian au 4ème siècle A.D., (fig. I.4) ; le temple romain, Panthéon, qui a été érigé en années A.D. 118 à 128 ; l'aqueduc prestigieux, Pont du Gard, ca établi. A.D.14 ; et le grand amphi théâtre romain, Colosseum, construit entre A.D. 70 et 82 (figs. I.5, I.6, et I.7).En plus de la construction des bâtiments, les Romains ont utilisé les agrégats naturels légers et les vases creux à argile pour leur "opus Caementitium" afin de réduire le poids. Ceci a été également employé dans la construction des pyramides pendant la période maya au Mexique (fig. I.8). **[7]**

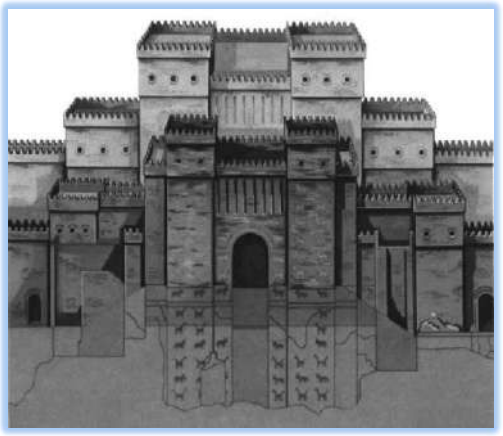


Figure I.3..Babylone, Irak, construit par Sofia, Sumerians Dans le 3^{éme} millenium .B.C.

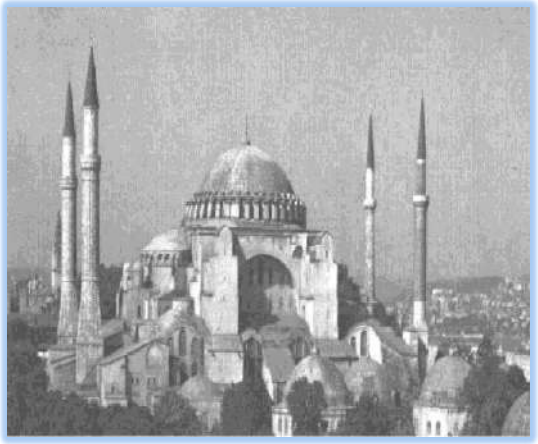


Figure I.4. Cathédrale de rue Sofia, Hagia Commissionné par l'empereur justinian au 4^{éme} siècles A.D.à Istanbul, Turquie



Figure I.5. Église romain, construit en J.-C118



Figure I.6. Pont du Gard, built in ca ca. A.D. 14.



Figure I.7. Le grand amphithéâtre romain, construit COLOSSEUM, construit entre A.D. 70 et 82



Figure I.8. Pyramides au Mexique, pendant la période maya, à l'A.D. 624-987.

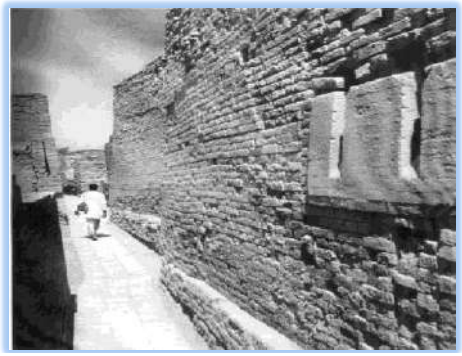


Figure I.9. Mohenjo-Daro et Harappa, 2500 B.C.

Des briques poreuses d'argile ont été produites longtemps avant l'époque chrétienne, Pendant la civilisation de Vallée Indus à peu près 2500 av. J.-C. Ceux-ci ont été employés dans la construction de deux villes, Mohenjo-Daro et Harappa (Figure I.9). On le postule que ces briques poreuses ont été écrasées et ont employé en tant que agrégats de poids léger dans la maçonnerie. Bien qu'il soit difficile d'évaluer l'origine du BGL, ce ne serait pas une exagération pour dire que ses racines ont lieu de la période antique. Avec l'augmentation de la demande de BGL et de l'indisponibilité des agrégats, la technologie pour produire les agrégats légers a été développée. En Allemagne, au 19ème siècle, des morceaux poreux d'argile ont été produits par évaporation rapide de l'eau. Kukenthal de Brunswick a obtenu un brevet en 1880. L'utilisation industrielle des agrégats légers normaux en Allemagne a été commencée en 1845 par Ferdinand Nebel à partir de Koblenz qui a produit des blocs de maçonnerie à partir de la rénovation, avec la chaux brûlée comme reliure. En Islande, la ponce a été employée dans des industries du bâtiment locales depuis 1928. **[7]**

Le béton est traditionnellement connu comme une lourde et froide matière grise ayant de bonne résistance mécanique. Néanmoins, On sait généralement que le béton n'est pas nécessairement les blocs lourds et tranchants justes de gris. Il peut acquérir n'importe quelles formes, couleur, densité, et résistance. La faible densité de la matière engendre une bonne isolation thermique et permet à la réduction de poids des structures. Aussi, l'épaisseur des toitures et des murs extérieurs peut être réduites. Par conséquence, Si on garde la même épaisseur, un degré plus élevé d'isolation thermique sera réalisé. La densité, par exemple, peut s'étendre de 300 à 3000 kg/m3 ; la conductivité thermique de 0.1 à 3 W/m.K ;et la résistance de 1 à 100 MPa ou même plus. La densité est la plupart du temps commandé par le type d'agrégat utilisé. La force dépend également partiellement du type d'agrégats utilisés pour faire le béton. Une gamme de densité et de force de béton est indiquée dans fig. I.8. Les agrégats légers sont l'ingrédient de base pour la fabrication de BGL.**[7]**

I.3.2. les Granulats légers pour béton léger

Ce paragraphe est consacré à la description des différents types de granulats légers, leur procédé de fabrication, leur composition chimique et minéralogique

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Considérant l'importance de ceux-ci, il convient donc d'exposer les principales caractéristiques et les types de granulats utilisés dans la confection de bétons de granulat légers.

Le granulat est le matériau granulaire utilisé en construction. Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclé. Ces granulats sont de dimension, de forme et de nature diverses, Comme les granulats représentent à peu près 70 % du volume total d'un béton, leur influence est significative. En effet, le granulat représente l'ossature du béton. Les granulats utilisés doivent être composés de particules propres, dures, résistantes et durables. De plus, elles doivent être exemptes de tout produit chimique nuisible. La surface des particules doit être exempte d'argile ou de tout autre matériau fin qui pourrait nuire à l'hydratation et à l'adhérence de la pâte de ciment.

Les granulats influencent le dosage, le coût et les propriétés du béton à l'état frais et durci. La granulométrie, la forme, la texture, la densité, l'absorption, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la réactivité, la propriété thermique et la résistance au gel sont autant de caractéristiques d'un granulat qui vont influencer directement la formulation du béton **[8].**

En particulier, la granulométrie et la grosseur nominale maximale d'un granulat exercent une influence directe sur la rhéologie à l'état frais du béton. Toute variation granulométrique modifie directement l'uniformité du béton. En général, les granulats présentant une granulométrie régulière donnent les meilleurs résultats.

La forme et la texture d'un granulat influencent davantage la rhéologie à l'état frais d'un béton fraichement malaxé que celle d'un béton durci. Un béton fabriqué avec des granulats dont les particules sont rugueuses, anguleuses et allongées demande plus d'eau qu'un béton fabriqué avec des granulats lisses, arrondis et compacts. Du point de vue de la rhéologie à l'état fiais, les particules anguleuses nécessitent donc plus de ciment pour maintenir le même rapport eau/liant. De même, les bétons fabriqués avec des granulats anguleux ou a granulométrie très discontinue peuvent être difficiles à pomper. Par contre, l'adhérence pâte/granulat est souvent meilleure dans le cas des particules rugueuses et anguleuses comparativement aux particules lisses et arrondies. Il importe donc de tenir compte de ces aspects lors de la sélection des granulats pour un béton **[8]**

Deux autres propriétés intrinsèques du granulat sont essentielles à la formulation du béton : la densité et l'absorption. La densité sert au calcul du dosage des bétons. La majorité des granulats usuels ont des densités comprises entre 2,40 et 2,90. Le volume des vides varie généralement de 30 à 45 % pour les gros granulats et de 40 à 50 % pour les granulats fins. Le volume des vides entre les particules va donc influencer le besoin en pâte. Afin de pouvoir contrôler la quantité nette d'eau de gâchage et calculer correctement le dosage du mélange, on doit aussi tenir compte de l'absorption et de l'humidité superficielle des granulats. Le degré d'absorption d'un granulat varie généralement de 0,2 à 2 %. De façon à respecter les quantités

calculées, l'eau de gâchage utilisée dans les bétons doit être ajustée en fonction des conditions d'humidité des granulats, Faute de maintenir la teneur en eau constante, la résistance à la compression. La maniabilité et les autres propriétés du béton varieront d'une gâchée à l'autre. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas des granulats légers où le pourcentage d'absorption est élevé.

Les granulats doivent présenter une bonne résistance aux cycles de gel-dégel, à l'abrasion, au retrait, aux acides et au feu. II est difficile de trouver un granulat pouvant répondre à tous ces critères. Cependant, on peut identifier certaines caractéristiques essentielles d'un granulat qui sont des indicateurs d'une bonne qualité, notamment sa faible porosité et sa dureté. En effet, un béton fabriqué avec des granulats durs et de faible porosité sera susceptible de résister à plusieurs types d'agression.

Certaines substances peuvent être présentes dans les granulats et réagir chimiquement avec l'un des constituants du béton. Ces substances réactives produisent :

1) Des variations volumétriques importantes de la pâte, des granulats ou des deux,

2) Des entraves à l'hydratation normale du liant,

3) Des sous-produits indésirables. La réaction la plus connue est la réaction alcali-granulat (RAG) qui entraîne la détérioration du béton lorsque des minéraux réactifs de certains granulats réagissent avec les alcalis du ciment **[8].**

Pour fabriquer un béton ultraléger, il est évident que les granulats choisis, qu'ils proviennent d'une source naturelle, artificielle ou qu'ils proviennent de matériaux recyclés, doivent être légers. En plus de la légèreté, ceux-ci devront également rencontrer d'autres exigences telles que le coût, la disponibilité et les propriétés mécaniques, chimiques et rhéologiques typiques aux granulats usuels.

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté. Ils peuvent être d'origine naturelle ou artificielle dont la masse apparente est inférieure à 1000 kg/m^3

En pratique, les masses volumiques apparentes s'échelonnent entre 10kg/m^3 (polystyrène expansé) et 900 kg/m^3 (granulat de pouzzolane, de laitier expansé ….), Alors que pour les granulats silico –calcaires habituels elles sont comprises entre 300 et 1600 kg/m^3 (suivant la dimension et la forme des granulats)

Les granulats légers sont très nombreux et ils se différencient les uns des autres par leur origine, leur composition, leur forme, leur état de surface, leur structure, leur porosité, leur densité, leur résistance,….

I.3.3.Différents types de granulats légers

Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine : naturelle ou artificielle

I.3.3.1.Granulats naturels

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (Inférieures à2) ; 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 des utilisations locales. (La Figure I.10) présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (Oïl Palm Shell) [9], la diatomite [10] et le laitier volcanique [11].



Diatomite



Pierre ponce



Laitier volcanique

Figure I.10. Différents granulats légers naturels **[9], [10], [11].**

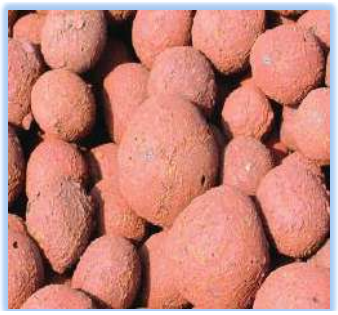
- **Pierre ponce**

C'est une lave volcanique alvéolée de couleur gris clair ; par concassage on obtient des granulats à béton (gravier ou sable) ; sa masse volumique (en vrac) varie de 500 à 800 kg /m^3

I.3.3.2.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 **[12]** et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en

Italie **[13]** ; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expansé) [**14], [15], [16],** (Figure I.11).



Argile expansée



Schiste expansé



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansé



Cendre volante



PSE

Figure I.11. Différents granulats légers artificiels **[12], [15], [16]**

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 à1250°C environ), (Figure I.12).

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.



Figure I.12. Four à très haute température à1250°C, GEM, France

- **Les laitiers**

Qui constituent la base d'une autre catégorie de granulats artificiels

comprennent les laitiers de haut fourneau, les laitiers d'aciérie et autres laitiers métallurgiques. Les laitiers métallurgiques sont uniquement utilisés comme matériau de remblai pour les routes et comme granulats pour le béton bitumineux. Seuls les laitiers de haut fourneau sont utilisés pour des bétons de structure. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Il est refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact, connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air ». Il peut également être refroidi rapidement et traité au moyen de jet d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de « laitier expansé ». Le laitier expansé doit alors être concassé pour former des granulats. Un autre procédé permet de fabriquer du «laitier expansé bouleté». Le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des boulettes. Celles-ci sont de forme arrondie et ont un revêtement lisse en surface. Leur masse volumique en vrac est de l'ordre de 850 kg/m3. **[2]**

- **Les cendres volantes**

Qui peuvent également être à la base de granulats légers sont mélangées avec de l'eau et transformées en boulette soit dans un tambour ou un cône rotatif, Soi t par extrusion, On a découvert que l'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant

une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Par la suite, les boulettes sont frittées dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150°C à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes fusionnent et forment un aggloméré. Ces nodules frittés de forme arrondie, de bonne résistance et possédant une absorption d'eau modérée constituent de bons granulats. Leur masse volumique en vrac est comprise entre 1000 et 1200 kg/m3. **[2]**

- **L'argile expansée**

L'élément constitutif est une argile grasse ; introduite humide dans un four rotatif spécial, elle en ressort après séchage, expansion et cuisson à plus de 1100°C, sous la forme de nodules plus ou moins arrondis à texture interne finement alvéolée et présentant généralement une surface lisse légèrement vitrifiée ; ils constituent un granulat de faible densité prêt à l'emploi dans les répartitions granulométriques courantes, sans aucun broyage ni concassage (sauf pour le sable 0/3**).[2]**

La masse volumique pour du granulat en vrac est :

- Sable 0/3 : 700 à 800 kg/m^3
- Petit gravier 3/10 : 500 à 600 kg/m^3
- Gravier 10/20 : 450 à 500 kg/m^3

La densité absolue des grains à l'état sec est de l'ordre de 0,9 pour le 10/20 et 1,0 pour le 3/10.

La compacité de ces granulats en vrac (non tasses) est d'environ 0,55 ; autrement dit un mètre cube de granulat sec 10/20 en vrac pèse environ : $0{,}55\times0{,}9\times1000\geq500$ kg. Si, par immersion ou arrosage il absorbe 20% d'eau par exemple, ce même mètre cube en vrac pèsera alors :

$$500\times1{,}20 = 600 \text{ kg environ.}$$

Ces valeurs sont données à titre indicatif car elles peuvent varier assez sensiblement d'une production à une autre et il conviendra de les vérifier par quelques mesures sur les matériaux réellement utilisés.

Ces produits ont en effet tendance à absorber à une importante quantité d'eau qui peut atteindre à saturation, au bout de plus d'un mois 30 à 50% de leur poids initial à sec ; l'absorption est assez rapide au début ; il convient donc en général de les prémouiller avant introduction dans le malaxeur et de prévoir de préférence un dosage volumétrique étant donne l'incertitude du degré d'humidification. Il semble en général qu'un premouillage de l'ordre de 10 à 15% en poids soit suffisant.

Actuellement les granulats d'argile expansée ne sont pratiquement plus utilises pour la confection de béton, sinon dans la réalisation d'élément préfabriqués, leur cout de production leur ôtant toute compétitivité**. [2]**

Aussi est-il assez difficile d'en trouver sur le marché, les rares producteurs actuels l'utilisant directement pour la fabrication d'éléments manufacturés ou le commercialisant en vrac en petite quantité pour des utilisations dans le bâtiment ou totalement étrangères au génie civil. **[2]**

- **Schistes expansés**

Les schistes houillers forment l'élément principal des accumulations coniques des pays miniers, les **«** terrils ».

Ces schistes sont broyés à 800 µ maximum puis malaxés à l'eau (10 %) et à la vapeur (5%) ; la pate ainsi obtenir est extrudée aux environs de 80 °C sous forme de « macaronis » de différent diamètre de 5 à 15 mm et découpés aux mêmes dimensions ± 50 % .ces nodules sont séchés puis expansés par traitement thermique de 1300 °C à 1450 °C ; l'expansion est d'autant plus importante que la température est élevée ; les masses en vrac peuvent être d'environ 1000 kg /m^3 (pour t= 1300° C °) à 380 kg/m^3 (pour t= 1450 °C) .en général, la densité absolue des grains a l'état sec est de l'ordre de 0,7 à 1, 0 correspondant à des masses en vrac de 350 à 600 kg / m^3 **[2]**

- **Laitier expansé (norme NF P 18 307) [2]**

Ce produit est obtenu artificiellement par insufflation d'air dans le laitier en fusion ou l'air se fractionne en petites bulles. Apres refroidissement, le concassage donne des granulats de diverses grosseurs et de structure alvéolaire. Ce produit se trouve assez difficilement sur le marché car les rares producteurs l'utilisent directement pour la fabrication de produits manufacturés. **[2]**

- **Polystyrène expansé**

Le polystyrène a été découvert en 1930 et le polystyrène expansible en 1951.

Le polystyrène expansé est un agrégat artificiel. Il est employé en remplacement total ou partiel des agrégats naturels. Ces agrégats artificiels sont légers et mieux adaptés aux conditions économiques du monde moderne pour alléger et améliorer certaines caractéristiques de résistance des bétons. **[17]**

Le Polystyrène expansé s'emploie sans changer les règles traditionnelles d'usage des bétons. Il est plus léger que les agrégats naturels, calibré aux diamètres variant de1, 5 à 2,5 mm il est constitué de billes enrobées d'adjuvants spécifiques de couleur marron clair.

Le Polys conditionné dans des sacs de 100 l, de masse 3 kg à une masse volumique apparente de 30 kg/m^3, devant celle du sable de 1700 30 kg/m^3.

Le polystyrène, outre son côté cassant, souffre aussi d'une faible résistance chimique et d'une faible résistance à la fissuration sous contrainte (ESCR). L'acétone le dissout très facilement, les corps gras le fragilisent rapidement. **[17]**

Le polystyrène est le plus commun de la famille des polymères styréniques. Cette famille contient les différents copolymères du styrène : styrène-butadiène (SBR), styrène-acrylonitrile (SAN), acrylonitrile butadiène styrène (ABS), acrylonitrile styrène acrylate (ASA), etc**.[17]**

Dans cette étude nous sommes intéressons de ce type des granulats légers artificielle.

I.3.4.Le polystyrène :

I.3.4.1.L'histoire de l'invention du polystyrène expansé

La mousse de polystyrène expansé est une matière plastique qui possède des propriétés particulières en raison de sa structure. Composé de cellules individuelles de polystyrène de faible densité, l'EPF est extrêmement léger et peut prendre en charge plusieurs fois son propre poids en eau. Parce que ses cellules ne sont pas reliées entre eux, la chaleur ne peut pas voyager à travers l'EPF facilement, donc il est un excellent isolant. EPF est utilisé dans des dispositifs de flottaison, isolation, boîtes à œufs, des appartements de la viande et des produits, des sandwichs et des boîtes à hamburger, tasses à café, assiettes, emballage d'arachide, et les refroidisseurs de pique-nique. Bref, le polystyrène est utilisé pratiquement partout. Bien qu'il soit généralement appelé styromousse, Styrofoam est une marque déposée de Dow Chemical Company et fait spécifiquement référence à un type de ciment, le ciment bleu EPF principalement utilisé dans la navigation de plaisance. **[18]**

Pendant les années 1800, les chercheurs en quête des matériaux adaptés à la réalisation de films, pare-brise en calèche, et divers petits objets tels que les peignes en plastique se sont tournés vers le polystyrène expansé. En faisant ces matières plastiques, les scientifiques ont exploité la tendance naturelle à la polymérisation, dans lequel deux ou plusieurs petites molécules, ou monomères, se combinent pour former des chaînes qui sont souvent très longs.

Les chaînes moléculaires résultantes, ou des polymères, comprennent des unités structurelles répétitives des molécules originales. L'un des polymères naturels les plus connus est la cellulose, la chaîne de molécules de glucose qui forme une composante principale des parois cellulaires végétales, coton, papier, et la rayonne. Le polystyrène est parmi les polymères synthétiques les plus connus (les autres sont le polyéthylène, le polypropylène et polyester). Styrène, l'hydrocarbure liquide à partir duquel l'EPF est faite, est dérivée de la fin du XIXe siècle à partir de styrax baumier, qui provient d'un arbre en Asie Mineure appelé la gomme sucrée Oriental. Dans le début du XIXe siècle, les matières plastiques entièrement synthétiques ont été développées à partir d'hydrocarbures, dont la structure est propice à la polymérisation facile. Polystyrène, le polymère à partir de laquelle l'EPF est faite, a été inventé en 1938**. [18]**

Les plastiques moussants ont été découverts indirectement, car au début on ne pouvait voir leurs avantages. Dr Leo H. Baekeland, le chimiste américain qui a développé le premier plastique totalement synthétique, la bakélite, expérimenté avec du phénol (un composé acide) et le formaldéhyde (un gaz incolore) en essayant de faire une résine non poreuse. Lorsque l'un de ses mélanges inattendus commence à mousser, Baekeland essayé de contrôler la mousse avant de réaliser que cela pourrait avoir des avantages. Après la mort de Baekeland en 1944, la première mousse phénoliques ont été développés, bientôt suivie par de la mousse époxy. Peu de temps après, le polystyrène expansé a été crée. Au début, il a été utilisé principalement dans l'isolation et pour les dispositifs de flottaison pour bateaux, des engins de sauvetage et les bouées. Il a fallu attendre l'EPF remplacé le papier, le kapok (fait à partir des fibres soyeuses que les graines d'arbres ceiba s'emboîtent), et autres protections d'emballage naturel que la substance est devenue aussi populaire qu'elle l'est aujourd'hui. Sa connaissance a été favorisé par l'énorme croissance de l'industrie alimentaire et à emporter rapides, qui ont commencé à utiliser EPF dans des boîtes hamburger et tasses à café. Aujourd'hui, l'EPF est de loin le plastique le plus reconnu.

Cependant, en dépit de la popularité EPF et des caractéristiques uniques, il a récemment fait l'objet d'attaques en raison du méthane gazeux dérivés-chlorofluorocarbures (CFC)-utilisé pour la mousse. Les CFC sont inertes et inoffensifs pour les humains et l'environnement lors de leur libération. Cependant, longtemps après leur première utilisation, les scientifiques ont réalisé que les CFC contribuent à l'appauvrissement de la couche d'ozone en se décomposant. La couche d'ozone est une couche de l'atmosphère

Le polystyrène expansé est fait dans un processus connu sous le nom polymérisation en suspension. Après le styrène est produit par la combinaison d'éthylène et du benzène, il est confondu avec l'eau et une substance mucilagineuse pour former des gouttelettes de polystyrène. Ensuite, les gouttelettes sont chauffées et combiné avec un initiateur, ce qui amorce le processus de polymérisation. Les gouttelettes se combinent pour former des chaînes, qui à son tour se combinent en perles. L'arrêt du processus de terminaison est difficile, étant donné que les chaînes doivent être d'une certaine longueur pour être utile.

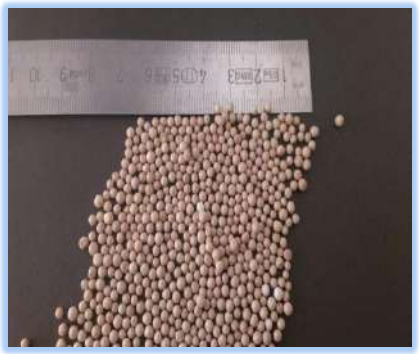
En 1988, les représentants de 31 pays ont signé le Protocole de Montréal, un traité avec lesquels ils ont décidé de réduire de moitié la production de CFC en 1998. Cet accord a EPF à la conscience du monde comme une menace pour la couche d'ozone. Alors que les emballages en mousse est responsable de moins de trois pour cent des CFC libérés dans l'atmosphère, la réduction de l'EPF a été ciblé comme un moyen à des niveaux inférieurs aux CFC, et les nouvelles technologies qui explorent les moyens de produire des EPF sans CFC ont prospérés. EPF a également été choisi par les écologistes car il n'est pas recyclé. Des mesures ont été prises, cependant, et les programmes sont en cours pour voir qu'un pourcentage plus élevé de l'EPF seront recyclés dans les années à venir. **[18]**

I.3.4.2.Les types de polystyrène

Il existe trois types de polystyrène :



Le polystyrène cristal ou dense



le polystyrène expansé



Le polystyrène choc ou haut impact

Figure I.13. Les déférents type de polystyrène

I.3.4.2.1.Le polystyrène cristal ou dense Celui-ci regroupe par exemple les ustensiles ou les barquettes en plastique qui peuvent être utilisés à la cafétéria de l'école. Les verres à bière couramment utilisés lors des évènements à Polytechnique font également parti de cette catégorie. **[19]**

I.3.4.2.2.Le polystyrène choc ou haut impact Celui-ci est utilisé le plus souvent dans le domaine de l'industrie. Il s'agit d'ajouter, lors de la fabrication du polystyrène, un agent spécial permettant d'augmenter sa résistance aux chocs. Cependant, on ne trouve pas de polystyrène choc à Polytechnique. **[19]**

I.3.4.2.3. le polystyrène expansé ou PES Celui-ci peut être également appelé la styromousse. Il s'agit de polystyrène dans lequel a été ajouté un agent expanseur lors de sa fabrication. Le polystyrène expansé, mousse blanche et rigide, Le PSE est très employé pour l'isolation thermique dans le bâtiment et dans l'emballage ainsi que pour la protection contre les chocs. Il est aussi utilisé pour la construction des décors de cinéma et de télévision. Cela en fait une matière légère constituée de plus de 80% d'air. Le PSE est très utilisé à la cafétéria de l'école Polytechnique. **[19]**

I.3.4.3.Composition chimique

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène (figure I.14). Structurellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone **[20].**

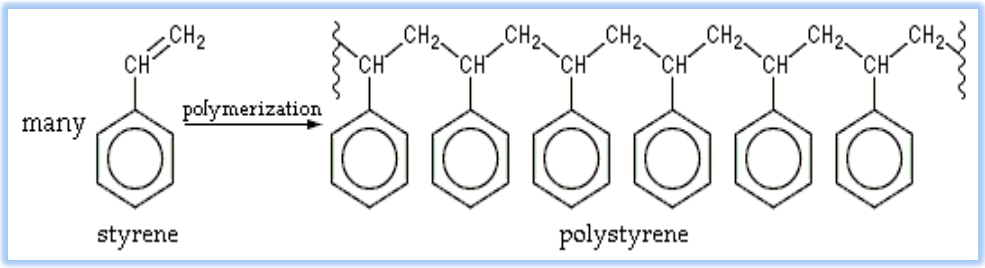


Figure I.14. Structure chimique du polystyrène

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

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un « porogène » (ou agent gonflant) : le pentane,

- Ceux destinés à la fabrication de produit « difficilement inflammable » ou auto- extinguibles », cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane,

- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques.

La structure du polystyrène expansé comporte des soudures interperles, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200 μm (figure I.15).

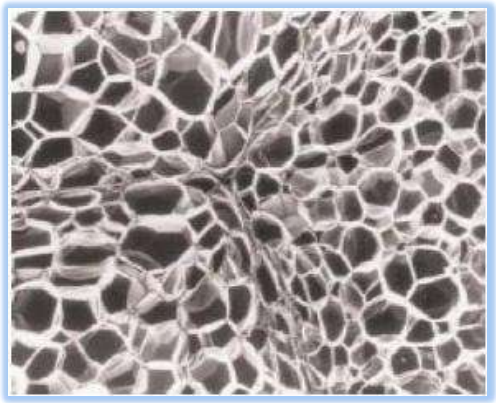


Figure I.15. Structure alvéolaire du polystyrène

I.3.4.4.Matières premières du polystyrène expansé

Le composant principal d'EPF est le styrène (8 C H 8), qui est dérivé de pétrole ou de gaz naturel et formé par une réaction entre l'éthylène (2 C H 4) et le benzène (C 6 H 6); le benzène est produit à partir de charbon ou synthétisé à partir pétrole. Le styrène est polymérisé soit par la chaleur ou par un initiateur tel que le peroxyde de benzoyle. L'arrêt de la polymérisation est difficile, mais inhibiteurs tels que l'oxygène, le soufre, ou quinol peuvent être utilisées. Pour former la densité faible, les cellules faiblement fixées EPF est constatée pour le polystyrène doit d'abord être mis en suspension dans de l'eau pour former des gouttelettes. Un agent de suspension, tel que le sulfate de baryum précipité spécialement ou copolymères d'acide acrylique et méthacrylique et leurs esters (produit organique formé par la réaction entre un acide et d'un alcool), est ensuite ajouté à l'eau. De nombreux agents de suspension sont utilisés commercialement. Tous sont pareillement visqueux et servent à retenir les gouttelettes, les empêchant de coller ensemble. Les billes de polystyrène produites par polymérisation en suspension sont minuscules et difficiles. Pour les faire développer, agents gonflants spéciaux sont utilisés, y compris le propane, le pentane, le chlorure de méthylène, et les chlorofluorocarbones. **[18]**

I.3.4.5.Fabrication du polystyrène expansé

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

- Pré- expansion

Le produit de base subit une phase de pré- expansion. Celle- ci s'effectue dans un prémousseur muni d'une arrivée de vapeur, d'une arrivée d'air et d'un système d'introduction des perles brutes. L'opération est faite en continu à une vitesse de 250 Kg/ heure et à une température de 97 °C. Le produit obtenu a une densité comprise entre 17 et 18 Kg/ m3.

- Stockage intermédiaire

Les perles ainsi pré- expansées sont ensuite stockées dans des silos pour y subir un « mûrissement » permettant la mise en équilibre des pressions entre les cellules dans lesquelles le porogène a en grande partie disparu sous l'action de la température et le milieu extérieur.

- Seconde expansion

Elle est faite selon la même méthode que précédemment mais dans des appareils de volume plus important. C'est au cours de cette opération que les perles sont façonnées suivant le produit que l'on désire obtenir.

I.3.4.6.Propriétés du polystyrène

Les propriétés remarquables du polystyrène sont notamment :

- Sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m3,

- Son pouvoir isolant thermique,

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

- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, …).

I.3.4.7.Billes de polystyrène

Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et Yamauchi **[21]** 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.

I.3.4.8.Les caractéristiques de polystyrène expansé

Le béton léger polystyrène est un mortier prêt à l'emploi hors du champ d'application de la norme NF EN 206-1 et des normes "mortiers" en vigueur pour les applications en remplissage.

Il est dans le champ d'application du DTU 26.2 (NF P 14-201-1) "Chapes et dalles à base de liants hydrauliques" pour ses utilisations en ravoirage ou en chape.
Le béton léger polystyrène est un mortier léger constitué de ciment, de billes de polystyrène expansé, d'adjuvants appropriés, et éventuellement de sable. Les densités du béton léger

polystyrène varient habituellement de 400 à 1200 kg/m3.

Il est ininflammable. Jusqu'à 600 kg/m3, il peut être utilisé en isolation thermique (conductivité thermique lambda utile ≤0,15 W/K.m). Selon la masse volumique, les résistances à la compression varient de 0,5 à 7 MPa et les conductivités thermiques de 0,1 à 0,6 W/K.m. Le béton léger polystyrène est un produit homogène, fabriqué en centrale à béton et livré sur chantier par camion-toupie. **[22]**



Figure I.16. Le polystyrène est inflammable.

1.3.4.9. Les avantages de polystyrène expansé

Plus léger qu'un mortier classique, le béton léger polystyrène a une masse volumique de 400 à 1 200 kg/m3 en comparaison à 2 200 kg/m3 pour un mortier classique. Le béton léger polystyrène a un pouvoir isolant thermique et phonique plus important qu'un mortier classique. Il est incombustible. Le béton léger polystyrène est un matériau imputrescible à pH basique, constitué de ciment, de sable et de billes de polystyrène expansé stabilisé. Accessibilité possible après 24 à 48 heures selon l'épaisseur. Pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs. Il est facile et rapide à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.

I.3.4.10.Différence entre le polystyrène non traite et traité

Les polystyrènes sont des alvéoles plastiques de la famille de polymères, de styrène. Il y a des douzaines de types et de qualités différentes. Le polystyrène choisi pour la production du Polys béto est spécifique par sa densité, par son coefficient d'expansion et son diamètre.

I.3.4.10.1.le polystyrène normal non traité

Plusieurs recherches **[23]** et **[24]** ont été effectuées sur des essais d'incorporation du polystyrène normal dans le béton. Nous pouvons constater que **:** Si nous mélangeons le polystyrène non traité normal avec le ciment et l'eau :

• Le polystyrène revient à la surface du béton et flottera.

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

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

• Il y aura des difficultés d'obtention d'une homogénéité du matériau, en employant l'équipement traditionnel pour faire le béton

• Difficulté de pomper ou de vibrer le béton

• Constatation d'aucune résistance au feu

D'où les conséquences négatives suivantes

• Le béton contiendra une quantité d'eau

• Résistance à la compression faible

• Pas économique : car il y aura une grande consommation de polystyrène pour alléger le béton à cause des 5 à 30 % des alvéoles du polystyrène qui seront remplis d'eau et de ciment

• L'eau contenue dans le béton produira des germes et donnera de mauvaises odeurs dans le polystyrène ainsi que dans le béton ; particulièrement dans des climats chauds et humides ou dans des pièces humides comme la salle de bains ou la cuisine.

• Délai trop grand de séchage pour le béton

• Retrait important du béton du à la grande quantité d'eau évacuée

• Possibilité d'employer des renforts d'acier écartée parce qu'ils seraient attaqués par la corrosion (à cause de l'eau contenue dans les alvéoles du polystyrène)

En conclusion l'emploi du polystyrène normal dans le béton a une pauvre image de fragilit

I.3.4.10.2.Le polystyrène traité (Le Polys béto)

Le Polys béto est un polymère rigoureusement sélectionné et expansé sous des contraintes spécifiques de température, de vitesse, et de pression, permettant ainsi aux alvéoles périphériques de s'opposer à la pénétration de l'eau. Une taille de diamètre de perle ou de bille égale au maximum à 3 mm. Donc, dès le début la matière première est complètement imperméable. Ces perles expansées sont alors traitées avec des additifs spécifiques pour

d'abord les déchargez de leurs charges électriques, puis avec d'autres additifs, pour les chargez avec des charges électriques négatives, afin que toutes les perles aient les mêmes charges électriques, et auront tendance à se repousser.

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

D'où les nouvelles perles de Polys béto qui sont

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

I.3.5. Composition chimique et minéralogique :

Selon leur nature, les granulats légers présentent des compositions chimiques et minéralogiques particulières.

I.3.5.1.Granulats en argile expansée et schiste expansé :

Malgré l'utilisation de matières premières différentes, les granulats d'argile et schiste expansés, ont une composition chimique similaire. Ils sont composés de plus de 85% de silice, d'alumine et d'oxyde de fer.

La composition chimique courante de ces granulats est présentée dans le Tableau I.4.

Tableau I.4. Composition chimique des granulats d'argile et schiste expansés **[31]**

	SiO2	**Al2O3**	**Fe2O3**	**Cao**	**MgO**	**Alcalis**	**SO3**	**S**
%	50 - 65 %	16 – 25 %	5 - 9 %	1 - 5 %	1,5 - 3,5 %	1,5 - 4,5 %	0 - 1,5 %	0 - 1,5 %

En ce qui concerne la minéralogie, les granulats d'argile et de schiste expansés sont principalement constitués de quartz, les autres silicates ayant un faible taux de cristallisation **[25], [26].**

I.3.5.2. Granulats en laitier expansé

Le laitier utilisé comme base de granulats légers doit satisfaire aux spécifications de la Norme NF P18-302. Ils sont composés à part égale d'environ 80% de silice et de chaux.

Leur composition chimique est présentée dans le Tableau I.5.

Tableau I.5. Composition chimique des granulats en laitier expansé **[31]**

	CaO	**SiO2**	**Al2O3**	**MgO**	**FeO**	**MnO**	**S**	**SO3**
%	38 - 48 %	29 - 38 %	13 - 24 %	<= 6 %	<= 4 %	<= 2 %	<= 2 %	<= 0,5 %

I.3.5.3.Pierre ponce et granulats de cendres volantes frittées :

Varquier **[27]** donne les compositions chimiques de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes, reportées ici dans le Tableau I-6. La ponce est riche en silice, en alcalins et possède une teneur non négligeable en sulfoxinium. La cendre volante possède plus d'alumine que les autres types des granulats légers.

Tableau I.6. Composition chimique de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes frittées **[27]**

	SiO2	**Al2O3**	**MgO**	**Fe2O3**	**CaO**	**K2O + Na2O**	**SO3**
Pierre Ponce	69 %	18 %	1,0 %	2,0 %	3,0 %	5,0 %	1,8 %
Cendre Volante	49,5 %	30,2 %	2,4 %	9,5 %	4,6%	3,0 %	0,9 %

Composés chimiques Valeurs extrêmes (%) SiO250 à 70Al2O316 à 20Fe2O35 à 9

I.3.6.L' absorption d'eau

La méthode de fabrication des granulats a une influence notable sur leurs propriétés et sur celles des bétons élaborés avec ces derniers. La texture de la surface, la forme des particules et la porosité varient notamment entre les différents types de granulats légers, en fonction de la matière première, du procédé de fabrication et de la taille des particules du matériau final. Cependant, de toutes les caractéristiques susceptibles de fluctuer, la porosité est le paramètre le plus significatif. En effet, elle a une incidence sur toutes les autres propriétés et peut varier entre 20 et 75 % du volume du granulat **[28].**

L'absorption d'eau des granulats légers est généralement décrite comme une succession de deux phases :

- une phase d'absorption rapide (de quelques secondes jusqu'à quelques heures) qui intervient dès que les granulats secs sont immergés ;

- une période d'absorption plus lente jusqu'à l'atteinte d'une valeur stable (cette phase peut durer jusqu'à deux ans).

D'un point de vue microscopique, ces deux phases s'expliquent par les caractéristiques des pores, i.e. la structure et la distribution porosimétrique **[28].** Selon le type de granulats, les pores ont un diamètre qui peut varier de 1 µm jusqu'à 300 µm **[28]** ; **[29].** Généralement, les pores proches de la surface sont facilement perméables et hautement interconnectés. Les pores intérieurs se remplissent beaucoup plus lentement, une grande partie d'entre eux n'étant pas interconnectés.

Des granulats ordinaires, de calcaire par exemple, absorbent généralement moins de 2 % d'eau par masse de granulats secs (essais d'absorption à 24 heures selon les normes ASTM C127 et ASTM C128). Pour des granulats légers de structure, l'absorption à 24 h peut atteindre 25 %. Dans le cas des granulats légers, l'eau est absorbée au cœur des particules,

alors que pour des granulats ordinaires, l'eau se situe essentiellement en surface **[29].** Cette différence joue un rôle primordial dans la formulation des mélanges. En effet, le taux d'absorption est unique pour chaque granulat léger, puisqu'il dépend des caractéristiques des pores qui sont propres à chaque type de granulat léger. Les figures I.17et I.18 illustrent la différence qui peut exister entre deux granulats légers, respectivement de schiste expansé et d'argile expansée.

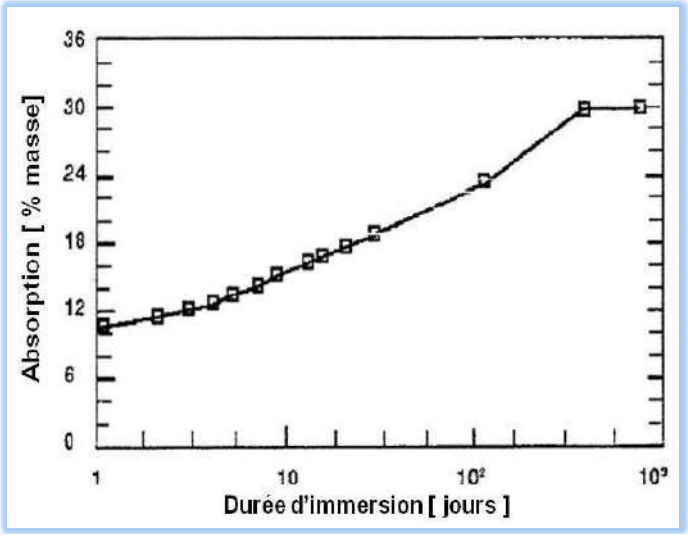


Figure I.17.Évolution de l'absorption de gros granulats légers produits par ESCS (Expanded Shales Clays and Slates) pendant une immersion de deux ans **[29]**

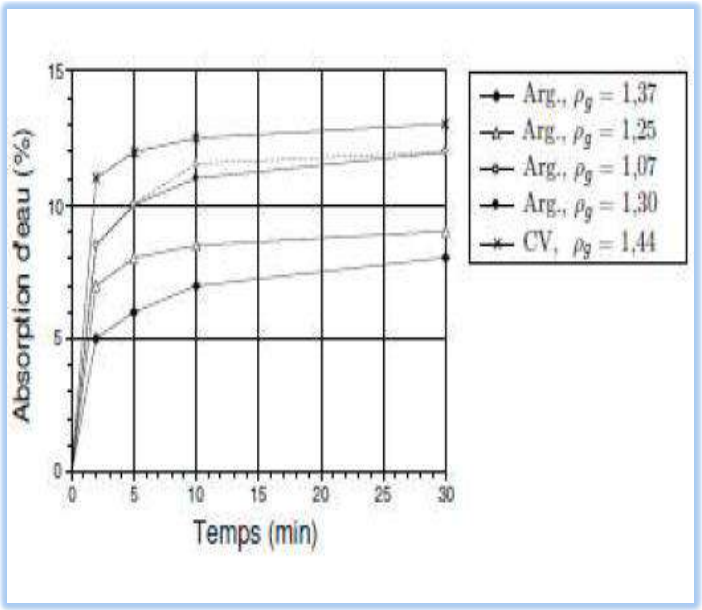


Figure I.18. Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansée bouletée (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρg **[30]**

Finalement, la densité des granulats à l'état saturé surface sèche est difficile à exprimer, car la présence de gros pores en surface ne permet pas d'établir à quel moment cet état est atteint.

I.3.7.La Porosité :

La porosité des granulats est une caractéristique importante qui influence directement leur propriété hygrométrique et par voie de conséquence la maniabilité du béton. Les granulats légers ont des porosités totales très importantes, entre 25% et 75% de leur volume apparent. Cette porosité varie proportionnellement avec la taille des grains. Plus la taille des grains augmentent, plus la porosité n'est importante. La taille de pore varie considérablement de moins de 4 nm jusqu'à plus de 1 mm.

La forme des pores est plutôt irrégulière. On distingue deux types de pores : les pores ouverts et les pores fermés. Les pores ouverts forment un système poreux continu dans le matériau. Les pores fermés sont isolés et ne sont pas reliés ensemble. Seul le système de pore ouvert peut contribuer au transport de la matière dans le matériau **[30].** Plus les pores sont interconnectés, plus l'absorption d'eau est élevée. Le pourcentage des pores ouverts dans l'ensemble des pores est très variable selon les natures de granulats légers. Ainsi, pour les granulats légers utilisés dans les travaux de Zhang et Gjorv **[30],** la plupart des pores sont ouverts, les pourcentages de pores ouverts étant tous supérieurs à80%. Mais, pour les granulats légers utilisés par Faust et Beck, ces pourcentages varient entre 14% et 90%. Certains types de granulats comme l'argile expansée ont une enveloppe externe dense entre 0,1 et 0,3 mm d'épaisseur, moins poreuse que l'intérieur. Lors de la cuisson des nodules d'argile, quand la température de fusion est atteinte, il se forme en effet une pellicule vitrifiée à la surface des nodules. Sur les cendres volantes frittées, aucune différence de structure n'a par contre été observée entre la périphérie et l'intérieur du granulat **[30].**

I.3.8.Propriétés des bétons de granulats légers :

Nous nous proposons maintenant de décrire les propriétés des bétons de granulats légers, plus spécifiquement leur résistance à la compression et à la traction, l'ouvrabilité, fluage, retrait, coefficient de poisson et la conductivité thermique et module d'élasticité ces propriétés à partir des travaux expérimentaux de la littérature.

I.3.8.1.Ouvrabilité :

Les bétons de granulats légers présentent. En général. Une moins bonne ouvrabilité que les bétons classique. On peut cependant obtenir une mise en œuvre relativement facile en étudiant la composition la mieux adaptée (finesse et dosage du sable en particulier) ainsi que le dosage en eau. Et en employant éventuellement un adjuvant : les entraineurs d'air sont considères comme favorables mais pouvant provoquer certaines difficultés en cas de mise en œuvre par

pompage à grande distance (effet de ressort) : l'emploi d'un plastifiant donnant en même temps une bonne cohésion est souhaitable. [**2]**

La mesure de l'affaissement au cône est moins significative que pour les bétons de matériau dense. Surtout si le dosage en ciment est inférieur à 350 kg/m3. On peut de préférence utiliser le test d'ouvrabilité C.E.S.

I.3.8.2.Résistance

Les résistances sont moins élevées que pour les bétons classiques de granulats denses et elles le sont d'autant moins que la densité du béton est plus faible (figure I.19). **[2]**

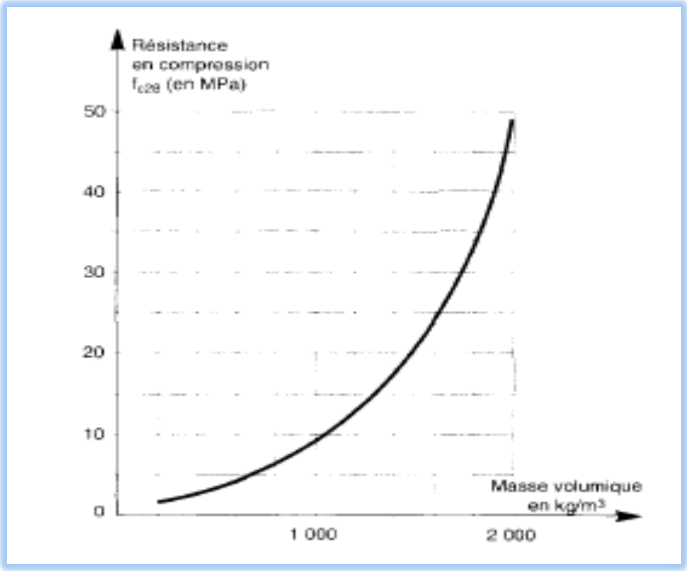


Figure I.19. Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique **[2]**

La qualité de résistance intrinséque du matériau constituant les granulats légers est évidemment un paramètre prépondérant. Donc étant donné les variations de qualité des divers granulats légers, il est nécessaire d'effectuer des essais sur éprouvettes pour expliciter ce paramétre fondamental. **[2]**

Pour les béton de structures, en employant des granulats de bonne qualité avec un sable naturel , il semble que l'on puisse obtenir à 28 jours des résistances de l'ordre de 30 à 35 MPa avec toutefois les dosages en ciment un peu supérieurs à ceux des bétons classiques de même résistances ; comme dans le cas des bétons classiques, le durcissement à la vapeur accélère le dé veloppement de la résistance en compression.

Les résistances en traction sont un peu plus faibles que celles des bétons classiques,toute proportion gardée, par rapport à la résistance en compression : on propose actuellement la formule suivante :

f_t (traction) = 0,5 + 0,05 f_c (comp.) (en MPa).

Par ailleurs , compte tenu de leur moindre conductivité thermique, les bétons légers conservent mieux leur chaleur d'hydratation au moment de la prise du ciment ; il en résulte un durcissement plus rapide ; par exemple le rapport $\frac{f_{c28}}{f_{c7}}$ qui est de l'rdre de 1,4 à 1,5 pour les bétons traditionnels n'est que de 1,2 à 1,23 pour les béton légers à résistances équivalentes à 28 jours. On admet , en général (actuellement) que pour un âge $j < 28$ *j*. on a $f_{cj} = f_{c28} \times 0{,}832 \left(\log (1+j)\right)$. Ce qui conduit aux valeurs apprximatives suivantes du rapport :

$$\frac{f_{c28}}{f_{cj}}$$

I.3.8.3.Module d'élasticité :

Pour les bétons de structure, le module d'élastisité instantanée varie de 10 000 à 20 000 MPA soit, approximativement, la moitié de celui de béton classiques ordinaires**. [2]**

On préconise actuellement la formule suivant :

$$E_{ij} = 1670^2 \ \Delta^3 f_{cj} \quad \text{(MPA)}$$

E_{ij} est le module d'élasticité instantanée en MPA, à l'âge j ;

f_{cj} est la résistance en compression en MPA, à l'âge j ;

Δ est la masse volumique en t/m^3.

Il semble que le module d'élastisité à la traction soit le même qu'à la compression.

I.3.8.4.Coefficient de poisson :

Il est du même ordre de grandeur que celui des bétons traditionnels. On admet en général une valeur de 0.15 dans les calculs.[2]

I.3.8.5.Fluage

Du fait de leur module d'élasticité instantané moitié plus faible, les bétons légers présentent des déformations instantanés du double environ de celles des bétons traditionnels, cependant leur déformation de fluage est du même ordre que leur déformation instantanée (et non du

double comme pour les bétons traditionnels). [2] C'est pourquoi on préconise comme formule donnant la valeur de la déformation totale finale :

$$E_r = 835^2\ \Delta^3 f_{cj} \quad \left(835 = \frac{1670}{2}\right)$$

Il en résulte que, compte tenu de leur durcissement initialement plus rapide, les bétons légers ne semblent pas devoir engendrer des pertes de précontrainte par fluage plus importante que les bétons traditionnels (cette remarque est même à leur avantage pour les précontraintes aux âges très jeunes).

I.3.8.6.Retrait

Les bétons légers présentent pour la plupart, un retrait plus imprtant que les bétons traditionnels et également plus tardif car l'eau absorbée par les granulats se trouve progressivement restituée, retardant ainsi la déshydratation du mortier , cause principal du retrait. Selon le dosage en ciment et en eau et solon le degré de dessiccation vers lequel tend le béton, le retrait relatif $\Delta l / l$ peut être évalué en valeur finale à :

6.10^{-4} dans le queart sud- est de la France.

$5.\ 10^{-4}$dans le rest de France.

Pour des âges intermédiaires la fonction retrait r(t) pourra être évalueée au moyen du graphique de la figure I.20**.[2]**

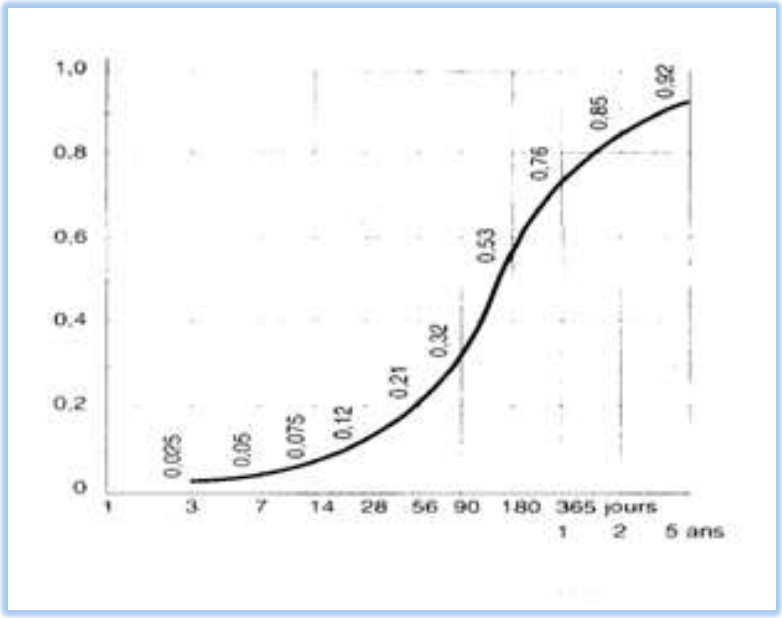


Figure I.20. Développement du retrait en fonction du temps

I.3.8.7.Conductivité thermique

Une des propriétés intéressantes des bétons de granulats légers et leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'aire interposées dans l'épaisseur de béton ; ce pouvoir d'isolation se trouve caractérisé par le coefficient de conductivité thermique λ (quantité de chaleur que laisse passer dans l'unité de temps une épaisseur de matériau de 1cm pour une différence de température de 1°C entre les deux faces).

Le béton parfaitement sec se trouve plus isolant que le béton humide et on définit un coefficient λ utile « λ_u » correspondant à un taux d'humidité interne moyenne de l'ordre de 4%. **[2]**

Pour les bétons traditionnels de masse volumique comprise entre 2200 et 2400kg/m³ on a un λ_u moyen de 1,5 en Kcal/m/h/l °C. Pour les bétons de granulats légers. On admet actuellement les valeurs suivantes :

Tableau I.7. Les valeurs de la masse volumique et la conductivité thermique de béton des granulats légers

	Masse volumique sèche (kg/m³)	**λ_u en Kcal/m/h/1°Cv**
Béton caverneux normal	800/1 000	0,30
Béton plein avec sable léger	1 000/1 200	0,40
Béton plein avec sable léger et sable de rivière	1 200/1 400	0,60
Béton plein avec sable de rivière	1 400/1 600	0,75

Les bétons légers à base de billes de polystyrène expansé doivent être considérés à part. Leur masse volumique (inferieure à celle de la classe LC 1,0) peut être comprise suivant les formulations entre 400 et 800 kg/m³ ou plus, jusqu' à 1200 à1300 kg/m³, en diminuant le pourcentage de billes de polystyrène constituant le gros granulat par rapport au mortier.

Ces bétons constituent de bons isolants thermiques et phoniques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de bons isolants thermiques et phoniques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0,20 pour des densités de 0,4, à 0, 30 pour des densités de 0,8 . Ils peuvent être confectionnes en centrale de BPE et sont éventuellement pompables a laide de pompes a rotor au travers de canalisations de 80 ou 100 mm maximum. Leur mise en place

est aisée a la condition de ne pas les vibrer, ce qui provoquerait une remontée des billes de polystyrène. **[2]**

Ces bétons peuvent être utilises comme forme de pente, en isolation de toiture. En réfection de planchers anciens, mais dans ce dernier cas avec complément d une chape destinée à éviter les poinçonnements ultérieurs. **[2]**

Ils peuvent être compares aux bétons cellulaires quant aux caractéristiques et usages.

I.4.Conclusion

Dans ce partie, une vision globale sur les bétons légers a été donnée a travers leurs définitions, leurs types et classes ainsi ses composantes.

Dons notre études on a choisir les granulats ultras légers de polystyrène expansé qu'on peut le produire dans notre pays.

Chapitre II: Matériaux et essais

II.1 Introduction

Cette partie concerne la caractérisation des matériaux utilisés et les essais faits en laboratoire. Des essais expérimentaux sont effectués afin d'étudier les propriétés physiques, mécaniques.

II.2. Programme expérimental

II.2.1. Matériaux utilisées

Dans ce travail et dans le but de pouvoir comparaitre les résultats d'un mortier témoin et un autre mortier à base de polystyrène Les constituants entrant dans la composition de la matrice sont caractérisées comme suit :

II.2.1.1. Le ciment

Un seul type de ciment est utilisé au cours de cette étude expérimentale **[32]**. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II/A 42.5, dont l'ajout est le calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[33]**. Ciment de « CHLEF » est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile. Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'aluminium (Al_2O3) et le fer (Fe_2O3).

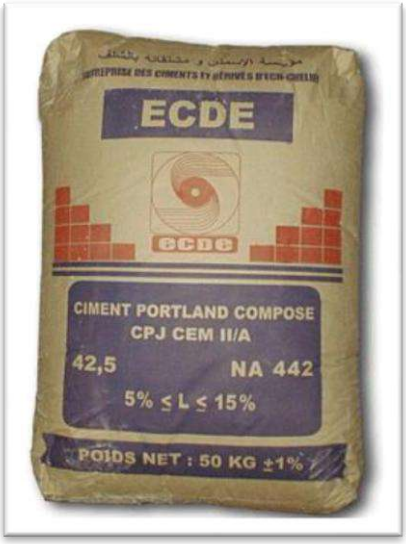


Figure II. 1. ciment de CHELEF

Ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 °C et 1500°C. En présence d'eau à lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant constitué principalement de microcristaux de silicates de calcium hydratés. Ciment de CHLEF présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico chimiques conforment à la norme NA 442 **[33].**

- **Essais physiques**

- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[34]**.

- **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[35]**.

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme [NF P 15-473] **[36]**. Le tableau II.1 résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau II.1. Essai physiques sur ciment

Essais	Norme
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.50-28.00
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1000
Expansion (mm)	0.50 – 2.50
Début de prise (min)	120 – 180
Fin de prise (min)	210-280

- **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme [NF P 15-471] **[37]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm^3 à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier

normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le tableau II.2.

Tableau II.2. Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge

Ages (jours)	Résistance à la compression (MPa)
2	>20
28	≥ 42.5 et 62.5



Figure II.2 : Le ciment utilisé

II.2.1.2 Le sable

A. Le sable roulé

Le sable roulé utilisé dans cette étude est Hassi Bah bah de la région de Djelfa **[38]**, située à 300 Km au sud d'Alger, sa classe granulaire est 0/0,315, c'est un sable fin (figure II.3) et est utilisé pour corriger le sable de concassage utilisé.

B. Le sable de concassage

Pour le sable de concassage utilisé (figure II.3) de dimension 0/3, provenant de la station de concassage de MONT GORNO situé à 25 Km au sud de Médéa.



- Le sable roulé - - Le sable de concassage-

Figure II.3 : Les sables utilisé

II.2.1.3. Les polystyrènes expansés :

La fabrication des billes de polystyrène est réalisée dans l'usine ENL sise à la zone industrielle d'Oued- Smar Alger. Proviennent de la ces billes sont ensuite traitées par la société IBER CONSTRUCTION SARL dans la même usine pour obtenir le produit POLYS BETO**. [40]**

POLYS BETO est constitué de billes de polystyrène de diamètres variant entre 1,5 et 4 mm traitées en surface par un agent tensioactif spécifique. Ce traitement assure aux billes une intégration et une répartition homogènes dans le mortier ou béton qu'on souhaite alléger en se substituant aux sables courants ou légers. Les caractéristiques des polystyrènes utilisés est résumé dans le tableau suivant :



Figure II.4. Mesure des billes de polystyrène

Tableau II.3. Caractéristiques de polystyrène POLYS BETO **[40]**

Nomination Caractéristiques	**POLYS BETO**
Granulométrie (mm)	1,5 à 4 mm
Masse volumique apparente après traitement (kg/m^3)	28 à 32
Masse volumique absolue (kg/m3)	33
Conductivité thermique sèche (W/m.K)	0,045

II.2.1.4.adjuvant «plastifiant » :

L'adjuvant utilisé est un plastifiant réducteur d'eau fabriqué par la société, Algérienne Graniteux commercialisé sous l'appellation '**Medafluid 104'** (figure II.5)**,** de forme liquide ; de couleur marron ; d'un PH égal à 6, de densité 1,04 ± 0,01 et d'une teneur en chlore < 1g/L. **[41]**



Figure II.5. Plastifiant

II.2.1.5. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau potable du robinet **[2]**, exempte d'impuretés, conforme à la norme [NFP 18-303] **[42]**.

II.2.2.Protocol d'essais

A raison de trois éprouvettes par essai, deux âges (essais mécaniques), et l'utilisation des différents pourcentages de polystyrène expansé, le nombre d'essais effectué sur les mortiers réalisés est résumé comme suite :

- ✓ 58 essais sur ouvrabilité ;
- ✓ 14 essais d'aéromètre ;
- ✓ 174 essais de traction par flexion ;
- ✓ 348 essais de compression simple ;
- ✓ 14 essais sur l'absorption d'eau ;
- ✓ 14 essais sur conductivité thermique ;

II.2.3 Préparation des matériaux

- **Lavage du sable de concassage**

Le lavage du sable doit se faire afin d'obtenir un constituant propre, exempte d'éléments nocifs et de fines. Le lavage est effectué sous l'eau de robinet en procédant au tamisage de sable avec un tamis de maille égale à 0.063 mm **[43]**.

II.2.4 Confection et Conservation des éprouvettes :

La norme [EN 196-1] **[44]** décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai. Le mortier préparé, est remplit dans un moule (4 x4 x16 cm). Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux fois et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide.

Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à 20 C° ± 2 C°.

Au jour prévu, les 6 éprouvettes de chaque mélange sont rompues en flexion et en compression. Les normes [ENV 197-1] **[45]** 45et [NFP 15-301] **[46]** définissent les classes de résistance des ciments d'après leur résistance à 7 et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment.

II.2.5 Composition des mortiers :

Sept différentes familles (MT0% -M5% -M15% -M25% -M50% -M75% - 100%) de mortier sont fabriquées à base de POLYSTYRENE EXPANSE et de sable corrigé et à un mortier témoins (MT0%). Pour les mortiers, le rapport E/C est variable correspondant à la composition qui a donnée une meilleure ouvrabilité.

Les compositions des déférents dosages sont représentent sur les tableaux (II.4, II.5, II.6, II.7)

Tableau II.4 Compositions de mortiers pour 1m^3 avec C = 450Kg et 0.5 % Plastifiant

	MT0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
	0,00	0,05	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00
pourcentage	0,00	5,00	15,00	25,00	50,00	75,00	100,00
Ciment (Kg)	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00
Sable (kg)	1302,50	1237,38	1107,13	976,88	651,25	325,63	0,00
PSE(kg)	0,00	0,82	2,45	4,09	8,17	12,26	16,34
Eau (l)	247,50	225,00	216,00	198,00	171,00	148,50	121,50
E/C	0,55	0,5	0,48	0,44	0,38	0,33	0,27
γth kg/m^3	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Ps (kg) 0,5%	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25	2,25

Tableau II.5. Composition de mortier pour 1m^3 avec C= 450 Kg et plastifiant 1%

	MT0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
	0,00	0,05	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00
pourcentage	0,00	5,00	15,00	25,00	50,00	75,00	100,00
Ciment (Kg)	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00
Sable (kg)	1325,00	1258,75	1126,25	993,75	662,50	331,25	0,00
PSE (kg)	0,00	0,83	2,49	4,16	8,31	12,47	16,63
Eau (l)	225,00	211,50	193,50	180,00	153,00	130,50	117,00
E/C	0,5	0,47	0,43	0,4	0,34	0,29	0,26
γth kg/m^3	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Ps (kg) 1%	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Tableau II.6. Composition de mortier pour 1m^3 avec C = 500Kg et 0.5 % plastifiant

	MT0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
	0,00	0,05	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00
pourcentage	0,00	5,00	15,00	25,00	50,00	75,00	100,00
Ciment (Kg)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Sable (kg)	1280,00	1216,00	1088,00	960,00	640,00	320,00	0,00
PSE(kg)	0,00	0,80	2,41	4,02	8,03	12,05	16,06
Eau (l)	220,00	195,00	185,00	175,00	140,00	115,00	100,00
E/C	0,44	0,39	0,37	0,35	0,28	0,23	0,2
γth kg/m^3	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Ps (kg) 0,5%	5	5	5	5	5	5	5

Tableau II.7.Composition de mortier pour 1m^3 avec C = 500Kg et 1% plastifiant.

	MT0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
	0,00	0,05	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00
pourcentage	0,00	5,00	15,00	25,00	50,00	75,00	100,00
Ciment (Kg)	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
Sable (kg)	1265,00	1201,75	1075,25	948,75	632,50	316,25	0,00
PSE(kg)	0,00	0,79	2,38	3,97	7,94	11,90	15,87
Eau (l)	235,00	220,00	205,00	190,00	165,00	135,00	120,00
E/C	0,47	0,44	0,41	0,38	0,33	0,27	0,24
γth kg/m^3	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
Ps (kg) 1%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

MT0% : Mortier à base de sable corrigé avec 0 % de polystyrène expansé (témoins).

M5% : Mortier à base de sable corrigé avec 5 % de polystyrène expansé.

M15% : Mortier à base de sable corrigé avec 15 % de polystyrène expansé.

M25% : Mortier à base de sable corrigé avec 25 % de polystyrène expansé

M50%: Mortier à base de sable corrigé avec 50 %de polystyrène expansé.

M75% : Mortier à base de sable corrigé avec 75 % de polystyrène expansé.

M100% : Mortier avec 100% de polystyrène expansé (absence de sable).

II.2.6. Equipement nécessaire :

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la norme [EN 196-1] **[44]** et est illustré.

- Une salle maintenue à une température de 20 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 % ;
- Un bac d'eau pour la conservation des éprouvettes maintenue à une température de 22 °C ± 2 °C et à une humidité relative supérieure à 100 % ;
- Une étuve maintenue à une température de 35 °C ± 5 °C et à une humidité relative inférieure à 18.5 % ;
- Un malaxeur à mortier normalisé avec une cuve de 5 L et pale de malaxage en inox;
- Des moules normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4 x 4 x 16 cm);
- Une table à chocs pour le serrage des éprouvettes, permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15 mm ± 0,3 mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s;
- Balances pour la mesure des petites et grandes quantités ;
- Tamiseuse électrique ;
- Les tamis de différentes mailles en inox ;
- Agitatrice ;
- Cône de sable, pour la mesure de la masse volumique apparente du sable ;
- Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées ;
- Spatules flexibles en acier inox ;
- Pinceaux ;



Figure II.6 : Equipement nécessaire

II.2.7. Les essais :

II.2.7.1 Les essais effectués sur les granulats :

II.2.7.1.1. Masses volumiques :

Les masses volumiques apparentes et absolues de sable utilisé ont été déterminées selon la norme [NA 451] **[47].**

- **Masse volumique apparente :**

Cet essai consiste à remplir un récipient de volume 1L par le matériau, ensuite on mesure la masse de ce dernier et on applique l'équation suivante on obtient la masse volumique apparente (ρ_{app}) **[43].**

ρ_{app}= M / 1 (kg/m^3)



Figure II.7 : Le cône et le récipient

- **Masse volumique absolue**

Cet essai (figure II.8) consiste à mettre dans une éprouvette un volume d'eau de 200 ml puis on verse 100 g du matériau dedans et par le biais de l'équation suivante on calcul la masse volumique absolue **[43] :**

$$\rho_{abs} = M / V_2 - V_1 \ (kg/ m^3)$$

À la fin, on peut tirer les indices suivants: (porosité, compacité, indice des vides).

$$C = \rho_{app} / \rho_{abs} \quad ; \quad P = 1-C \quad ; \quad I = P / C$$

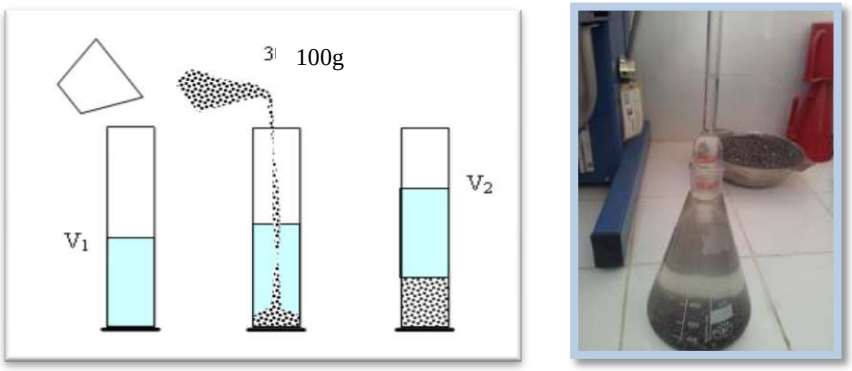


Figure II.8 : Les éprouvettes de mesure

II.2.7.1.2. Equivalent de sable

Selon la norme [NF P 18-598] **[48]**, la procédure de mesure de l'équivalent de sable est comme suit **[49]**:

- ✓ On dispose de trois éprouvettes propres pour chaque sable, puis on prendra la moyenne des trois résultats obtenus ;

- ✓ En versant une quantité de 120 g de sable, jusqu'au premier trait d'une éprouvette normalisée contenant une solution lavante, et on laisse à reposer 10 minutes.
- ✓ On bouche les éprouvettes et on les agite d'une manière automatique à l'aide d'une machine agitatrice pendant 30 secondes ;
- ✓ On lave et on remplit les éprouvettes par la solution lavante jusqu'au trait supérieur, et les laisse à reposer 20 minutes en évitant toute vibration ;
- ✓ On lit les hauteurs h_1 et h_2 puis à l'aide d'un piston on mesure h_2'.

$$ES = 100.\ (h2' / h1) \qquad \text{(EquatioII.4)}$$



Figure II.9. : Procédure de mesure de l'équivalent de sable

II.2.7.1.3.Granulométrie :

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme [NA 2607] **[50]** où le sable passant à travers une série de maille décroissante (figure II.10) dont on pèse le refus de chaque tamis **[49].**



Figure II.10 : Séries de tamis

On utilise une quantité de 1000 g pour le sable de concassage et 1000 g pour le sable roulé. On trace les courbes granulométriques pour chaque sable, puis on tire le coefficient de module de finesse MF, a partir du ce coefficient de chaque type de sable, on fait la correction du sable ayant le module de finesse le plus bas.

II.2.7.2. Les essais effectués sur le mortier :

II.2.7.2.1.à l'état frais :

II.2.7.2.1.1. Ouvrabilité du mortier

Selon les normes [NF P 18-452] **[51]** et [NF P 15-437] **[52]** le but de cet essai est de quantifier l'ouvrabilité qui est une qualité, évolutive dans le temps, du mortier avant prise, et classer les mortiers suivant une échelle de fluidité croissante (ferme, plastique, très plastique et fluide) [**49]** .Dans cet essai la consistance est caractérisé par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. L'appareil utilisé est appelé Maniabilimètre à mortier (figure II.11) et comporte :

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



Figure II.11 : Maniabilimètre à mortier

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

- ✓ Huiler légèrement les parois internes de la cuve.
- ✓ Remplir le mortier.

- ✓ Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place en deux couches.
- ✓ Chaque couche piquée de 15 coups au moyen de la tige de piquage.
- ✓ Araser la dernière couche.
- ✓ La cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibrateur et le déclenchement d'un chronomètre en même temps que la cloison est retirée.
- ✓ Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule.
- ✓ Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

  Le temps **t** mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.

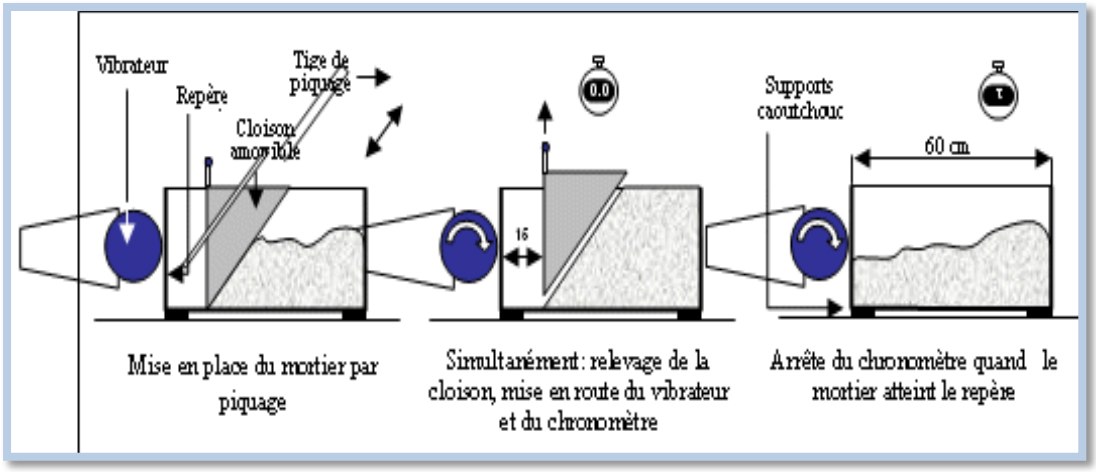


Figure II.12 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre à mortier

L'état du mortier après essais est illustré dans la figure II.13.





Figure II.13 : Etat du mortier avant et après mesure du temps d'écoulement

II.2.7.2.1.2. La masse volumique

La masse volumique du béton léger a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[53]** NA436 **[54].**



Figure II.14. : Mesure de la masse volumique à l'état frais.

II.2.7.2.1.3. Air occlus

Selon la norme [NF P 18-353] **[55]**, une cuve hermétiquement close accueille un volume donné de mortier. Ce mortier contient de l'air, susceptible d'être comprimé sous l'action d'une pression **[49]** Lorsque l'on applique une pression à l'ensemble mortier / air occlus par l'intermédiaire d'un fluide incompressible, la pression se transmet intégralement à l'air occlus (on suppose les autres éléments du mortier incompressible). L'air est comprimé sous une pression permettant de négliger son volume final au regard de son volume initial.

Le fluide incompressible occupe la place de l'air occlus dans le mortier. Le rapport de son volume déplacé au volume total utilisé permet de déterminer le pourcentage volumique d'air occlus.

a) Equipement nécessaire

- ❖ Une balance permettant de peser à 1g près,
- ❖ Un malaxeur normalisé est également requis pour la réalisation du mortier,
- ❖ Un aéromètre à mortier d'une capacité de 1L (figure II.15).



Figure II.15. Aéromètre à mortier

b) Exécution de l'essai

- ✓ Introduire le mortier dans la cuve de mesure en trois couches approximativement de même volume. Mettre en place chaque couche de mortier par 25 coups de tige de piquage également répartis sur toute la section, suite au piquage de chaque couche, tapoter de coups secs les parois du bol 10 à 15 fois avec un maillet, jusqu'à ce que tous les vides laissés par le piquage soient comblés et que de grosses bulles d'air n'apparaissent plus à la surface de la couche qui vient d'être mise en place par piquage ;
- ✓ Ajouter la couche de mortier finale de manière à éviter un trop plein excessif, araser la surface supérieure à l'aide d'une règle métallique ;
- ✓ Mettre en place le couvercle sur la cuve, le fixer en bloquant les attaches rapides diamétralement opposées (Figure II.16);
- ✓ Ouvrir les vannes rouges sur le couvercle ;
- ✓ Par la vanne de gauche, au moyen d'une pissette remplir l'aéromètre jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air et que l'eau parvienne à la vanne de droite. A la fin du remplissage, incliner légèrement l'appareil de façon à ce que la vanne de droite se trouve plus haut que la vanne de gauche. Fermer les deux vannes ;
- ✓ A l'aide de la pompe à main, amener l'aiguille du manomètre en face du repère rouge sur le cadran. Laisser s'équilibrer la pression (qui peut retomber) et pomper de nouveau de sorte à dépasser légèrement le repère. Ajuster alors précisément la position de l'aiguille à l'aide du bouton poussoir noir ;
- ✓ Tapoter légèrement sur le manomètre et l'aéromètre pour assurer que la pression ne change pas,

- ✓ Appuyer sur le bouton poussoir vert quelques secondes jusqu'à ce que les pressions entre cuve et chambre de compression s'équilibrent ;
- ✓ Le manomètre indique alors directement en pourcentage le volume d'air occlus dans le mortier **[43].**



Figure II.16. Etat final du mortier dans la cuve avant mesure

II.2.7.2.2. à l'état durci :

II.2.7.2.2.1. Essai de traction par flexion

Selon la norme [EN 196-1] **[44]** c'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion (par trois points) (Figure II.17), une éprouvette prismatique de côté a et de longueur L **[49]** .Dans notre étude, cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 7, 28 jours.

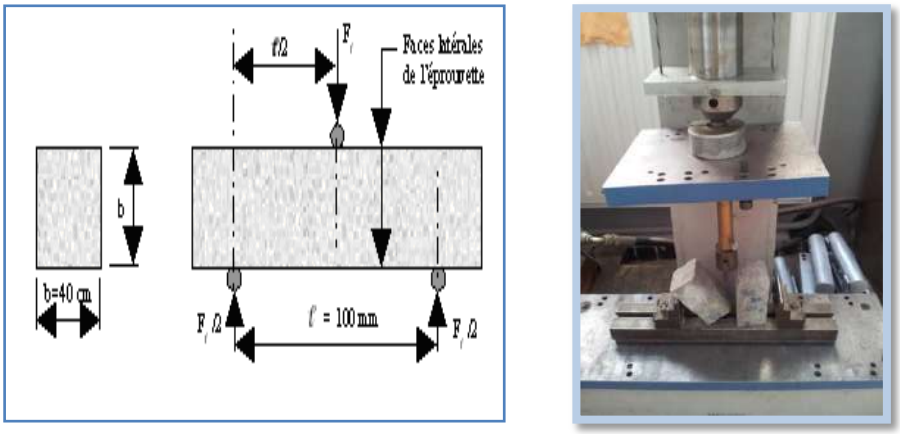


Figure II.17. Dispositif pour l'essai de résistance à la traction

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

$$\sigma_t = \frac{M}{I}\nu$$

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

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{F_f L}}{\mathbf{4}}$$

I : Moment d'inertie de la section transversale :

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{a^4}}{\mathbf{12}}$$

ν : La distance de la fibre la plus éloignée :

$$\boldsymbol{\nu} = \frac{\mathbf{a}}{\mathbf{2}}$$

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

$$\boldsymbol{\sigma_t} = \frac{\mathbf{1.5 F_f L}}{\mathbf{a^3}}$$

$$\mathbf{f_{t28} = 0.9\ Ft.L\ /\ a^3}$$

La rupture de chaque éprouvette en traction est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure.

II.2.7.2.2.2. Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [EN 196-1] **[44]** par compression axiale pour demi prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16) cm, à 3,7, 28jours, à l'aide d'une presse de capacité de 2000 kN (Figure II.18). La résistance à la compression correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai **[49].**

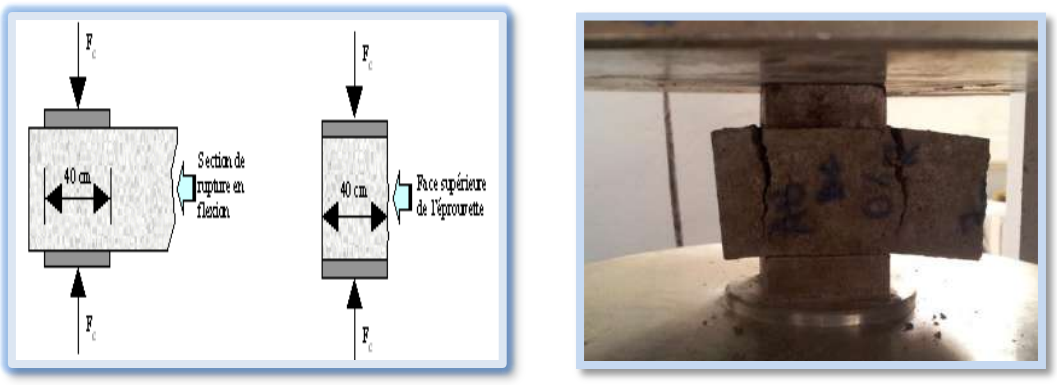


Figure II.18. Dispositif de rupture à la compression

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la figure II.18, la contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$\boldsymbol{Rc = \frac{F}{b^2}} \qquad \text{(Equation II.12)}$$

II.2.7.2.2.3. Le CT- METRE Norme de référence NF EN 993-15 [56] :

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

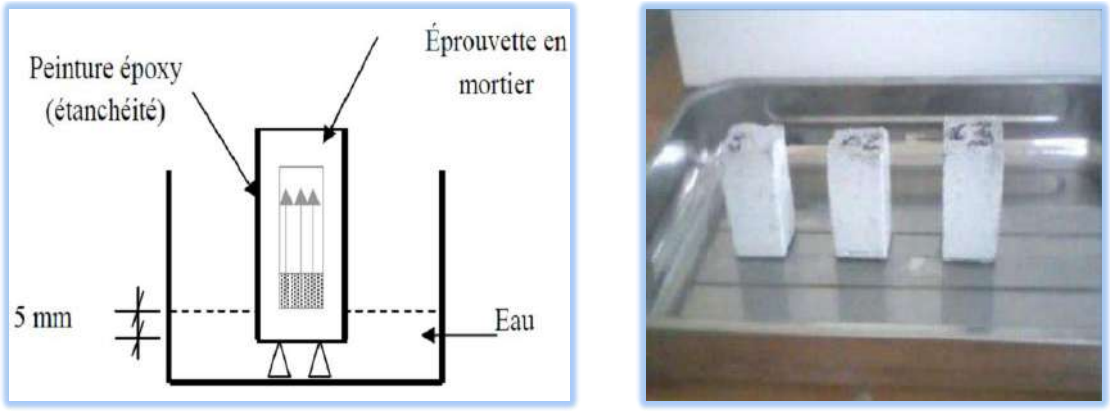
Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.



Figure II-19. Le CT-mètre

II.2.7.2.2.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité

Conformément à la norme NBN NE 13057 **[57],** dans cet essai, on prend un morceau d'éprouvette de mortier déjà utilisé puis séché. On le pèse (m_0) au début, après on l'introduire dans un bac remplit d'un film d'eau (5 mm d'eau) (figure II.20) et pendant chaque intervalle de temps (12min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h) on ressort les morceaux du bac et on les pèse (m_1) Le différent de poids entre m1et m_0 est le poids de l'eau absorbée (m_1- m_0).



a- Principe de l'essai b- Déroulement de l'essai

Figure II.20. Absorption d'eau par capillarité.

II.2.7.2.2.5.La masse volumique

La masse volumique à l'état durci du béton léger a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[53]** NA436 **[54].**



Figure II.21. Mesure de la masse volumique à l'état durci.

II.3.Conclusion

La présentation des caractéristiques des matériaux utilisés, la composition des mélanges et les procédures de mesure va ne permettre de mieux analyser les résultats et faciliter la compréhension de l'influence de différents paramètres étudiés dans notre recherche.

Chapitre III: Résultats et interprétation

III.1.Introduction

Les résultats des différents essais faîtes sur les essais de caractéristiques des matériaux utilisés est sur les différents mélanges à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

III.2. Formulation des bétons allégés

Après avoir défini les principales caractéristiques de tous les matériaux, l'étude de l'évolution des propriétés des mortiers en fonction du pourcentage de polystyrène expansé a été effectuée.

Notre objectif est de réaliser un béton isolant, léger, porteur, maniable et facile à mettre en œuvre. Selon la prés-formulation de nombre important des mortiers à base de polystyrène expansé, afin de pouvoir choisir la bonne formulation de nos mélanges, Nous avons choisies deux matrices de référence, ces matrices ont été fabriqués avec deux dosages de ciment 450 et 500kg et deux pourcentages du plastifiant 0,5 et 1% de type Medafluid 104 réducteur d'eau.

La quantité du sable utilisée liée par la masse volumique du composite choisie qui est à l'ordre de 2000kg/m^3, le taux de substitution en polystyrène expansé: 5%, 15, 25%,50%,70% et 100%.

La quantité d'eau de gâchage conditionne, en grande partie l'ouvrabilité d'un mortier. Le degré d'ouvrabilité s'il existait toutes fois un moyen de la spécifier et de le mesurer serait fonction de la maniabilité.

Pour les différentes substitutions, des quantités d'eau successives seront réduites aux mélanges jusqu'à l'obtention d'une maniabilité constante. Pour ce faire nous avons utilisé le Maniabilimètre (figure II-11), Dans cet essai la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide. Cette procédée est arrêtée quand le temps d'écoulement des mélanges est hors du temps choisie. Parconséquant, durant l'essai d'ouvrabilité et pendant la phase de pré-formulation, un rapport eau/ ciment (E/C) variable est constaté.

Notons que le calcul de la composition des mortiers a été fait par la méthode des « volumes absolus ».

III.3.Caractéristique des granulats

III.3.1.Equivalent de sable

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont résumés dans le tableau III.1 suivant :

Tableau III.1.L'équivalent de sable des différents sables utilisés

Sable	ESV	ES	Observations
Roulé	90.54	61.73	Sable légèrement argileux : à ne pas utiliser seul
Concassé Lavé	96.11	88.34	Sable très propre : bonne utilisation

III.3.2. La Masse volumique

Après avoir soumis les granulats utilisés à différentes essais de caractérisation, les résultats trouvés sont résumés dans les deux tableaux suivant (Tableau III.2 et III.3) :

Tableau III.2. Les masses volumiques de sable utilisé

Sable	Roulé	Concassé lavé
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1435	1530
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2613	2631

Tableau III.3. Compacité, porosité et indice des vides de sable utilisé

Sable	Roulé	Concassé lavé
Compacité (%)	54.9	58.1
Porosité (%)	45.1	41.9
Indices des vides	0.82	0.72

III.3.3. La granulométrie de sable utilisés

Afin de tracer la courbe granulométrique de sable, le sable utilisé sont soumis au tamisage et les résultats trouvés sont récapitulés dans les tableaux III.4 et III.5 suivants :

III.3.3.1. Le sable roulé

Tableau III.4.L'analyse granulométrique du sable roulé.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat (%)
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3.15	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.63	0	0	0	100
0.315	22.3	22,3	2,22	97,78
0.20	195.4	217,7	21,64	78,36
0.16	510.8	728,5	72,42	27,58
0.1	267.4	995,9	99,00	1,00
0.063	8.7	1004,6	99,86	0,14
Fond	1.4	1006	100,00	0

Mf =0.74 → le sable est très fin et uniforme.

III.3.3.2. Le sable concassé

Tableau III.5 : L'analyse granulométrique du sable concassé.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat (%)
5	2.8	2.8	0,28	99,72
4	34.9	37.7	3,75	96,25
3.15	129.4	167.1	16,61	83,39
2	289.5	456.6	45,39	54,61
1.25	212.6	669.2	66,52	33,48
0.63	214.2	883.4	87,81	12,19
0.315	115.2	998.6	99,26	0,74
0.20	6	1004.6	99,86	0,14
0.16	0.3	1004.9	99,89	0,11
0.1	0.4	1005.3	99,93	0,07
0.063	0.1	1005.4	99,94	0,06
Fond	0.6	1006	100,00	0

Mf =3.88 → le sable est grossier et bien étalé.

A travers ces résultats trouvés, la courbe granulométrique des sables utilisés est illustrée dans la figure III.1 suivante :

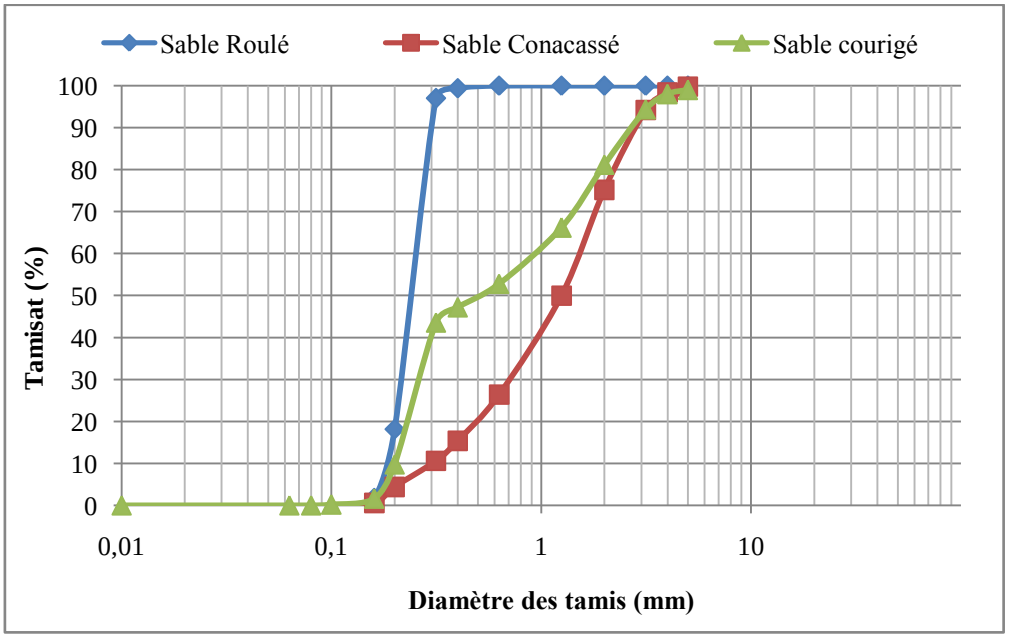


Figure III.1 : La courbe granulométrique des sables utilisés

A travers ces résultats, il passait clair que le sable (concassé) est grossier alors que l'autre est fin, ce que nous oblige de corriger le sable fin par le sable grossier pour avoir un mélange convenable avec un module de finesse acceptable.

III.3.3.3. Correction des sables

Selon la méthode d'ABRAMS **[2]** et le module de finesse souhaité (**Mf** souhait = 2.5), on calcul les paramètres S_1, S_2 et S suivants :

$$\begin{cases} S_1=3.88-2.5=1.38 \\ S_2=2.5-0.74=1.76 \\ S=1.38+1.76=3.14 \end{cases}$$

Le sable mélange (concassé et roulé) sera composé alors des portions suivants :

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

III.4.Caractérisation des mortiers

Les résultats données ci-après sont regroupés selon deux modes : à l'état frais et à l'état durci.

III.4.1. Les essais réalisés à l'état frais

Trois essais réalisés sur le mortier à l'état frais sont : la maniabilité, la masse volumique et l'air occlus. Afin de limiter le nombre de compositions et de pouvoir comparer sur une base commune, les différents mélanges ont été réalisés avec un différent dosage du ciment et le rapport E/C.

III.4.1.1. La maniabilité

Les résultats sont représentés sur un histogramme (Figure III.2, III.3**)** qui permet de comparer les valeurs du temps d'écoulement des différentes mortiers réalisés. comme indiqués les figures ci-dessous :

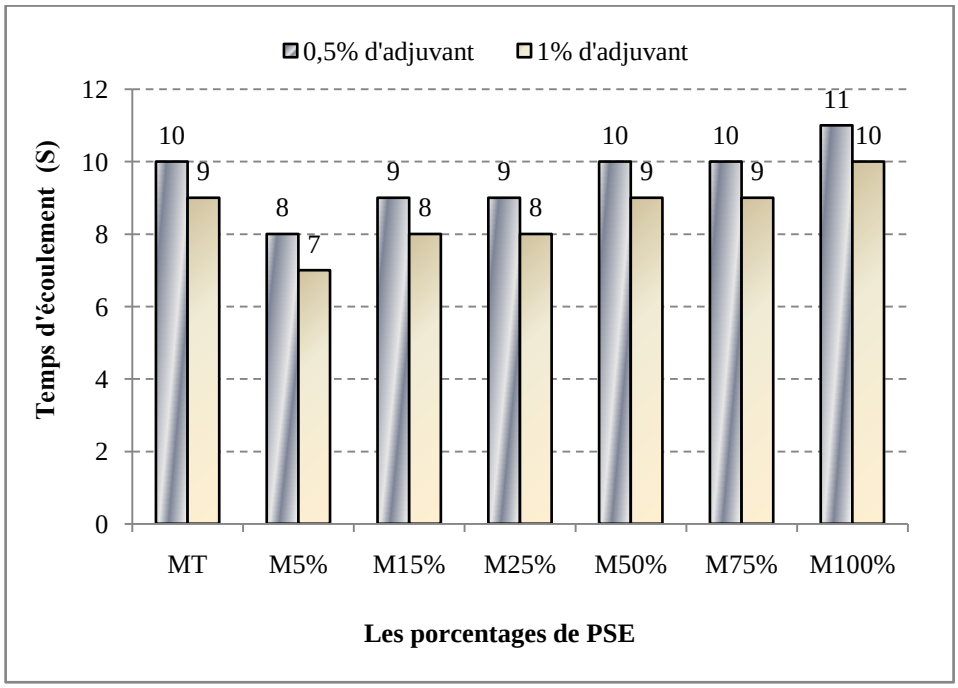


Figure III.2. Le temps d'écoulement des mortiers pour le dosage du ciment C =450 kg/m^3

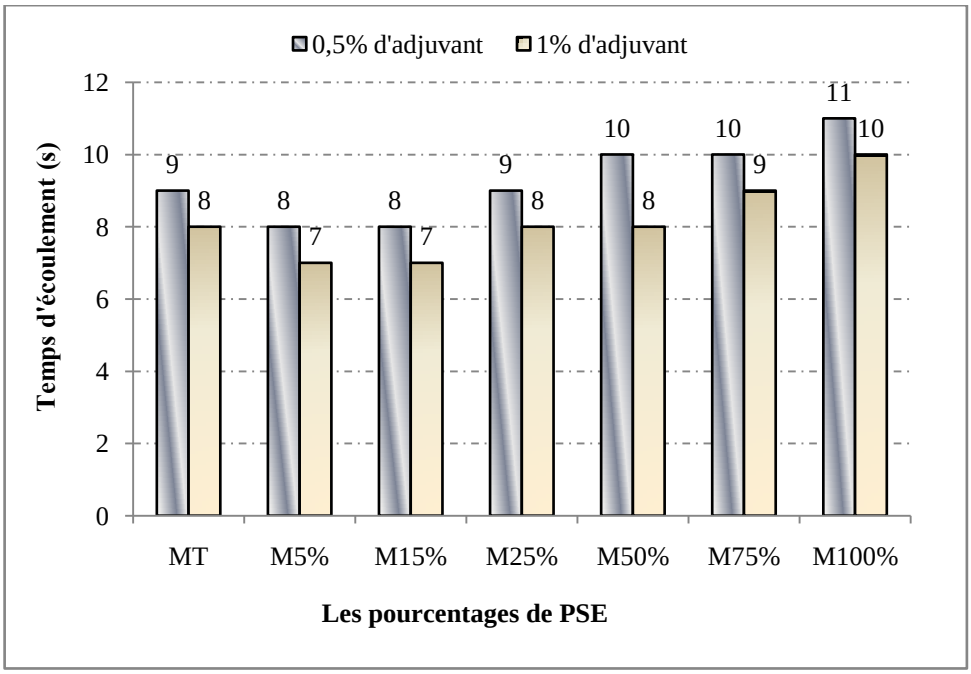


Figure III.3. Le temps d'écoulement des mortiers pour le dosage du ciment C = 500 kg/m^3.

Pendant la confection des éprouvettes, nous avons remarqué que la substitution du sable par le polystyrène, le temps d'écoulement augmente au fur et à mesure lorsqu'on augmente le pourcentage du polystyrène et lorsqu'on augmente le pourcentage de plastifiant et le dosage de ciment le temps d'écoulement diminue. On remarque qu'il y a une certaine logique pour les types de dosage de ciment. Cette variation est dus principalement à la diminution du rapport E/C pour chaque mélange cela est due aux caractéristiques de polystyrène qui est un matériau qui ne peut absorber l'eau pour obtenir une maniabilité constante pour touts les mélanges (un temps d'écoulement entre 7(s) et11(s)).

Ces résultats sont plus ou moins proches a celles trouvés par d'autres chercheurs MILED **[16]**

III.4.1.2. L'air occlus

La Figure III.4 présente les différentes valeurs de l'air occlus trouvée.

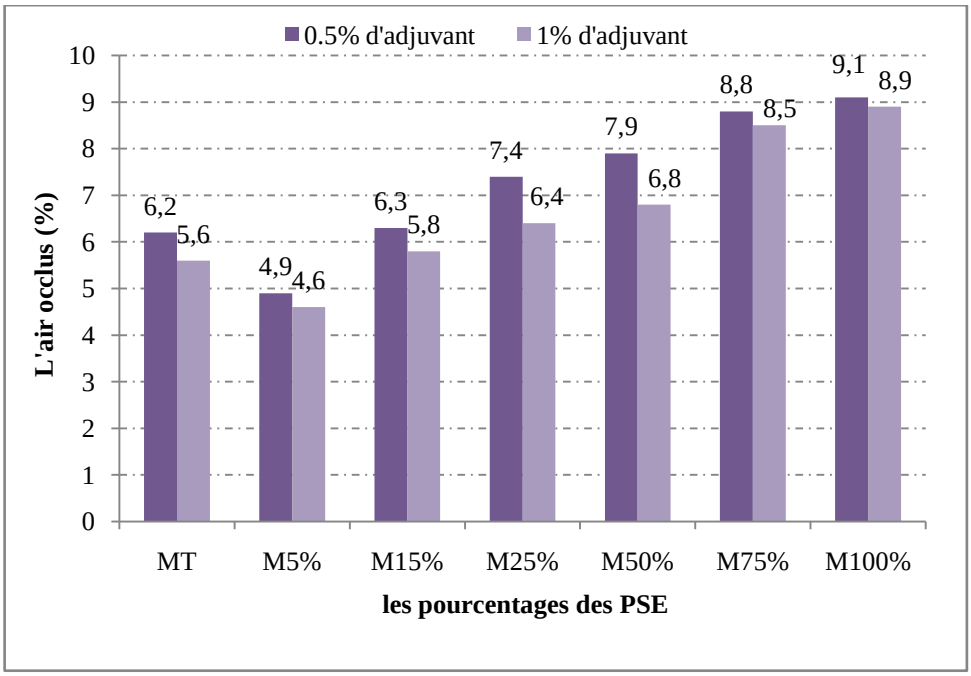


Figure III.4. L'air occlus en fonction de pourcentage de polystyrène.

D'après les figures précédente, on remarque que la teneur en air des mortiers à base de polystyrène expansé est plus important que celle de mortier de référence à partir de15% de la substitution, et que plus le pourcentage de polystyrène augmente plus la quantité d'air augmente aussi, par contre l'incorporation de 5% de polystyrène diminuée le pourcentage d'air dans le mélange, le comportement de ces résultats sont restée les même quand on augmenté le pourcentage de plastifiant mais avec un pourcentage d'air occlus moins.

L'accroissement de la teneur en air s'explique par la diminution de rapport E/C et l'augmentation de porosité, le décroissement dû à l'augmentation de compacité, on peut confirme ça par les résultats de l'essai de maniabilité de ce mélange.

III.3.1.3. La densité

La densité des déférents mélanges réalisés sont présenté dans les tableaux III.6, III.7, III.8, III.9, et les figures III.5, III.6, III.7, III.8 suivants :

Tableau III.6. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et 0,5 % plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m³)	2227,5	2012,5	1970,8	1940,1	1219,5	1177,39	944,01

Tableau III.7. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et1% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m³)	2295,26	2115,58	2053,38	1974,23	1769,53	1460	997,39

Tableau III.8. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et 0.5% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m³)	2290,6	2145,7	2015,6	1880,2	1733	1436,19	981,77

Tableau III.9. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et 1% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m³)	2305,2	2184,5	2180,6	1954,4	1782,5	1643,2	996,4

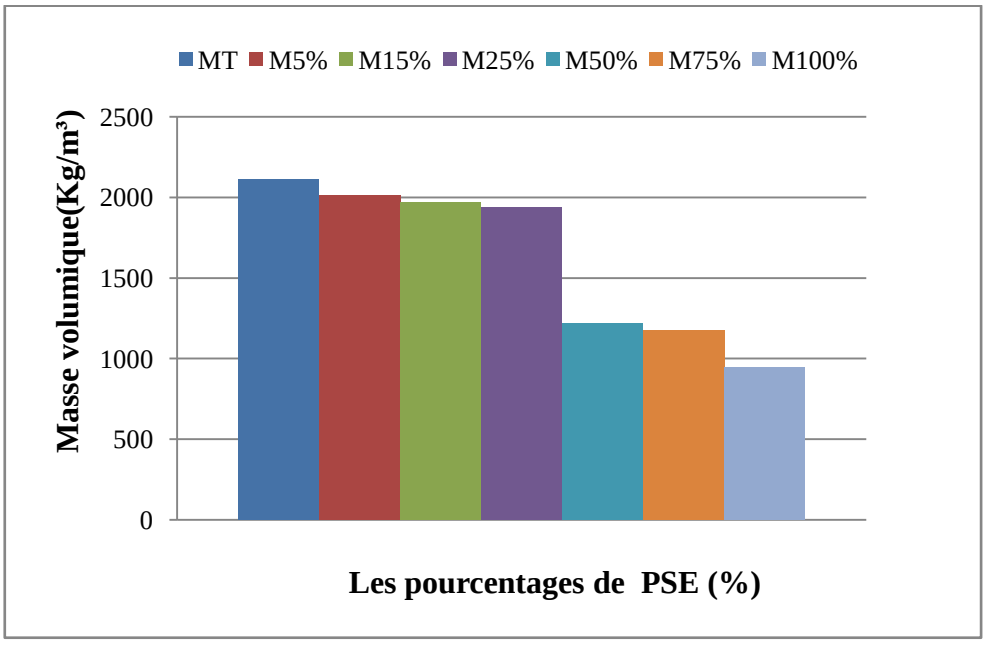


Figure III.5. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 0.5%.

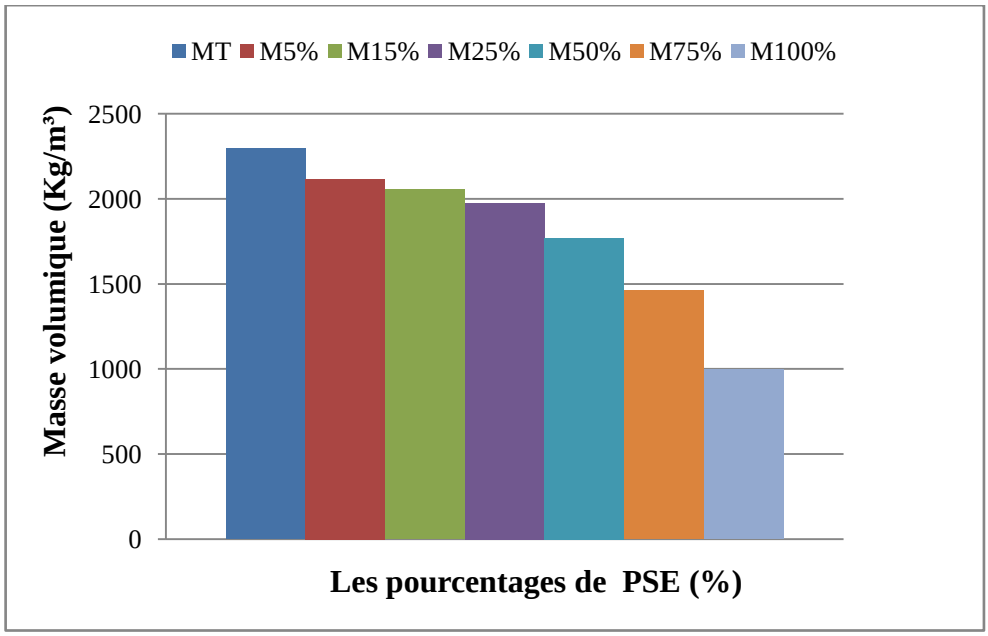


Figure III.6. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 1%.

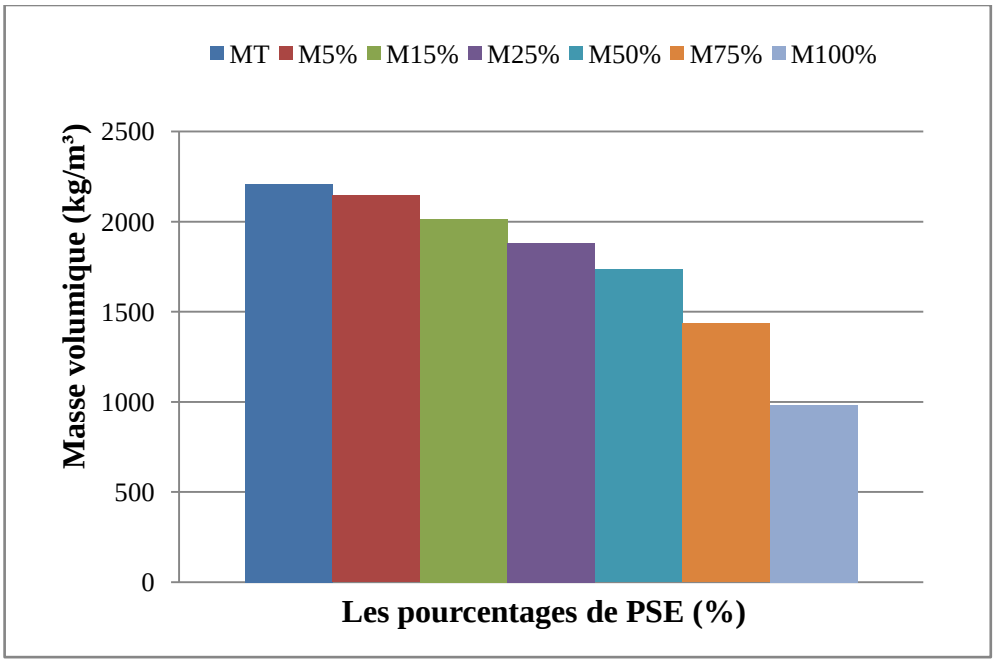


Figure III.7. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 0.5%.

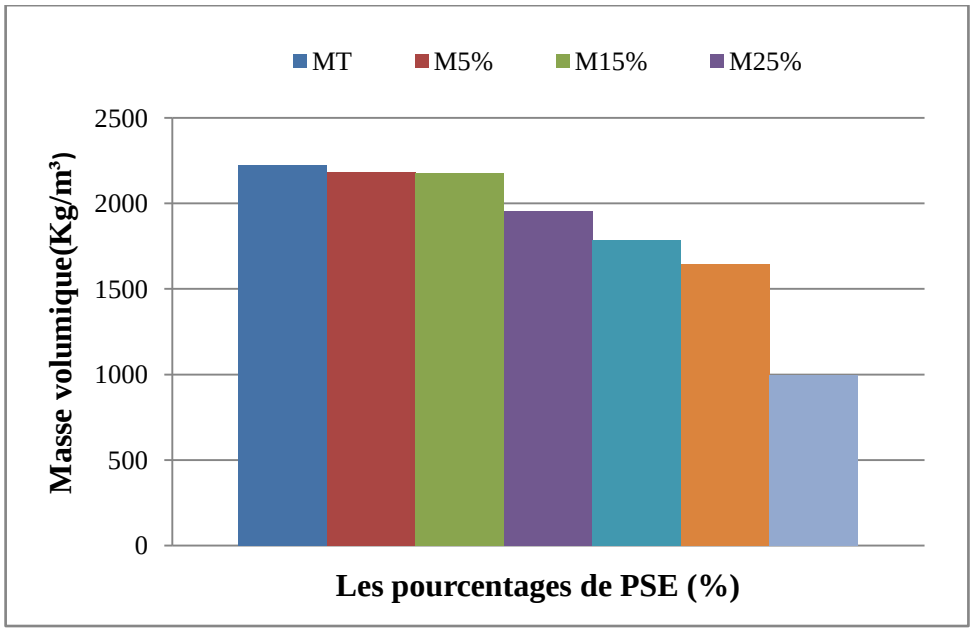


Figure III.8. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 1%.

Les résultats obtenus dans les figures ci-dessus montrent que la substitution du sable par le polystyrène influe négativement sur la densité de touts les mélanges obtenus par contre l'augmentation de pourcentage de plastifiant et le dosage de ciment cause l'augmentation de densité. Cette résultats est attendue parce que la densité du polystyrène est inférieur que celles du sable substitué.

Ce qui confirme les résultats d'autres chercheurs NASSIMA SOTEHI qui ont trouvés que la masse volumique du béton allégé décroît avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène **[58].**

III.4.2.Les essais réalisés à l'état durci

Pour chaque essai, le résultat est la moyenne de trois mesures pour essai de traction par flexion et sic mesures pour essai de compression prisent sur trois éprouvettes à l'âge de 7 et 28 jours, la moitie de un éprouvettes à l'âge de 28 jours pour essai de l'absorption d'eau et deux éprouvettes pour essai de l'isolation thermique à l'âge de 28 jours ceci est valable pour les différents types des mortiers.

III.4.2.1. La densité

Les tableaux III.10, III.11, III.12, III.13, et Les figures III.9, III.10, III.11, III.12, suivantes**,** présentent les déférentes valeurs de la masse volumique à l'état durci des mortiers réalisés.

Tableau III.10. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et0.5% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m^3)	2204,98	1965,87	1917,98	1914,19	1687,25	1104,12	962,66

Tableau III.11. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=450 et1% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m^3)	2273,87	2001,09	1979,45	1962,56	1727,34	1350,65	981,25

Tableau III.12. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et0.5% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m^3)	2268,12	2056,57	2005,35	1863,75	1703,21	1349,33	1000,48

Tableau III.13. La masse volumique des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 et1% plastifiant :

Pourcentage de PSE	M0%	M5%	M15%	M25%	M50%	M75%	M100%
Masse volumique (Kg/m^3)	2285,37	2077,54	2014,25	1877,64	1704,10	1432,99	1000,59

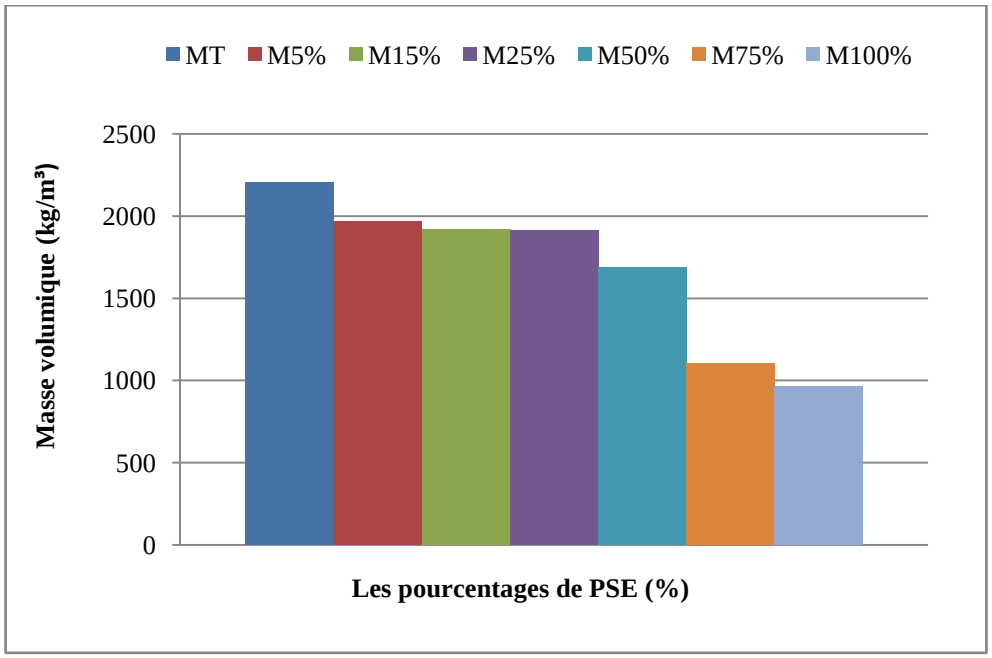


Figure III.9. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés des avec les dosages, C=450 kg est plastifiant 0.5%.

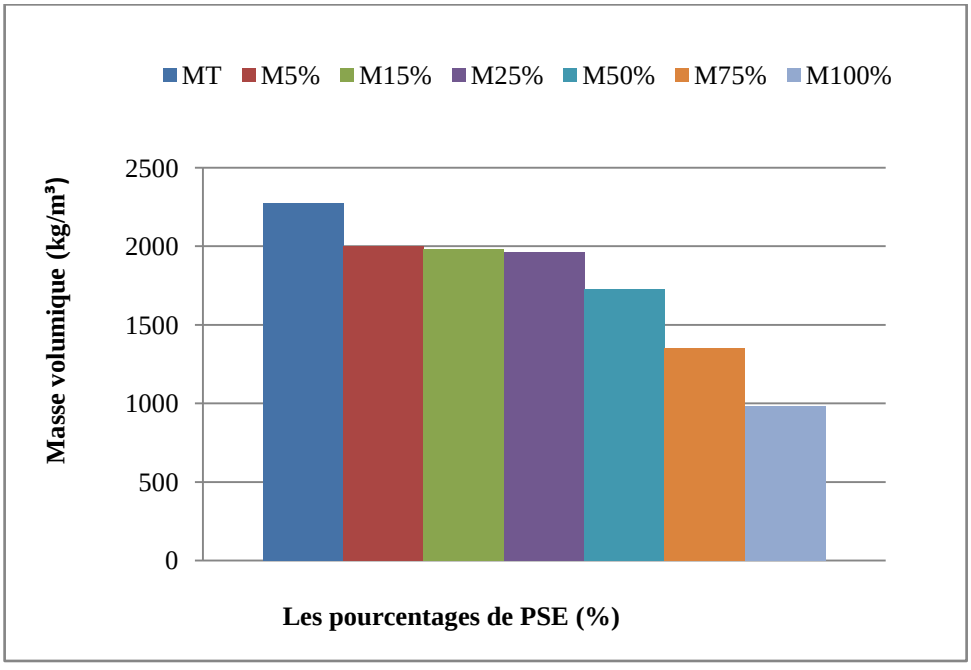


Figure III.10. La masse volumique adjuvant en fonction des pourcentages de PSE avec les dosages C=450 kg est plastifiant 1%.

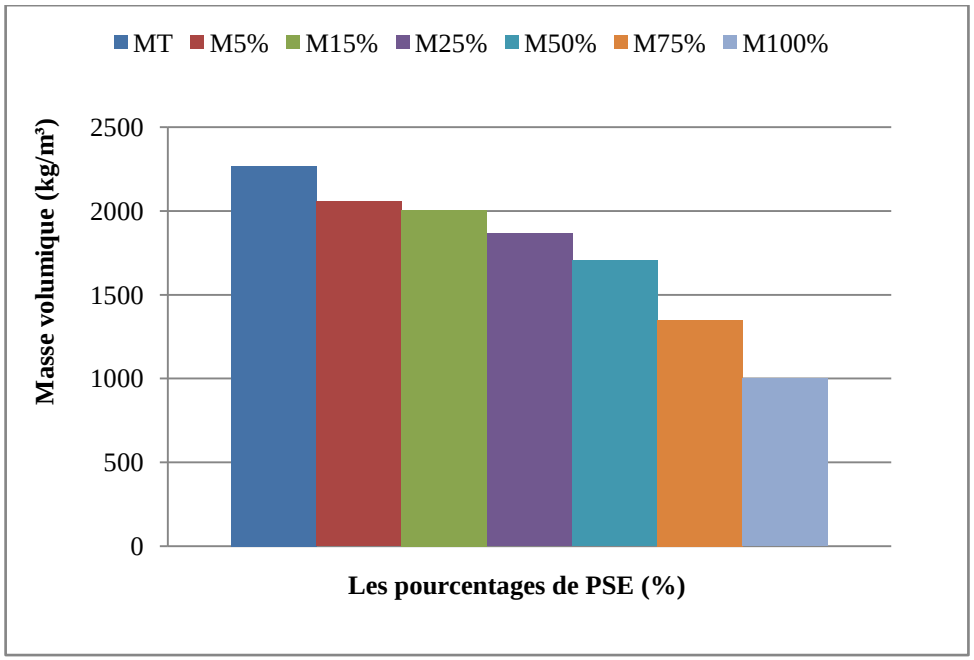


Figure III.11. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 0.5%.

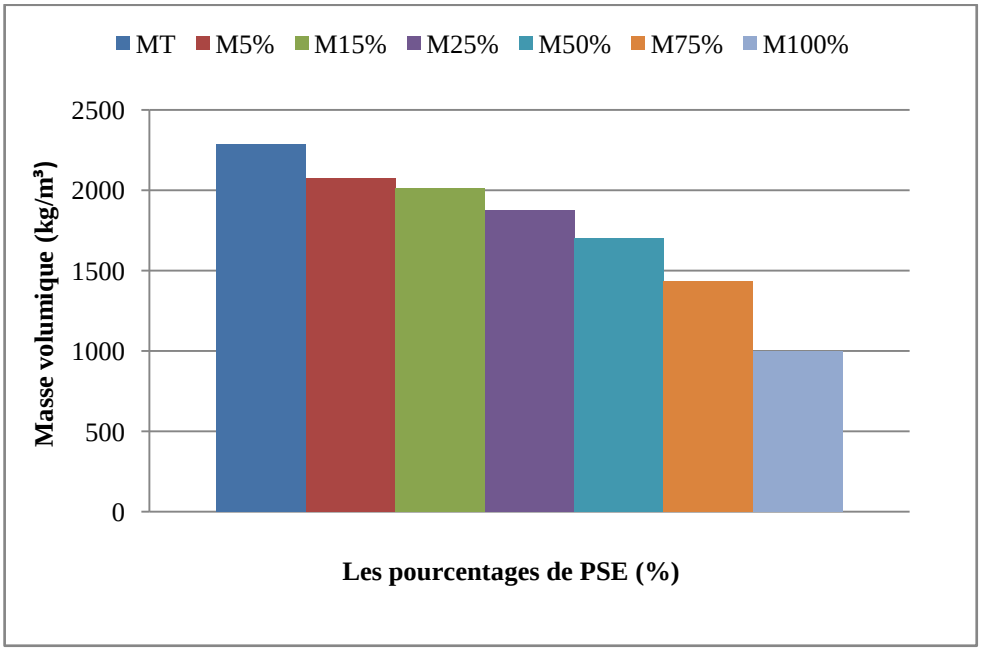


Figure III.12. La masse volumique en fonction des pourcentages de PSE des mortiers réalisés avec les dosages, C=500 kg est plastifiant 1%.

Le comportement de ces résultats obtenus dans les figures ci-dessus est reste semblable à ce de la masse volumique à l'état frais, mais on remarque qu'il ya une certaine perte de masse pour touts les mélanges a cause de l'évaporation d'eaux et aussi les caractéristique de béton léger à base de polystyrène qui ont un durée courte de séchage.

III.4.2.2.Résistance à la compression

Les résultats sont illustrés dans les tableaux III.14, III.15, et dans les figures III.12, III.14, III.15, III.16.

Tableau III.14.Résistance à la compression (Mpa) pour C = 450kg

Les types des mortiers	**Résistance à la compression (Mpa) pour C = 450kg.**			
	0,5% plastifiant		1% plastifiant	
	7j	28j	7j	28j
MT	20,71	29,47	26,91	31,58
M5%	23,13	31.48	28,15	34,08
M15%	21,66	29,04	24,93	29,58
M25%	20,85	27,27	24,46	26,30
M50%	16,35	17,04	22,09	25,97
M75%	12,42	11,92	14,60	16,11
M100%	09,41	10,34	11,23	12,40

Tableau III.15. Résistance à la compression (Mpa) pour C = 500kg.

Les types des mortiers	Résistance à la compression (Mpa) pour C = 500kg. .			
	0,5% plastifiant		1% plastifiant	
	7j	28j	7j	28j
MT	27,87	30,17	33,49	36,40
M5%	30,22	32,28	34,77	37,82
M15%	30,70	33,07	36,77	38,20
M25%	31,82	35,39	39,49	42,57
M50%	17,49	21,91	23,07	23,19
M75%	13,73	14,73	15,36	16,79
M100%	09,99	10,57	12,52	14,04

Les différentes valeurs de la résistance à la compression sont données par les Figures suivant :

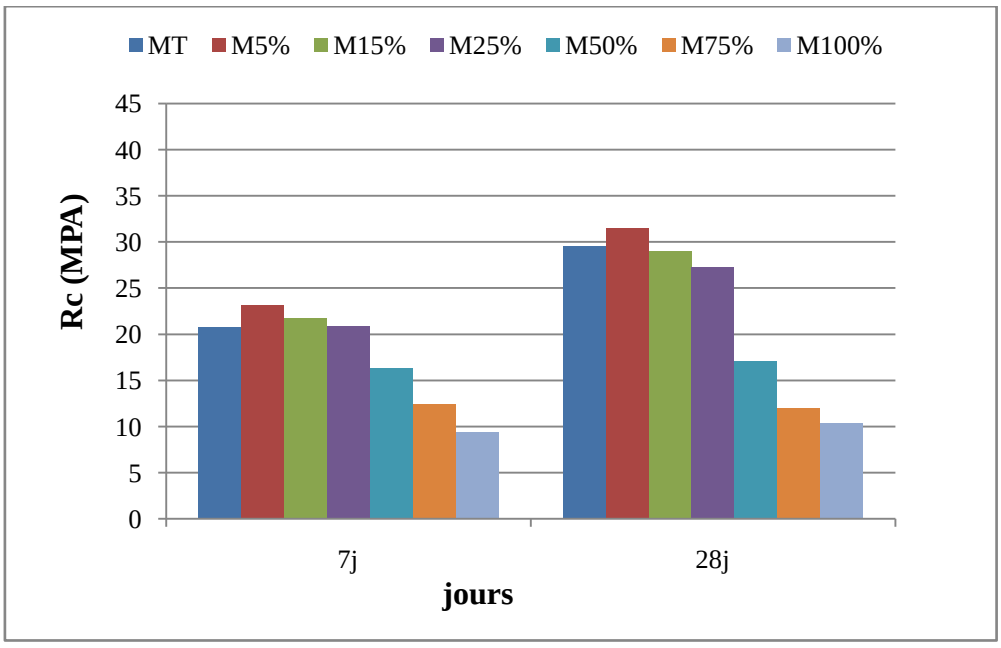


Figure III.13. Résistance à la compression (Mpa) en fanction des jours avec le dosage C= 450 kg et 0.5% plastifiant.

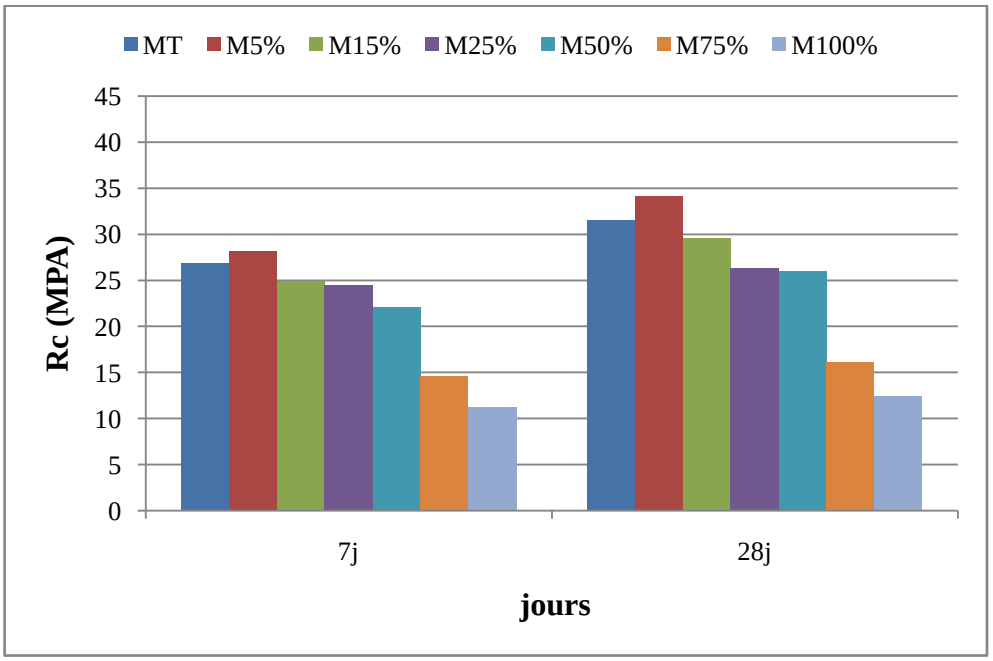


Figure III.14. Résistance à la compression (Mpa) en fanction des jours avec le dosage C= 450 kg et 1% plastifiant.

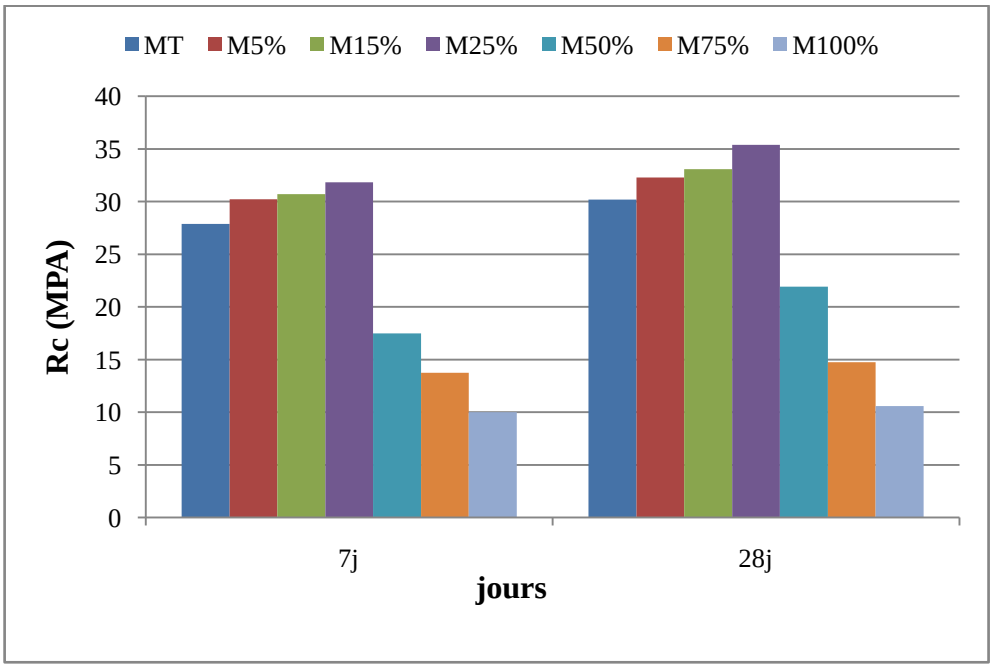


Figure III.15. Résistance à la compression (Mpa) en fanction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 0.5% plastifiant.

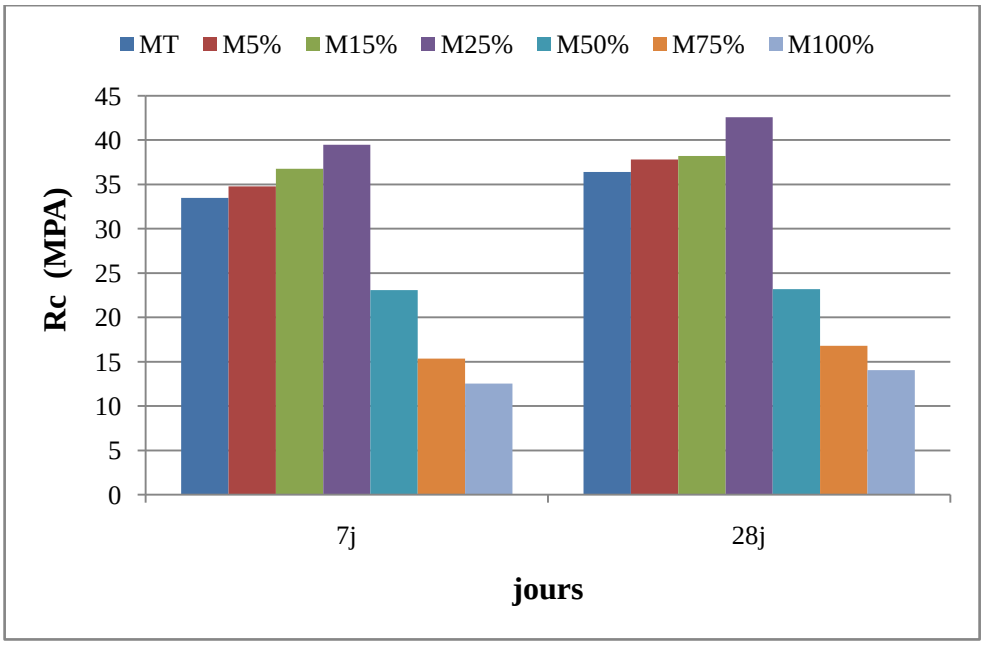


Figure III.16. Résistance à la compression (Mpa) en fanction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 1% plastifian.

D'après les résultats obtenus dans les figures précédents, on remarque que les meilleurs résultats sont donnés avec la substitution de 5 % du sable par le polystyrène pour les mortiers réalisés avec le dosage de C= 450 kg, Et de 25% pour les mortiers réalisés avec le dosage de C= 500 kg, cette ogmentation de la résistance et due principalement à la dimunution de rapport E/C et le plus petit quantité d'air qui contien. On a enregistré ainsi que une chute de la résistance à la compression pour les autres pourcentages de l'incorporation de polystyrène a cause de la rigidité beaucoup plus faible du polystyrène par rapport à celle des granulats naturels et le rapport E/C diminuée par rapport la valeur théorique (0.35), on constate que la résistance à la compression augmente au fur et à mesure lorsqu'on augmente le pourcentage de plastifiant et le dosage de ciment on peut explique ça par la diminution de porosité ainsi l'augmentation des fins et on remarque aussi une certain augmentation après 28 jours

III.4.2.3. Résistance à la traction par flexion

La mesure de la résistance à la traction est importante surtout pour identifier l'adhérence ciment / grains. Les résultats trouvés durant ce travail sont résumés dans le tableau III.16, III.17. Et les figure III.17, III.18, III.19, III.20.

Tableau III.16. Résistance à la traction (Mpa) pour C = 450 kg.

Les types des mortiers	Résistance à la traction (Mpa) pour C = 450kg. .			
	0,5% plastifiant		1% plastifiant	
	7j	28j	7j	28j
MT	2,77	3,25	2,85	4,51
M5%	3,19	4,12	3,58	4,79
M15%	2,87	3,59	2,96	4,16
M25%	2,85	3,23	2,87	3,44
M50%	2,23	2,67	2,37	3,11
M75%	2,09	2,44	2,11	2,82
M100%	1,99	2,15	2,04	2,79

Tableau III.17. Résistance à la traction (Mpa) pour C= 500Kg.

Les types des mortiers	Résistance à la traction (Mpa) pour C = 500kg. .			
	0,5% plastifiant		1% plastifiant	
	7j	28j	7j	28j
MT	2,88	3,32	3,44	5,55
M5%	3,57	4,23	3,63	5,76
M15%	3,71	4,67	3,75	6,84
M25%	3,67	5,75	4,34	7,70
M50%	3,17	3,70	4,13	4,56
M75%	2,55	3,62	2,26	3,78
M100%	2,17	2,75	2,16	3,05

Les différentes valeurs de la résistance à la traction sont données par les Figures suivant :

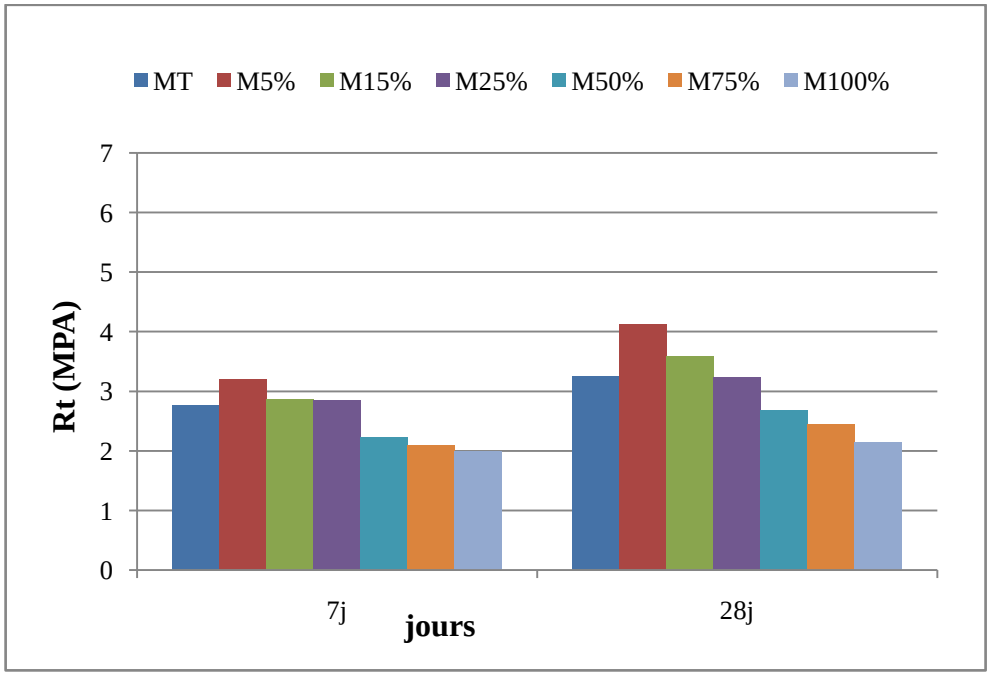


Figure III.17. Résistance à la traction (Mpa) en fanction des jours avec le dosage C= 450 kg et 0.5% plastifiant.

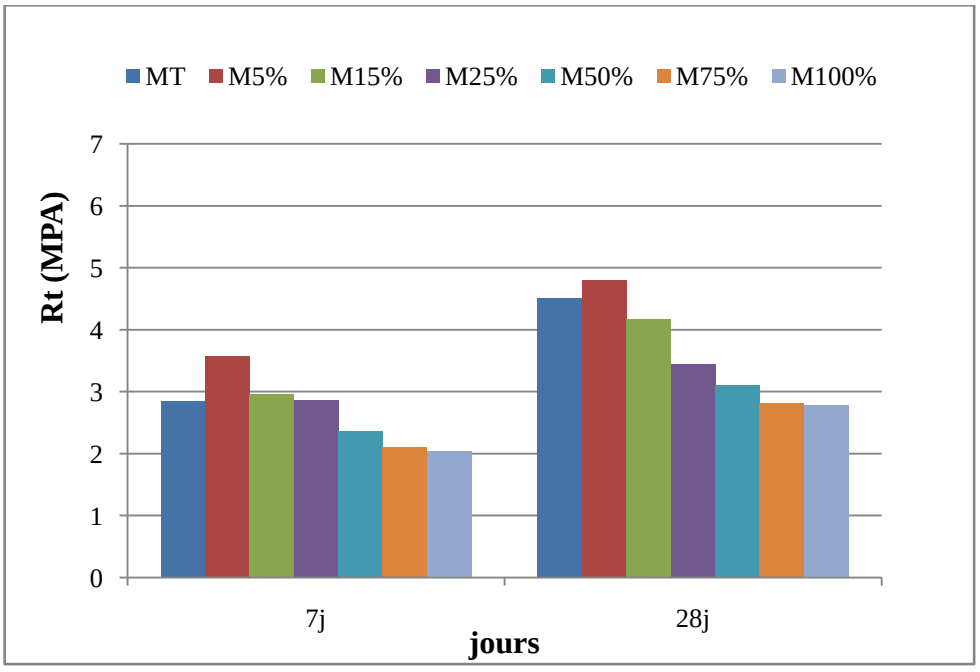


Figure III.18. Résistance à la traction (Mpa) en fanction des jours avec le dosage C= 450 kg et 1% plastifiant.

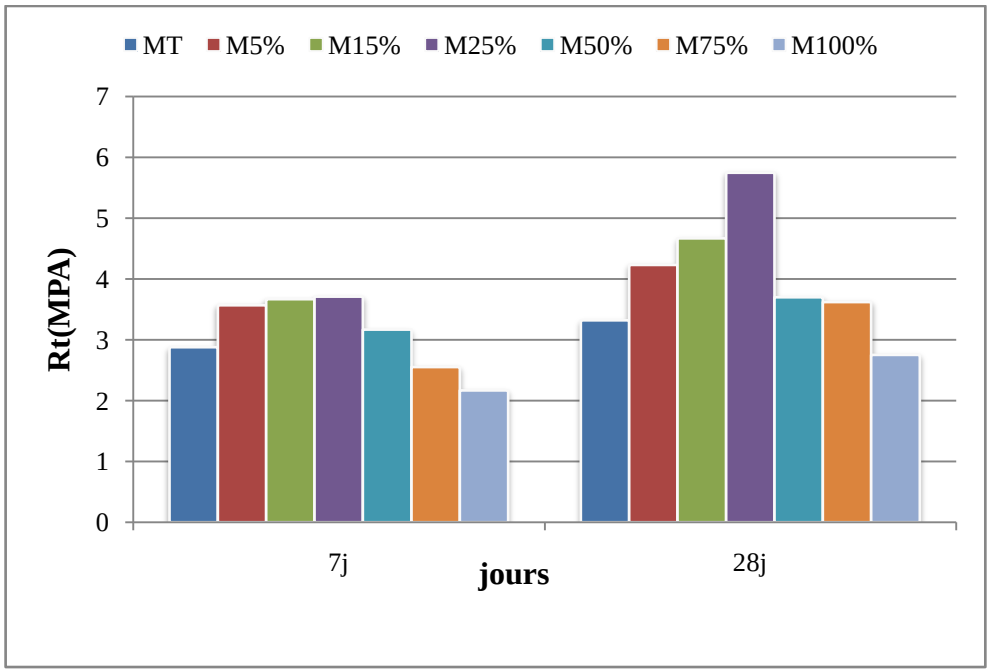


Figure III.19. Résistance à la traction (Mpa) en fanction des jours avec le dosage du ciment C= 500 kg et 0.5% plastifiant.

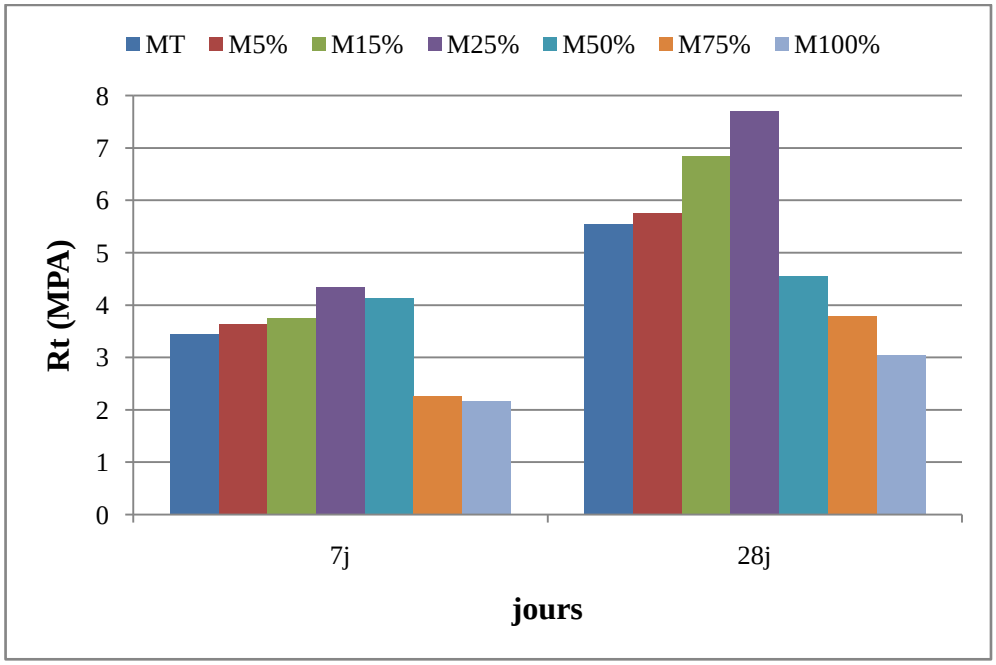


Figure III.20.Résistance à la traction (Mpa) en fonction des jours avec le dosage du ciment C = 500kg et 1% plastifiant.

De la même façon que pour la résistance à la compression, les figures ci dessus montrent que la résistance à la traction de tous les mélanges est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de polystyrène. Cette diminution des résistances est expliqué par le défaut

d'adhérence entre le polystyrène et la matrice cimentaire ou à la mauvaise qualité de la zone de transition entre ces deux phases, ce qui confirme les résultats trouvé par Lutz et al. **[59]** .Une exception a été enregistrée pour un taux de substitution de 5% pour le dosage du ciment C = 450kg et de 25% pour le dosage du ciment C = 500kg qui sont présentent une augmentation des Rt, et qui sont présente aussi les meilleurs résultats.

III.4.2.4.l'absorption d'eau

Les figures III.21, III.22, suivantes .présentent les déférentes valeurs de l'absorption d'eau des mortiers réalisés.

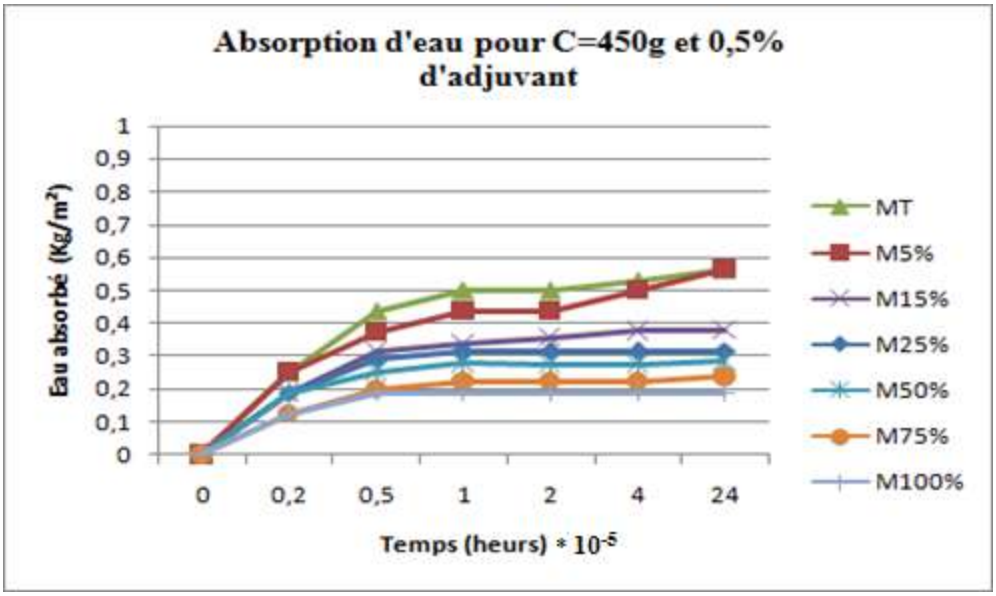


Figure III.21. L'absorption d'eau des mortiers réalisés

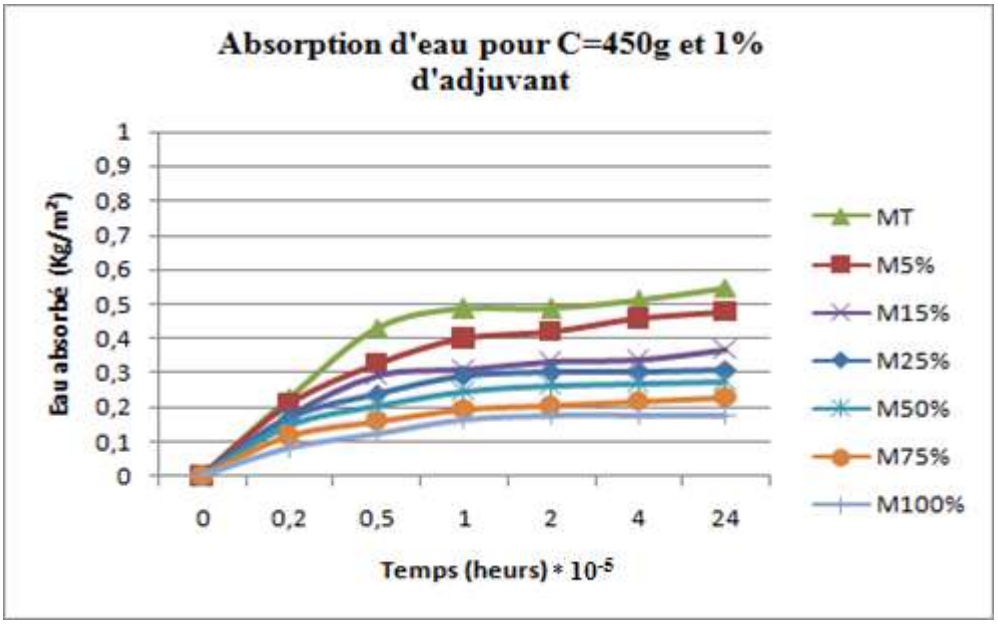


Figure III.22. L'absorption d'eau des mortiers réalisés

D'après les résultats obtenus, on remarque que la capacité d'absorption d'eau de touts les mortiers est diminue en fonction de substitution du sable par le polystyrène. On explique ça par le fait que le polystyrène n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire.

III.4.2.5.conductivité thermiques

Les résultats d'essais la conductivité thermique tracée en fonction du la masse volumique sur les figures III.23, III.24, et les tableaux III.18, III.19, suivants,

Tableau III.18. La conductivité thermique des mortiers réalisé pour le dosage C= 450 kg et 0 ,5% plastifiant

Les mélanges	**MT**	**M5%**	**M15%**	**M25%**	**M50%**	**M75%**	**M100%**
λ (W/K.m)	1,6	1,2	0,97	0,85	0,77	0 ,4	0,33

Tableau III.19. La conductivité thermique des mortiers réalisé pour le dosage C = 450kg et 1% plastifiant

Les mélanges	**MT**	**M5%**	**M15%**	**M25%**	**M50%**	**M75%**	**M100%**
λ (W/K.m)	1,55	1.1	0,9	0,81	0,7	0 ,36	0,3

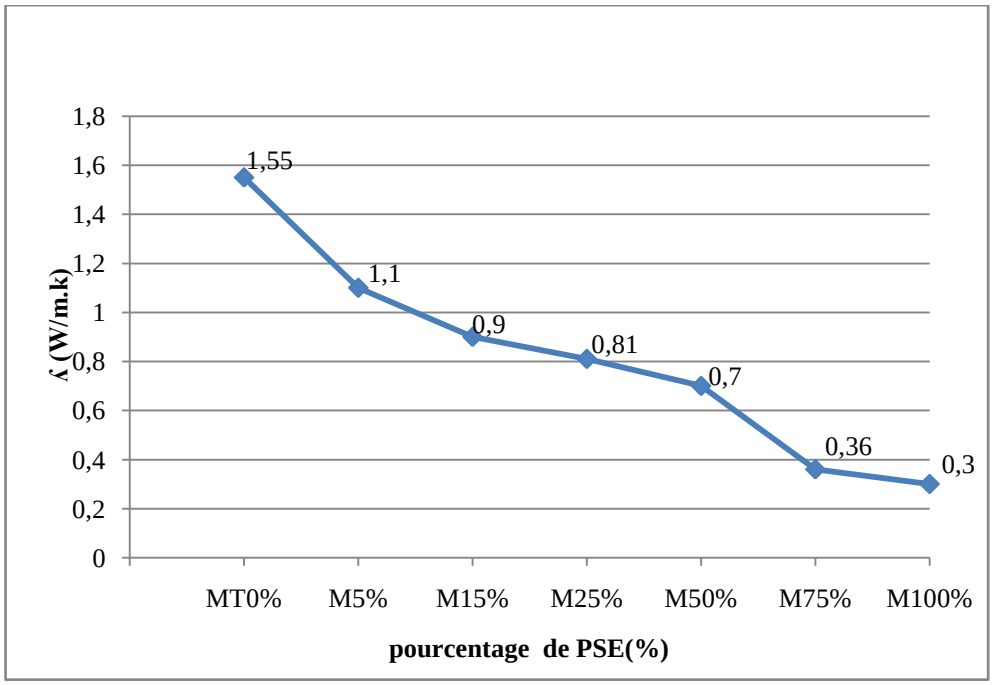


Figure III.23. La variation de La conductivité thermique en fonction du pourcentage de PSE pour C= 450kg et 0.5% plastifiant.

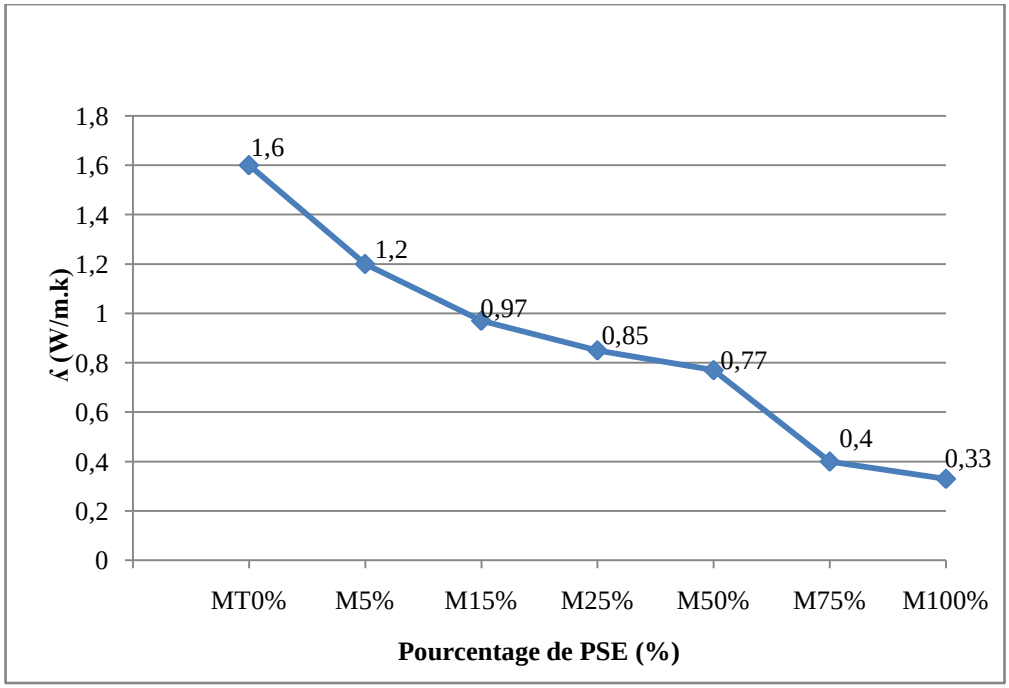


Figure III.24.La variation de La conductivité thermique en fonction du pourcentage de PSE pour C 450 kg et 1% plastifiant.

Les résultats obtenus dans figures ci-dessus montrent que la conductivité thermique des mortiers diminue avec l'augmentation de pourcentage de polystyrène .Cette diminution est varie d'un mortier à un autre.

Ce changement peut s'expliquer par l'influence concomitante de plusieurs facteurs:

Dans un premier temps, on peut citer les caractéristiques des constituants du composite. Même avec les seuls granulats naturels, il est bien connu que leur nature minéralogique affecte grandement la conductivité thermique du béton [60].Plus la conductivité thermique du granulat est faible, plus faible sera celle du béton confectionné avec. En effet, le polystyrène représente une structure amorphe et sa conductivité thermique de l'ordre de 0,2 W/m^oC [61] est faible devant celle des granulats naturels qui représentent une structure cristalline et une conductivité thermique généralement supérieure à 1,5 W/m^oC.Un autre facteur qui rentre en jeu est la porosité du béton et cette porosité est plus importante avec l'adjonction de polystyrène.

CONCLUSIONS et PERSPECTIVES

Bien que connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, les bétons légers ont été employé dans notre pays d'une façon timide et individuel, mais ils connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt, qui semble tout a fait mérité en raison de leurs propriétés techniques et économiques intéressantes.

Les formulateurs se heurtent à deux difficultés lorsqu'ils s'intéressent aux BL. En premier lieu, il n'existe pas d'essai normalisé pour formuler le béton léger de tout les types de granulats choisi et, deuxièmement, l'absence des méthodes de formulation généralisées permettant de choisir exactement les proportions des constituants en fonction des propriétés souhaitées. En fait, pratiquement tous les laboratoires ont 'bricolé' leur propre montage pour évaluer les différents types de béton léger et les chercheurs ont, par tâtonnement, formulé les BL par leur expérience acquise.

L'objectif de ce travail était de déterminer l'effet de substitution du sable par le polystyrène sur les performances physico-thermiques et mécaniques du mortier de ciment. La synthèse bibliographique et l'analyse des résultats expérimentaux nous ont permet de tirer les conclusions suivantes :

1. La substitution du sable par le polystyrène mène à l'augmentation de maniabilité du mortier.
2. La densité des composites est diminué progressivement avec l'augmentation du pourcentage du polystyrène expansé.
3. L'air occlus de mortier de polystyrène est plus importants que celle de mortier témoin à l'exception, pour le mélange de 5% de la substitution qui présente un faible pourcentage d'air.
4. Les performances mécaniques du mortier de ciment sont augmenté en fonction d'augmentation des pourcentages de polystyrène jusqu'à 5% polystyrène avec C=450kg et 25% pour C=500 kg mais après ces pourcentages la résistance et échoué.
5. l'allégement du matériau est accompagné par une perte de résistance mécanique, mais il est possible d'obtenir des résistances mécaniques acceptables avec des petits dosages en PSE.
6. L'absorption capillaire des mortiers à base de polystyrène est moins importante que celle des mortiers de référence.

7. L’incorporation de polystyrène à la formulation du mortier diminuer la conductivité thermique et améliore l’isolation thermiques.

RECOMMANDATIONS

Les observations et les analyses que nous avons effectuées dans le cadre de cette recherche pourraient mener à des développements futurs dans le domaine de fabrication des bétons légers. Pour cela on recommande les chercheurs d’approfondir dans ces recherches et surtout d’étudier :

- L’isolation acoustique et l’isolation thermique de béton de polystyrène.
- L’influence des polystyrènes sur la durabilité du mortier.
- Le pompage des bétons à base de polystyrènes.
- Les bétons spéciaux (BLAP, BLHP) à base de polystyrène.
- Les mêmes essais avec des faibles dosages en ciment.
- L’influence de polystyrène expansé sur le retrait et le gonflement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Reference bibliographique

- **[1] Règle BAEL –** Béton de granulat léger artificiel, Technique de l'ingénieur, C2 318.

- **[2] G. Dreux, J. Festa**, Nouveau guide du béton. Eightedition. Paris: Eyrolles (1998).

- **[3]** Bétons de granulats légers. Manuel CEB-FIP. Ann. ITBTP, janv., mai et déc. 1980.

- **[4] w w w. Infociments.fr/** bétons/types/autres/béton léger.

- **[5] B. BENKHALFA:** *«contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués»*.Thèse de magistère. Université d'Annaba. 1988.

- **[6] K. MILLED:** «Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé». Thèse de Doctorat. L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées. 21 Novembre 2005.

- **[7] Satish Chandra et al** «Lightweight Aggregate Concrete» , Building Materials Series.2002

- **[8] M. VENUAT:** «La pratique des ciments, mortiers et bétons». Édition. Moniteur. Tome1. 1989.

- **[9]** TEO **D.C.L., MANNAN M.A., KURIAN V.J., GANAPATHY C.,** Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties, *Building and Environment*, 2006.

- **[10] UNAL O., UYGUNOGLU T., YILDIZ A.,** Investigation of properties of low strength lightweight concrete for thermal insulation, *Building and Environment*, **42**, P584-590, 2007.

[11] DEMIRDAG S., GUNDUZ L., Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units, Construction and Building Materials, 2006.

[12] WANG H. Y., TSAI K. C., Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt, Cement and Concrete Composites, **28**, P481- 485, 2006.

[13] DE GENNARO R., CAPPELLETTI P., CERRI G., DE'GENNARO M., DONDI M., LANGELLA A., Neapolitan Yellow Tuff as raw material for lightweight aggregates in lightweight structural concrete production, Applied Clay Science, **28**, P309-319, 2005.

[14] LAUKAITIS A., ZURAUSKAS R., KERIENE J., The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, Cement and Concrete Composites, **27**, P41-47, 2005.

[15] SARADHI BABU D., GANESH BABU K., WEE T. H., Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, Cement and Concrete Research, **35**, P1218-1223, 2005.

[16] MILED K., LE ROY R., SAB K., BOULAY C., Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode, Mechanics of Materials, **36**, P1031-1046, 2004.

[17] James E.Mark, physical proprieties of polymer Hand book, springer, 2007. 2éd, 1076p.

[18] **WWW.Reforme des collectivités locales** – Fr. /polystyrène – expansé/23 out 2012.

[19] **Brewo burger,** Claude dumas,valirie michel,polystyrene expansé et développement durable Eyrolles 2008.

[20] **Erner, A., Henry, J.F., Billon, N.** Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as measured by infrared thermograph; ESAFORM'2004 Conf. Proc., Trondheim, Norway (2004).

[21] **Yamura, K., Yamauchi, M.** Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete; Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan pp. 295- 29, (1982).

[22] **WWW.Reforme des collectivités locales** – Fr. /polystyrène – expansé/23 out 2012.

[23] **R. SRIRAVINDRARAJAH. et A.**J **TUCK**., Properties of hardened concrete containing treated expanded polystyrene beads, Cement and concrete composites 16, n°4, 273-277.

[24] **PERRY, BISCHOFF et YAMURA,** Mix detail and material behavior of polystyrene aggregate concrete, Magazine of concrete research, 43, n°154, 71-76.

[25] **SANCHEZ-HUBERT J., SANCHEZ-PALENCIA E.**, Introduction aux méthodes asymptotiques et àl'homogénéisation : application à la mécanique des milieux continus, Masson, 1992.

[26] **LO T. Y., CUI H. Z.,** Spectrum analysis of the interfacial zone of lightweight aggregate concrete, Materials Letters, **58**, P3089-3095, 2004.

[27] **VAQUIER A.**, Influence de la cinétique de remplissage et de vidange des pores des granulats légers sur les propriétés des bétons, Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.

[28] **SWAMY, R. N. and LAMBERT, G. H**. (1981), "The Microstructure of Lytag Aggregate", the International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 3 (4), 273-282.

[29] **HOLM, T.A., OOI, O.S. and BREMMER**, T.W. (2004), "Moisture Dynamics in Lightweight Aggregate and Concrete", ESCSI Publication # 9340.

[30] **ZHANG, M.-H. and GJØRV, O.E.** (1991), "Mechanical Properties and High-Strength Lightweight Concrete", ACI Materials Journal, 88 (2), 150-158.

[31] **ARNOULD M., VIRLOGEUX M.**, Granulats et bétons légers, Presses de ENPC, 1986.

[32] **Fiche technique ;** « Ciment chelef CEM II/A 42.5 », Alger 2009.

[33] **NA 442 ;** Normes Algérienne : « Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants », 1994, 2000.

[34] **P 15-476 ;** Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse », Aout 1990.

[35] **NF P 15-431 ;** Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des essais-détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[36] **NF P 15-473 ;** Normes AFNOR : « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[37] **Normes AFNOR** : « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.

- **[38] OULD ROUIS Khair-Eddine, OUDJOUADJ Zakaria ;** Thèse d'ingéniorat : « Influence de la combinaison du sable de dunes avec le sable de concassage sur les performances du mortier », Université de Médéa, Juin 2010.

- **[39] EN 197-1 ;** Normes Européenne : « Ciments courants »,1994.

- **[40] WWW.Bricode pot.fr/**polystyrène-expansé-et-extrny.

- **[41] Granitex.dz, notice technique** MEDAFLUID 104, 2015.

- **[42] NFP 18-303 ;** Normes AFNOR : « Eau de gâchage pour béton », Aout 1990.

- **[43] Dr. CHERAIT Yacine, Mr NAFA Zahr Eddine ;** « Eléments de matériaux de construction et essais », Direction de la publication Guelma ,2007.universitaire de

- **[44] CEN EN 196-1 ;** Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments – partie 1 : détermination des résistances mécaniques (indice de classement P15-471) », Aout 1995.

- **[45] ENV 197-1 ;** Normes Européenne : « Ciments courants »,1994.

- **[46] NF P 15-301 ;** « Liants hydrauliques – définitions, classification et spécification des ciments », Juin 1994.

- **[47] NA 451 ;** Normes Algérienne : « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée », 1989.

- **[48] NF P 18-598 ;** Normes AFNOR : « Granulat- Equivalent de sable », Octobre 1991.

- **[49] CASTEILLA, DUPAIN.R et all ;** « Granulats, sols, ciment et béton :

Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire » ,2eme édition Paris ,2000.

- **[50] NA 2607 ;** Normes Algérienne : « Granulats - Analyse granulométrique par tamisage », 1990.

- **[51] NF P 18-452 ;** Normes AFNOR : « Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux Maniabilimètre », Mai 1988.

- **[52] NF P 15-437 ;** Normes AFNOR : « Liants hydrauliques –Techniques des essais – Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des mortiers », Juin 1987.

- **[53] NF EN 12350-6**, 1999, « *Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique* AFNOR.

- **[54] NA 436 ,**1992-08-20 «bétons frais, détermination de la consistance-essais D'affaissement ».Norme algérienne.

- **[55] NF P 18-353 ;** Normes AFNOR : « Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis - Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton », 2007.

- **[56] www.isover.fr/guide.de** l'isolation-en-polystyrène**.**

- **[57] NBN B24-213 ; Norme belge, « E**ssai des matériaux de macaonnerie, Absorption d'eau sous vide» ; octobre 1976.

- **[58] Nassima Sotehi,** Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation, 2010

- **[59] Li Z., Li F. and Li. J. S. L.,** Properties of concrete incorporating rubber tyre particles. Magazine of Concrete Researche, 50, No4, 297-304, Dec.1998.

- **[60] Kerasley E. P. et Wainwright P.J**." Porosity and permeability of foamed Concrete ", Cement Concr Res, 31: 805–12, 2001.

- **[61] Document Technique Unifié**, Règle de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction. Etablies par Le Groupe de coordination des textes techniques. Novembre 1977.

ANNEXES

- *Analyses chimiques*

Perte au feu 3.50 – 4.50	(%)	
Résidus insolubles 0.70 – 1.10	(%)	
Teneur en sulfates 1.80 – 2.10		(SO_3)
Teneur en oxyde de magnésium (MgO) 1.60 – 1.80	(%)	
Teneur en chlorures (%) 0.01 – 0.04	(%)	
Teneur équivalent en alcalis (%) 0.40 – 0.50	(%)	
Résidus insolubles (%) 0.70 – 1.10	(%)	

- *Composition hypothétique du clinker*

Silicates tricalciques (C_3S) (%)	54.00 – 58.00
Silicates bicalciques (C_2S) (%)	14.00 – 18.00
Aluminate tricalciques (C_3A) (%)	5.50 – 6.00
Aluminoferrites tetracalciques (C_4AF) (%)	11.80 – 12.40

- *Propriétés physiques*

Consistancenormale de la pâte de ciment (%)	26.00 – 27.50
Finesse suivant la méthode de BLAINE (cm^2/gm)	3400 – 3650
Retrait à 28 jours (mm/m)	< 1000
Stabilité (mm)	0.00 – 2.00

Fiche Technique de ciment

Equipement secondaire

-Les balances –

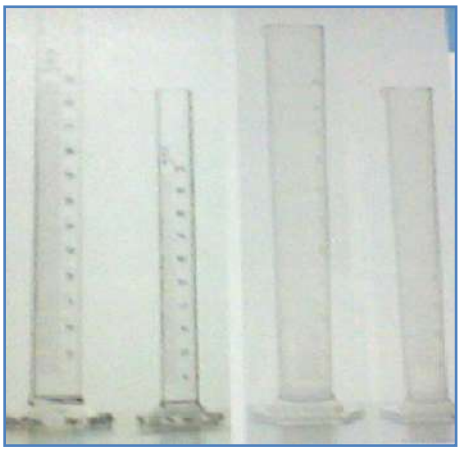




-Agitatrice-



-Eprouvettes et béchers en verre et en plastique graduées-





-Spatules flexibles en acier inox-



-Pinceaux-



Les étapes de fabrication des éprouvettes de mortier

Lors du malaxage



Après le malaxage



Mesure le tempe d'écoulement



Sur la table à choc



Après le coulage du moule



Les éprouvettes de mortier apres le séchage(24h)







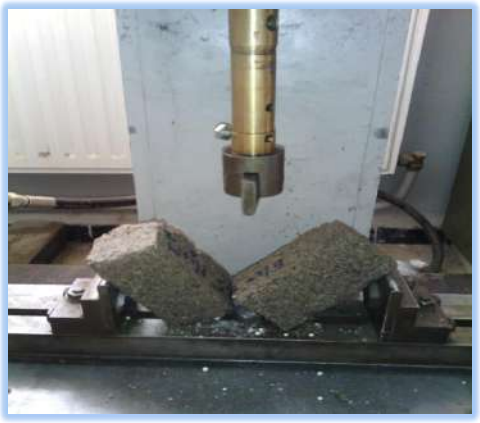


Les éprouvettes de mortier d’aurant la conservation dans le bac d’eau





Les éprouvettes de mortier après l'essai de traction par flexion





Les éprouvettes de mortier après l'essai de compression





Les éprouvettes de l'essai de conductivité thermique



