



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par

BENMOUSSA Yousra

DOMAINE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème

***Potentialités de développement d'un béton léger
isolant à base de co-produits industriels :
Cas du plastique et du polystyrène.***

Jurys de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. KHENFER Mohammed Mouldi	Pr	Président
Mr. BOUZIANI Tayeb	Pr	Examineur
Mr. ZIREGUE Ahmed	M.C.B	Encadreur

Promotion : Juin - 2019

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui M'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, je tiens à remercier mon encadreur Monsieur **Ziregue Ahmed**, pour ses conseils et surtout de m'avoir fait confiance pour mener à bien ce présent travail.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury.

Messieurs **Khenfer Mohammed Mouldi** et **Bouziyani Tayeb**

Pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'examiner ce mémoire et de l'enrichir par leurs propositions.

Je remercie en particulier et d'une manière très spéciale celui qui a toujours été là pour moi, qui m'a soutenu depuis le début, m'a remonté le moral dans les pires moments.

Celui qui a cru en moi, Monsieur

Belaidi Akram Salah Eddine

Je ne vous remercierai jamais assez pour tout votre aide, conseils, leçon de vie et de m'avoir donné l'extraordinaire occasion d'apprendre beaucoup de choses de votre part.

Mes remerciements s'adressent spécialement à Monsieur **Krobba Benharzallah** qui a toujours été présent et à la disposition de tous,

Mes sincères remerciements et gratitude à Monsieur **Ferhat Ahmida** pour sa précieuse aide pendant la réalisation des essais thermiques au laboratoire de recherches de génie civil, Monsieur **Goual Idriss**, à tout l'intérêt qui a porté au sujet et ses précieux conseils

& Monsieur **Sami Zidelmel** pour sa disponibilité et son aide lors des essais de visualisation par microscope optique au département de génie mécanique, au personnel du laboratoire ainsi qu'à tous mes enseignants du département de génie civil,

Je remercie également ma famille de m'avoir accompagné tout au long du travail ce qui a énormément favorisé mon épanouissement personnel et étudiantin.

Mes plus profonds mots de gratitude restent insignifiants devant Monsieur **Attia Aissa** agent technique chargé de bibliothèque qui a particulièrement mis à ma disposition toute la documentation et l'ambiance de travail nécessaire.

Un grand merci à tous mes ami(e)s

Enfin, Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Dédicaces

La construction de ce mémoire n'aurait été possible sans l'intervention de certaines personnes.

Qu'elles trouvent ici l'expression de ma gratitude en les dédiant ce modeste travail

Mes doux et merveilleux parents **Souâd et Nabil**,

Quoi que je fasse, quoi que je dise, je ne saurai point vous remercier comme il se doit,

Votre Amour inconditionnel me comble, votre Affection me couvre, votre

Bienveillance me guide et votre Présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles de la vie.

Ma grande sœur adorée **Lyna**, ma jumelle du cœur pour m'avoir épaulé moralement tous les jours lors dans la construction de ce mémoire et toujours d'ailleurs.

Mon petit frère chéri **Achraf Abdelhamid**, qui essayait de m'aider comme il pouvait.

Ma plus grande source d'inspiration, Amour, Gentillesse, connaissances et patience,

Mes Amours, Papi hadj **Mohamed Tadj** & Mami hadja **Biri Belmecheri**.

Mon grand-père hadj **Zeid el Khir Belmecheri**

Ma grand-mère hadja **Rabia Naçri**.

A la mémoire de ceux qui resteront éternellement vivants dans mon cœur et qui demeurent un modèle à suivre pour moi, mes défunts grands-parents hadj **Mohamed Benmoussa** et hadja **Fatima Belmecheri** « Allah yarhamhoum »

Mes oncles et tantes ainsi qu'à toute la famille **Benmoussa & Belmecheri**.

Tous les enseignants qui m'ont soutenu dans la poursuite de mes études durant ces années et qui par leurs compétences j'ai pu en arriver là.

Mes meilleur(e)s ami(e)s,

Kouki, Bouchra, Lamia, Khaoula, Sabrina & Amine.

J'ai traversé des moments si difficiles que plus d'une fois j'ai pensé que je ne verrai jamais le bout du tunnel. A chacun de ces moments, tu étais là pour me reconforter et m'aider à trouver des solutions. Je ne te remercierai jamais assez pour tout ce que tu as fait pour moi

Merci à toi & Merci à moi

YousS

المخلص

الهدف من هذا العمل هو إظهار إمكانات تطوير خرسانة خفيفة وعازلة مكونة أساسا من حبيبات متحصل عليها من بقايا المنتجات الصناعية ، ان حبيبات البلاستيك المستعملة هي نتاج تدوير الأكياس ، وفيما يخص كريات البوليستيرين فإنها متوفرة في السوق ، ويهدف استخدامها إلى تخفيف مختلف العناصر الغير حاملة للمنشأ.

ولتحقيق هذا الهدف ، تتمثل المنهجية المتبعة في استبدال جزء من حجم الخليط بنفس الحجم من الحبيبات الهجينة الخفيفة بنسب تبلغ 25 ، 50 و 75% مع السعي من خلال هاته الدراسة التجريبية إلى إيجاد حل وسط من جهة التخفيف والعزل الحراري ومن جهة أخرى على كفاءة ميكانيكية. وفي هذا الغرض فإن استعمال الملدنات يعتبر ضروري.

الفكرة تتمثل في مزج نوعين من الحصى في الخليط الهجين بنسب متفاوتة (0/100 ، 25/25 ، 50/50 ، 75/75 و 100/0) ، تسمح لنا هاته النسب من التحصل على كفاءة فيزيائية وميكانيكية بالإضافة إلى عزل حراري للنوعين من الحصى في آن واحد. لهذا الغرض ، تم إجراء جملة من اختبارات في الحالة المرنة وفي الحالة الصلبة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تأثير مزيج من الحصى المستخدم في هذه الدراسة عن أداء الفيزيائي والميكانيكي وعزل حراري واعد للمواد المركبة.

تتناقص الكثافة بالنسبة للخرسانة المرجعية حيث تتراوح القيم في نطاق [1.14-1.95] جم / سم³ كما تختلف الخصائص الميكانيكية من 3.74 إلى 16.78 ميجا باسكال ، بينما تختلف الموصلية الحرارية من 1.22 إلى 0.53 واط / م.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الدقيقة ؛ التنمية المستدامة ؛ التخفيف ؛ البلاستيك ؛ البوليستيرين ؛ المواد المركبة الهجينة ؛ الخرسانة الحصى المرسل ، العزل الحراري.

Résumé

L'objectif de ce travail consiste à montrer les potentialités de développement et de l'élaboration d'un micro béton léger isolant à base de granulats provenant des coproduits industriels, le plastique issu du recyclage des sachets et le polystyrène expansé, dans une perspective de son utilisation dans l'allègement des différents éléments non porteurs de la structure.

Afin de parvenir à cela, la méthodologie suivie consiste à substituer une partie du volume de la matrice par le même volume en granulats léger hybrides avec des proportions volumiques de 25, 50 et 75% tout en visant un compromis entre, d'une part l'allègement et l'isolation thermique et d'autre part les performances mécaniques. Dans le but d'assurer la mise en œuvre convenable, l'utilisation de superplastifiant semble être nécessaire.

L'idée de la combinaison des deux types de granulats dans des mélanges hybrides en différentes proportions alternées de (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 et 100/0), nous permettra de profiter des qualités physico-mécaniques et thermiques des deux matériaux en même temps. A cet effet, une campagne d'essai à l'état frais et à l'état durci a été rigoureusement entreprise.

Les résultats obtenus permettent de constater l'effet de la combinaison des deux matériaux utilisés dans cette étude et révèlent des performances physico-mécaniques et thermique prometteuse des composites.

La masse volumique rechute par rapport au témoin variant dans un intervalle de [1,14-1,95] g/cm³. Les caractéristiques mécaniques eux variant de l'ordre de 3,74 à 16,78 MPa tandis que la conductivité thermique varie de 1,22 à 0,53 W/m.K .

Mots clés : *Micro-béton; développement durable; Allègement; Plastique; Polystyrène; Composite hybride; bétons de granulats recyclés; isolation thermique.*

Abstract

The objective of this work is to show the potential for the development and production of a lightweight insulating micro-concrete based on aggregates from industrial co-products, plastic from bag recycling and expanded polystyrene, with a view to its use in lightening the various non-load-bearing elements of the structure.

In order to achieve this, the methodology followed consists in substituting part of the volume of the matrix by the same volume of hybrid lightweight aggregates with volume proportions of 25, 50 and 75%, while aiming a compromise between lightening, thermal insulation and mechanical performance. In order to ensure proper implementation, the use of superplasticizer appears to be necessary.

The idea of combining the two types of aggregates in hybrid mixtures in different proportions of (0/100, 25/75, 50/50, 75/25 et 100/0), will allow us to benefit from the physico-mechanical and thermal qualities of both materials at the same time. For this reason, we called for fresh and hardened state tests and also thermal conductivity tests.

The obtained results show the influence of the use of the combination of the two materials used in this study and reveal the physico-mechanical and thermal performances of the composites.

The density relapses relative to the control within a range of [1.14 -1.95] g/cm³. The mechanical characteristics vary from 3.74 to 16.78 MPa while the thermal conductivity varies from 1.22 to 0.53 W/m.K.

Keywords: *Micro-concrete; sustainable development; Lightweight; Plastic; Polystyrene; Hybrid composite, recycled aggregate concrete; thermal insulation...*

Table des matières

Remerciements.....	iv
Dédicaces.....	iii
المخلص.....	iv
Résumé.....	v
Abstract.....	vi
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 . Revue sur la bibliographie	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Développement durable	3
1.2.1 Déchets et construction durable.....	4
1.2.1.1 Stratégies de traitement des déchets et ses enjeux.....	4
1.3 Isolation thermique.....	9
1.3.1 Principe de l'isolation thermique.....	9
1.3.2 Théorie de l'isolation.....	10
1.3.3 Techniques d'isolations	11
1.4 Les Bétons Légers.....	12
1.4.1 Généralités sur les bétons légers.....	12
1.4.2 Béton léger dans la construction.....	12
1.4.3 Types de bétons légers.....	13
1.4.3.1 Béton de granulats légers	13
1.4.3.2 Béton cellulaire	13
1.4.3.3 Béton caverneux	14
1.4.4 Différence entre bétons classiques et bétons légers.....	14
1.4.5 Classification des bétons légers	15
1.4.5.1 Bétons de remplissage	15
1.4.5.2 Bétons porteurs isolants.....	15
1.4.5.3 Bétons de structure.....	16
1.4.6 Domaine d'utilisation.....	16
1.4.6.1 Bétons d'isolation pure, non porteurs.....	16
1.4.6.2 Bétons porteurs et isolants.....	16
1.4.6.3 Bétons légers de structure	16
1.4.7 Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons légers	17
1.4.7.1 Propriétés physico-mécaniques des bétons légers	17
1.4.8 Les avantages d'un béton léger	20
1.5 Les Granulats légers	20
1.5.1 Classification des granulats légers.....	21
1.5.1.1 Granulats naturels.....	21
1.5.1.2 Granulats artificiels.....	22
1.5.2 Propriétés physico-mécaniques et thermiques des granulats légers.....	23
1.5.2.1 Masse volumique	24
1.5.2.2 Résistance des granulats légers	24
1.5.2.3 Taille des granulats	25
1.5.2.4 Porosité et absorption	25
1.5.3 Les granulats de polystyrène	26

1.5.3.1	Fabrication du polystyrène expansé	26
1.5.3.2	Pré-expansion	26
1.5.3.3	Stockage intermédiaire	26
1.5.3.4	Seconde expansion	26
1.5.3.5	Procédure d'élaboration des billes de polypropylène enrobées (traitées)	26
1.5.3.6	Différence entre le polystyrène non traité et le polystyrène traité	27
1.5.3.7	Caractéristiques physico mécaniques et thermique du béton de polystyrène	28
1.5.4	Granulats de Plastique.....	33
1.5.4.1	Recyclage du plastique.....	33
1.5.4.2	Caractéristiques physico mécaniques et thermique du béton de plastique	34
1.6	Synthèse du chapitre	38
Chapitre 2 .	Matériaux et méthodes expérimentales	39
2.1	Introduction.....	39
2.2	Caractérisation des matières premières.....	40
2.2.1	Granulats.....	40
2.2.1.1	Sable alluvionnaire	40
2.2.1.2	Granulats de plastique	46
2.2.1.3	Billes de polystyrène traité.....	48
2.2.2	Ciment	50
2.2.3	Eau de gâchage.....	51
2.2.4	Adjuvant	52
2.3	Formulation et élaboration du micro béton léger (MBL)	53
2.3.1	Méthodes de formulation pratiquée.....	53
2.3.2	Elaboration des composites et techniques expérimentales.....	53
2.3.3	Notation des matrices et répartition des pourcentages de substitution	54
2.3.4	Dosage en ciment.....	56
2.3.5	Composition des MBL à base de granulats de plastique et de polystyrène	56
2.3.6	Formulation du mortier témoin.....	57
2.3.7	Processus de malaxage et de mise en moule du micro béton	57
2.4	Essais expérimentaux réalisés	58
2.4.1	Essais à l'état frais	58
2.4.1.1	Affaissement au mini Cône d'Abrams.....	59
2.4.1.2	Masse volumique apparente.....	59
2.4.1.3	Essai d'écoulement au Maniabilimètre.....	59
2.4.2	Essais à l'état durci.....	60
2.4.2.1	Caractéristiques mécaniques.....	60
2.4.2.2	Essai d'absorption capillaire.....	61
2.4.2.3	Caractéristiques physiques.....	64
2.4.2.4	Caractéristiques thermiques	67
2.5	Synthèse du chapitre	70
Chapitre 3 .	Résultats expérimentaux et discussion	71
3.1	Introduction.....	71
3.1	Formulation des bétons élaborés.....	71
3.1.1	Optimisation du rapport E/C	71
3.1.2	Optimisation du rapport SP/C.....	72

3.2	Etude des propriétés rhéologiques du micro béton	73
3.2.1	Maniabilité.....	73
3.2.2	Masse volumique à l'état frais	78
3.3	Etude du micro béton léger à l'état durci.....	79
3.3.1	Caractéristiques physiques	79
3.3.1.1	Masse volumique sèche	79
3.3.1.2	Corrélation entre la masse volumique à l'état frais et celle à l'état durci.....	81
3.3.1.3	Porosité introduite.....	83
3.3.1.4	Absorption par capillarité (l'absorptivité)	84
3.3.1.5	Distribution granulaire	91
3.3.2	Caractéristiques mécaniques	92
3.3.2.1	Résistance à la compression	92
3.3.2.2	Résistance à la traction par flexion.....	96
3.3.3	Caractéristiques thermiques	97
3.3.3.1	Conductivité thermique (w/m.K)	97
3.3.3.2	Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique	99
	Conclusion Générale	101
	Recommandations et perspectives	103
	Annexes.....	104
	Références bibliographiques.....	107

Liste des Figures

Figure 1.1. Schéma du développement durable.	3
Figure 1.2. Déchet de plastique affectant la nature.	5
Figure 1.3. Déchets de polystyrène.	6
Figure 1.4. Cycle de recyclage de plastique (polyéthylène).	7
Figure 1.5. Cycle de recyclage du polystyrène.	8
Figure 1.6. Déperditions de chaleur.	10
Figure 1.7. Travaux d'isolation thermique.	11
Figure 1.8. Béton a granulats légers.	13
Figure 1.9. Béton cellulaire.	13
Figure 1.10. Béton caverneux.	14
Figure 1.11. Porosités du béton.	18
Figure 1.12. Classification des bétons légers suivant leurs masses volumiques et utilisation.	21
Figure 1.13. Différents granulats légers naturels.	22
Figure 1.14. Différents granulats légers artificiels.	23
Figure 1.15. Corrélation entre la résistance du béton léger et celle des grains déterminés au fil.	25
Figure 1.16. Courbe d'absorption d'eau.	26
Figure 1.17. Influence de la teneur en polystyrène sur l'étalement.	29
Figure 1.18. Influence de la teneur en polystyrène sur la masse volumique.	30
Figure 1.19. Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène.	30
Figure 1.20. Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage du polystyrène.	31
Figure 1.21. Conductivité thermique en fonction de différentes masses.	32
Figure 1.22. Schéma du recyclage du plastique.	33
Figure 1.23. Photos prise au niveau de l'usine de recyclage de plastique.	34
Figure 1.24. Temps d'écoulement des bétons de grains de plastiques.	35
Figure 1.25. Masse volumique des bétons de poudre de plastiques.	36
Figure 1.26. Résistance à la compression en fonction d'ajout de poudre plastique.	37
Figure 1.27. Résistance à la traction en fonction d'ajout de poudre plastique.	37
Figure 2.1. Courbe granulométrique des granulats utilisés.	40
Figure 2.2. Photo du tamiseur de l'essai granulométrique.	41
Figure 2.3. Schématisation de l'essai de l'équivalent de sable.	42
Figure 2.4. Dispositifs d'essai de l'équivalent de sable.	42
Figure 2.5. Mesure de la masse volumique absolue au pycnomètre.	44
Figure 2.6. Mesure de la masse volumique apparente.	44
Figure 2.7. Photo du kit de l'essai d'absorption.	45
Figure 2.8. Morphologie du sable observé par microscope optique.	46
Figure 2.9. Tamis utilisés lors de l'essai granulométrique du plastique et polystyrène.	47
Figure 2.10. Photo du dispositif de mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre.	47

Figure 2.11. Immersion du plastique dans l'eau pendant 24h.....	48
Figure 2.12. Etuvage du plastique jusqu'à l'évaporation totale de l'eau.....	48
Figure 2-13. Morphologie des granulats de plastique vue par microscope optique.....	48
Figure 2.14. Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre.....	49
Figure 2.15. Morphologie des billes de polystyrène observé par microscope optique.	50
Figure 2.16. Morphologie des billes de polystyrène coupées observé par microscope optique.....	50
Figure 2.17. Organigramme de répartition des dosages des composites.....	55
Figure 2.18. Proportions des constituants	57
Figure 2.19. Malaxeur utilisé.....	57
Figure 2.20. Dispositifs des essais à l'état frais	58
Figure 2.21. Maniabilimètre B (180x90x90mm).....	59
Figure 2.22. Schématisation du dispositif.....	59
Figure 2.23. Schématisation du dispositif de flexion à 3 points.	60
Figure 2.24. Dispositif de flexion à 3 points.....	60
Figure 2.25. Principe de réalisation de l'essai de l'écrasement à la compression	61
Figure 2.26. Schéma de l'essai de l'absorption par capillarité	63
Figure 2.27. Montage expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption par capillarité.....	63
Figure 2.28. Prise de masse des éprouvettes	64
Figure 2.29. Trois types de porosité présente dans les matériaux (Connecté, Occluse et Piégée) 65	
Figure 2.30. Immersion des échantillons dans l'eau jusqu'à saturation	67
Figure 2.31. Montage expérimentale utilisé dans l'essai de calcul de porosité.....	67
Figure 2.32. Dispositif de serrage, sonde, éprouvettes.	68
Figure 2.33. Organigramme récapitulatif des essais réalisés	69
Figure 3.1 Variation des résistances et de temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.....	72
Figure 3.2 L'ouvrabilité du mélange M75.....	74
Figure 3.3 L'ouvrabilité du mélange M50.....	75
Figure 3.4 L'ouvrabilité du mélange M25.....	76
Figure 3.5. Variation des masses volumiques à l'état frais en fonction des dosages en granulats..78	
Figure 3.6. Variation des masses volumiques à l'état durci en fonction des dosages en granulats.	80
Figure 3.7. Relation entre la masse volumique aux états frais et durcis.....	81
Figure 3.8. Variation de la porosité introduite en fonction des dosages en granulats.....	83
Figure 3.9. Evolution pendant 24h de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M25.....	85
Figure 3.10. Evolution partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M25.....	85
Figure 3.11. Photo des profondeurs de pénétration d'eau dans les éprouvettes - M25.....	86
Figure 3.12. Evolution pendant 24h partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M50.....	87
Figure 3.13. Evolution partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M50.....	87

Figure 3.14. Evolution partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M75.....	88
Figure 3.15. Evolution pendant 24h de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M75.....	88
Figure 3.16. Photo des profondeurs de pénétration d'eau dans les éprouvettes - M75.....	89
Figure 3.17. Aspect général de quelques micros bétons légers à base de granulats de plastique et de polystyrène vue pas microscope optique.	91
Figure 3.18. Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats légers à 7 jours.....	93
Figure 3.19. Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats légers à 28 jours....	93
Figure 3.20. Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats légers à 28 jours....	95
Figure 3.21. Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en granulats.....	98
Figure 3.22. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.....	99

Liste des Tableaux

Tableau 1.1. Classification des bétons légers	15
Tableau 1.2. Classification des bétons légers	15
Tableau 1.3. Caractéristiques de quelques bétons légers	19
Tableau 1.4. Caractéristiques des granulats légers	24
Tableau 1.5. Choix des granulats en fonction des classes de béton.....	24
Tableau 1.6. Propriétés du béton léger à base de billes de polystyrène	33
Tableau 2.1. La nature et qualité du sable.	43
Tableau 2.2. Les caractéristiques physiques des granulats utilisé.	45
Tableau 2.3. Caractéristiques chimiques du ciment	50
Tableau 2.4. Caractéristiques physiques du ciment.....	51
Tableau 2.5. Temps de prise du ciment.....	51
Tableau 2.6. Résistance mécanique du ciment.....	51
Tableau 2.7. Caractéristiques Chimique de l'eau : Analyse chimique de l'eau utilisée [A.D.E]	52
Tableau 2.8. Composition chimique de l'eau de gâchage [A.D.E]	52
Tableau 2.9. Proportion des granulats légers	54
Tableau 2.10. Composition d'un m ³ de MBL- M25.....	56
Tableau 2.11. Composition d'un m ³ de MBL- M50.....	56
Tableau 2.12. Composition d'un m ³ de MBL- M75.....	57
Tableau 2.13. Type du béton en fonction de son temps d'écoulement.....	60
Tableau 3.1. Détermination du dosage en eau.....	71
Tableau 3.2. L'ouvrabilité du mélange M75.....	73
Tableau 3.3. L'ouvrabilité du mélange M50.....	75
Tableau 3.4. L'ouvrabilité du mélange M25.....	76
Tableau 3.5. Classification des coefficients d'absorption et des MBL.	89
Tableau 3.6. Les résultats des résistances à la traction par flexion des MBL.	96

Introduction générale

Avec le développement des nouvelles technologies de conception et de réalisation, l'heure est à la construction d'habitation à structures légères. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, les bétons à base de granulats légers, connaissent un véritable regain d'intérêt à travers le monde, entre autres leur légèreté. Ils présentent des performances assez intéressantes. Plusieurs études étaient menées pour l'élaboration et le développement de ces matériaux et devant les besoins croissants des ressources en matériaux et aux exigences de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil [1-2].

Les matières plastiques et les polymères sont présents dans presque tous les secteurs de l'activité humaine. De nos jours et dans le domaine de la construction, les recherches sont orientées vers la valorisation des matériaux, particulièrement ceux qui sont nocifs à la nature, non biodégradables et qui constituent un handicap majeur à l'environnement [3-4].

Les polymères jouent un rôle très important dans les opérations industrielles créant ainsi une masse de déchets très importante. En les recyclant cela permet de combattre d'une part l'accumulation de ces derniers et d'autre part, d'assurer l'équilibre de la nature par la résolution du problème de la pollution qu'ils engendrent tout en tirant profit de leurs performances physico-mécanique et thermiques [3].

Peu de travaux sont réalisés dans le sens à combiner entre différents types de déchets polymères. L'idée de notre étude est d'utiliser des mélanges hybrides pour avoir un effet synergique entre les granulats de plastique à base de polyéthylène a basse densité et de polystyrène expansé traité, ces déchets sont incorporé dans une matrice cimentaire à base de sable alluvionnaire et qui s'avère très intéressantes dans la mesure où les caractéristiques mécaniques restent acceptables, non seulement dans l'allègement des micros bétons destinés à la construction des chapes mais aussi à l'isolation thermique et acoustique. C'est dans ce cadre que se situe notre travail.

A travers ce mémoire, nous nous intéressons à l'étude du comportement des micro-bétons légers d'où une partie de la matrice a été substitué et remplacé par des granulats légers hybrides. Cette étude consiste à comparer les propriétés, physiques et macrostructurales, mécaniques ainsi que thermiques de ces composites. Nous cherchons par ailleurs à comprendre les mécanismes intervenants lors des différentes substitutions et qui sont responsables des comportements remarqués à travers les résultats.

Le premier chapitre présente en premier lieu les informations qui relatent plusieurs aspects concernant les déchets, leur présentation ainsi que les méthodes requises pour leur gestion, et comment peut-on les exploiter dans le domaine de la construction tout en visant une utilisation de ce type de micro béton léger à base de granulats issu du recyclage de ces déchets dans le domaine de la construction dans le cadre du développement durable. En seconde lieu une synthèse bibliographique sur les bétons légers où des définitions, classifications et domaine d'application ont été présentées selon les performances et les avantages, ainsi qu'une synthèse sur les notions de base des comportements des matériaux étudiés auparavant suite à l'incorporation de plastique ou de polystyrène et les résultats requis.

Le second chapitre est celui qui présente les caractéristiques des matériaux utilisés, une description des méthodes expérimentales utilisées pour leur caractérisation, suivie de la formulation adaptée à notre type de composite, finalisée par une série de différents essais effectués sur les divers composites qui a été mise en place afin d'étudier les particularités de ces matériaux et leur caractérisation à l'état frais ainsi qu'à l'état durcis.

Le dernier chapitre décrit les résultats requis lors de notre travail. Les premiers résultats expérimentaux regroupant essentiellement le comportement des micro-bétons à l'état frais, les seconds résultats exposent le comportement de ce type de bétons à l'état durcis pour les grandeurs mécaniques (résistance mécanique en compression et en flexion), physiques (masse volumique, l'absorption par capillarité, la porosité) et thermiques (conductivité). Les comparaisons des résultats s'effectuent entre les micro bétons et le référentiel, ces deux types sont formulés à partir des mêmes constituants, avec un rapport Eau/Ciment constant dont la variation se réside uniquement par l'effet de la substitution et la variation du type de granulats. Les résultats sont présentés en fonction du taux de substitution pour chacune des formulations avec les différentes teneurs en plastique et/ou polystyrène étudiées.

Après avoir noté l'évolution des diverses grandeurs mesurées et les différences éventuelles des composites élaborés, nous confrontons les résultats aux réglementations actuellement en vigueur. Ces résultats permettront de justifier si la méthode établie pour la confection de ce type de micro béton est conforme aux normes et exigences ou s'il convient d'envisager des modifications complémentaires.

Une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats sur la comparaison entre les différents composites du point de vue physico-mécanique et thermique. Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter des informations pertinentes sur ces nouveaux matériaux en génie-civil.

Chapitre 1 . Revue sur la bibliographie

1.1 Introduction

Chaque procédé de valorisation permet de réaliser des économies de matières premières et contribue de façon directe au respect et à la sauvegarde de l'environnement. Le concept de valorisation des déchets est né de l'idée que l'entreprise doit considérer ses déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser !

En effet beaucoup de matériaux sont réutilisables dans diverses applications après leur fin de vie attribuée.

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques qui a été faite à travers les différentes documentations consultée, concernant les constituants de base des composites à élaborer, leurs gestions étant considérés comme déchets, ainsi les enjeux environnementaux qu'ils représentent pour le développement durable et la construction, en passant par les différentes phases de recyclage et ce dont la recherche a pu aboutir.

1.2 Développement durable

Le développement durable est la notion qui définit le besoin de transition et de changement dont a besoin notre planète et ses habitants pour vivre dans un monde plus équitable, en bonne santé et en respectant l'environnement comme c'est schématisé à la **Figure 1.1**.

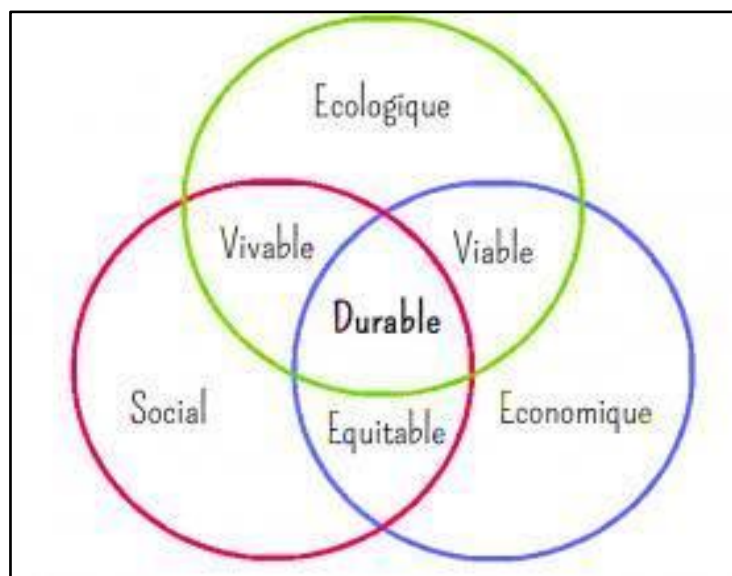


Figure 1.1. Schéma du développement durable [95].

L'objectif du développement durable est de définir des schémas viables qui concilient l'aspect économique, social et écologique : « trois piliers » à prendre en compte par les collectivités comme par les entreprises et les individus. La finalité du développement durable est de trouver un équilibre cohérent et viable à long terme entre ces trois enjeux.

1.2.1 Déchets et construction durable

1.2.1.1 Stratégies de traitement des déchets et ses enjeux

a) *Plastique*

Le plastique est un matériau qui a de nombreuses qualités et il est de ce fait devenu incontournable dans la vie de tous les jours. Il est présent dans de nombreuses applications sous différentes formes mais une des plus présentes est la forme « emballage ». Nous parlons de matériaux thermoplastiques c'est-à-dire qu'ils peuvent être fondus et transformés à nouveau.

On distingue trois grandes familles de plastiques dédiés qu'il est possible de retrouver sous forme de polluants dans la rue :

- Le polyéthylène (PE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polyéthylène téréphtalate (PET)

Dans un monde de plus en plus enclin au changement climatique, à la pollution et à la destruction de l'environnement, il est tout naturel de rechercher des solutions idoines pour freiner un tant soit peu cet état de choses.

Le recyclage des déchets de plastique s'impose comme l'une des solutions les plus efficaces pour lutter contre la pollution de l'environnement **Figure 1.2**. En effet, ces déchets ont de grands impacts sur la santé des populations, sur les espèces animales et sur la biodiversité en général. À titre illustratif, selon les scientifiques, un déchet plastique enfoui dans le sol prend environ 400 ans pour se dégrader, ce qui se révèle très nuisible pour l'environnement. Jetés dans la nature, les déchets plastiques peuvent se retrouver d'une manière ou d'une autre dans la mer et ainsi nuire aux animaux aquatiques. Ces mêmes plastiques enfouis dans le sol finissent par porter atteinte aux cultures, car les empêchant d'étendre leurs racines sous la terre pour trouver les minéraux nécessaires à leur développement [5].



Pollution des forêts par les sachets en plastique



Pollution des océans par le plastique

Figure 1.2. Déchet de plastique affectant la nature [5].

b) Polystyrène

Isolant thermique ou protection des objets, le polystyrène existe sous de nombreuses formes très présentes dans notre quotidien, une fois exploité et jeté, forme une gêne à la nature **Figure 1.3**. Longtemps voué à l'incinération, des solutions innovantes permettent aujourd'hui de valoriser ce matériau composite.

Polystyrène (PS), polystyrène expansé (PSE), polystyrène extrudé (XPS), polystyrène papier (PSP), ... Les différents polystyrènes disposent de nombreuses propriétés qui le rendent incontournables : résistants au choc, isolants thermiques, imperméables, ...

Ses usages vont du secteur du BTP pour l'isolation des bâtiments, au conditionnement des produits frais en passant par les boîtiers CD et l'emballage des ordinateurs. Cette omniprésence constitue un danger pour l'environnement : à l'image des plastiques, il met plus de 1 000 ans à disparaître dans la nature. Il n'est pas toxique, mais peut causer la mort d'animaux sauvages qui l'avalent en le confondant avec une proie et s'obstruent le tube digestif. C'est pourquoi sa collecte et son recyclage s'imposent comme des enjeux environnementaux.



Figure 1.3. Déchets de polystyrène [6].

Le recyclage présente donc plusieurs avantages parmi lesquels on peut énumérer :

- La diminution de la pollution et des risques écologiques, car 1 tonne de plastique recyclé équivaut à 800 kg de pétrole brut économisé.
- La protection de l'environnement, car moins de déchets seront jetés.
- La protection des espèces animales en général et des espèces aquatiques en particulier.
- La préservation des ressources parce que moins de matières premières seront utilisées.
- La préservation de la couche d'ozone, car moins de matières nuisibles seront brûlées [6].

c) Gestion des déchets

- Comment valoriser le plastique ?

Classé dans la famille des polyoléfines, le polyéthylène se hisse en tête du classement des plastiques les plus connus et les plus utilisés à travers le monde. Très largement disponible, cette matière s'obtient même, grâce à de récentes évolutions technologiques, à partir de ressources non fossiles.

A partir du gaz éthylène, qui provient du raffinage du pétrole ou de gaz naturel, on procède à la polymérisation. Il s'agit d'une réaction chimique qui permet, en fonction de la durée et de la température, de solidifier les éléments liquides ou gazeux pour les transformer en plastomère.

Selon le type de polymérisation, on obtient des polyéthylènes de plusieurs natures :

- « Basse densité » : PEbd,
- « Haute densité » : PEhd,
- « Haut poids » moléculaire : PEuhmw pour ultra high molecular weight.

Les emballages fabriqués en polyéthylène sont entièrement recyclables. Ils peuvent être collectés via les conteneurs présents dans les villes ou via la poubelle de tri sélectif. Les déchetteries récupèrent également ce type de plastique.

Les emballages collectés partent ensuite vers un centre de traitement pour être triés, famille par famille. Le polyéthylène est par exemple isolé des autres plastiques puis aplati pour être stocké sous forme de balles (gros cube). Après cette opération, il est envoyé dans un centre de recyclage. Broyé, lavé puis séché, il est transformé en paillettes et incorporé dans la production de nouveaux contenants comme c'est présenté dans la **Figure 1.4**.

Quand il présente des signes d'usure, le plastique de polyéthylène est entièrement recyclé. On commence par le broyer avant de le chauffer à 200 degrés. Ensuite, il est prêt à entrer dans la composition d'objets en plastique.

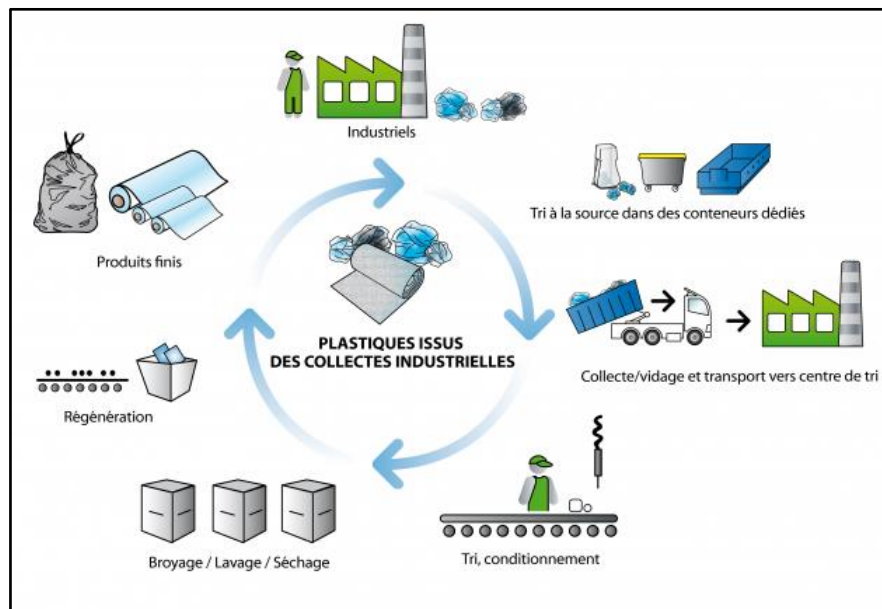


Figure 1.4. Cycle de recyclage de plastique (polyéthylène) [96].

Aujourd'hui, on estime que 269 000 tonnes de déchets plastiques flottent sur les eaux des mers et océans. Alors qu'un geste simple permet de le recycler et de renforcer l'économie circulaire [7].

- Comment valoriser le polystyrène ?

Qualité, pureté et couleurs restent les trois critères essentiels à toute valorisation du polystyrène. La matière collectée et triée doit ensuite être broyée puis compactée : son volume peut être divisé par 50 ! Ainsi conditionnés, les résidus sont utilisés dans la fabrication de nouveaux emballages ou de panneaux d'isolation **Figure 1.5 [6]**.

Remarque :

Le principal obstacle à la collecte reste le caractère diffus et très fin de cette matière, que l'on trouve sous forme d'une barquette d'emballage alimentaire par exemple. Le taux de recyclage est estimé à 30 %, alors que le matériau est 100 % valorisable.

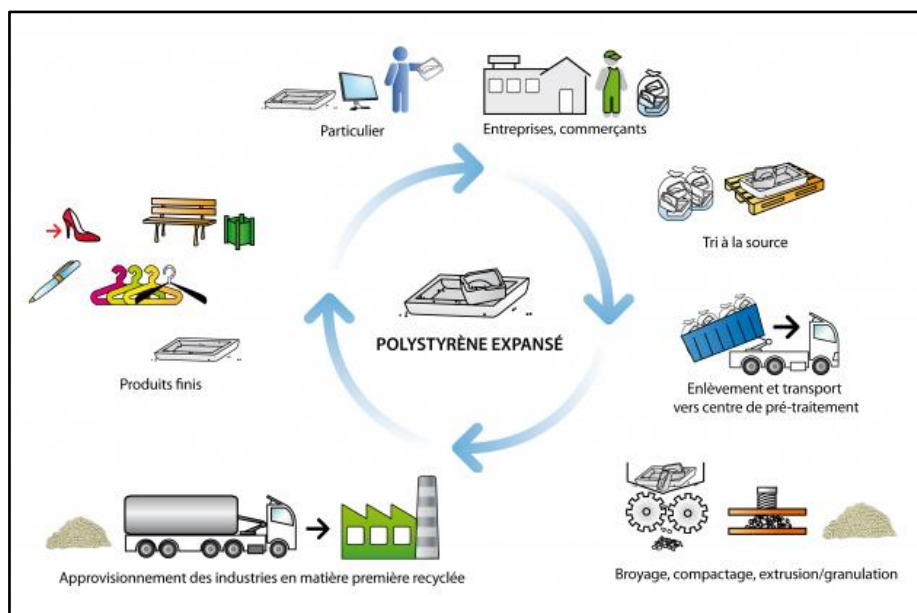


Figure 1.5. Cycle de recyclage du polystyrène [97].

d) L'avenir c'est l'éco construction

On parle de construction durable ou d'éco construction pour définir un ensemble d'éléments qui concourent à valoriser les économies d'énergie et la protection de l'environnement dans le cadre du bâtiment.

L'objectif étant d'atteindre une haute performance énergétique d'optimiser le confort et la santé des occupants des bâtiments, mais aussi de privilégier la qualité des matériaux nécessaires en misant sur leur exemplarité sanitaire et environnementale. Aujourd'hui, les bâtiments consomment 40% de l'énergie mondiale et ils sont à l'origine de 36% des émissions de CO₂.

L'objectif est clair, montrer que construire avec des matériaux écologiques est tout à fait possible. Mettre en avant tous les avantages d'un béton formulé avec déchets dans sa longévité, sa capacité naturelle à réduire l'absorption de la chaleur.

La filière de la construction est particulièrement concernée et doit se mobiliser parce qu'elle produit des matériaux, transporté et mis œuvre pour des bâtiments (maison, immeuble, bureaux, commerce...), Non seulement ces bâtiments s'inscrivent durablement dans le paysage, mais aussi génèrent des déchets (en phase de construction, d'utilisation et de démolition ou remplacement) tout en consommant de l'énergie (éclairage, matériel, chauffage, climatisation).

Pour minimiser en quelques sortes ces consommations (énergie, matériaux et déchets), des solutions ont été proposées :

- **Réduire les besoins en énergies des bâtiments :**
 - Développer les techniques d'isolation (murs, toitures, menuiseries... et soigner les interfaces, le bâti existant étant le plus gros gisement d'économie) ... tout en garantissant le renouvellement d'air intérieur (ventilation) et le respect du bâti ancien de qualité ;
 - Privilégier les apports solaires et l'inertie du bâtiment pour les constructions neuves (conception, orientation, isolation, choix des matériaux...) tout en assurant le confort d'été (casquettes, ventilation, végétation...).
- **Favoriser la performance** des équipements existants (régulation de chauffage...) ou le remplacement par des équipements économes (pompes à chaleur, chaudières à condensation ...).
- **Utiliser les énergies renouvelables [8].**

→ C'est dans ce concept que l'étude d'un micro béton léger à base de granulats de plastiques et de polystyrène a été élaborée.

1.3 Isolation thermique

1.3.1 Principe de l'isolation thermique

Le principe de l'isolation thermique désigne l'ensemble des méthodes employées afin de limiter les transferts de chaleur entre deux milieux ayant des températures différentes. Ainsi, l'isolation thermique dans les maisons a pour principal objectif de

conserver à l'intérieur la chaleur en hiver et la fraîcheur en été. Le but de cette isolation est également de diminuer les consommations d'énergie par les constructions (chauffage en hiver et climatisation éventuelle en été), puisque le développement durable est devenu une préoccupation importante du citoyen du XXIème siècle.

Dans les maisons actuelles de nombreux isolants sont utilisés, ayant tous leurs propres caractéristiques, avantages et inconvénients (ex : laine de verre, fibre de bois, isolants synthétiques (polystyrène expansé, polyuréthane) ...)

1.3.2 Théorie de l'isolation

Selon le paragraphe précédent, tous les lieux d'une habitation sont propices à des déperditions de chaleur (toit, murs, ouvertures, sol...), même étant isolés **Figure 1.6**.

Voici donc la répartition des pertes de chaleur dans une maison mal isolée

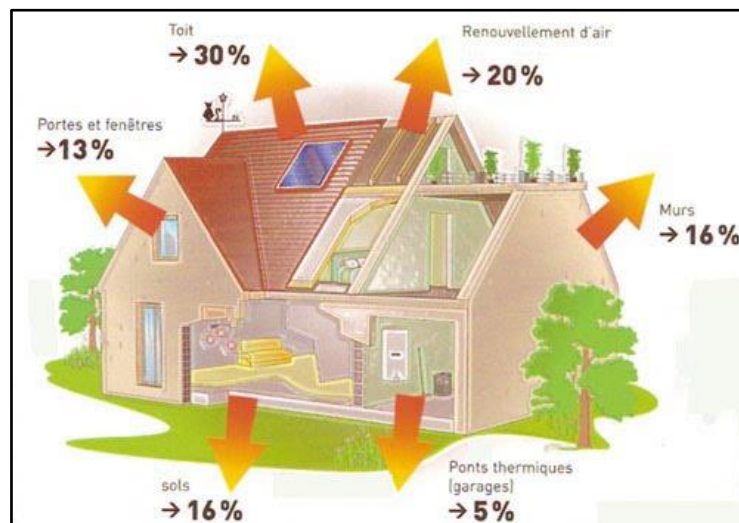


Figure 1.6. Déperditions de chaleur [98].

Et maintenant les différents endroits d'une habitation où une bonne isolation est possible afin de réduire les transferts de chaleur sont présentés comme suit dans la **Figure 1.7** :

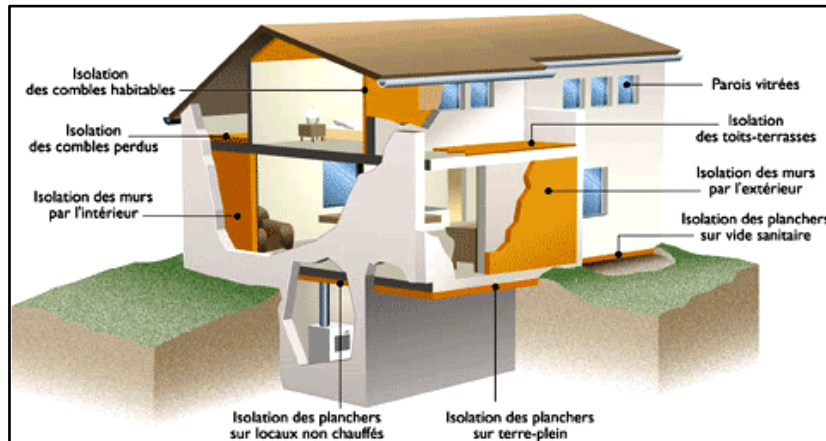


Figure 1.7. Travaux d'isolation thermique [99].

Dans une maison isolée, les ponts thermiques représentent alors une part plus importante, en proportion, des déperditions de chaleur ($\approx 20\%$ à 40% au lieu de 5% dans une maison moins bien isolée), bien que le total de ces déperditions soit nettement en-dessous de celui d'une maison non isolée ($\approx 0,3 \text{ W.m}^{-2}$).

Une sur-isolation n'est cependant pas obligatoirement la meilleure solution, le seuil de rentabilité financière entre le coût des matériaux, leur durabilité et les économies d'énergie réalisées n'étant pas atteint dans tous les cas.

Il devient donc nécessaire de bien choisir les isolants à utiliser tout en respectant certains paramètres. Ceux-ci doivent donc :

- Remplir uniformément tout l'espace (et sans aucun pont thermique) ;
- Avoir une bonne tenue et une mise en place aisée dans les parties de la maison à isoler ;
- Être résistants à l'humidité, à la chaleur et donc au feu ;
- Être résistants aux différents flux de température le plus longtemps possible [9].

1.3.3 Techniques d'isolations

Dans les bâtiments, il existe trois techniques d'isolation thermique qui le point commun entre eux et d'éviter les déperditions de chaleurs et réduire leurs transferts au maximum, ils se présentent comme suit :

- **Isolation par l'extérieur**
- **Isolation par l'intérieur**
- **Isolation intégrée**

Dans notre étude nous visons à élaborer des matériaux destinés à l'utilisation de la technique d'isolation thermiques intégrée, qui a beaucoup d'avantages citons :

- Facilité de mise en place lors de la construction
- Faibles épaisseurs
- Assurer la conductivité thermique du matériau avant l'élaboration

1.4 Les Bétons Légers

1.4.1 Généralités sur les bétons légers

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux, ses caractéristiques suggèrent de nouvelles applications. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 kg/m³ [10].

Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ [11].

Enfin, le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences, par son excellent rapport poids/résistance et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction [12].

1.4.2 Béton léger dans la construction

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois peuvent également être utilisés pour les éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et leurs résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructifs, économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction.

1.4.3 Types de bétons légers

1.4.3.1 Béton de granulats légers

Les vides se trouvent au sein des granulats. Les bétons de granulats légers **Figure 1.8** sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers à la place du granulat ordinaire. Les granulats légers sont de différentes natures : schiste expansé, argile expansée, laitiers expansés, pierre ponce, perlite ou vermiculite. Parmi ces granulats, les quatre premiers peuvent être utilisés pour fabriquer le béton de structure.



Figure 1.8. Béton a granulats légers [100].

1.4.3.2 Béton cellulaire

Les vides se trouvent dans le liant. Les bétons cellulaires ne contiennent que du ciment, de l'eau et du sable. Des bulles d'air sont créées à l'intérieur de la pâte **Figure 1.9**, soit par gâchage avec de la poudre d'aluminium, soit par gâchage avec de l'eau savonneuse.

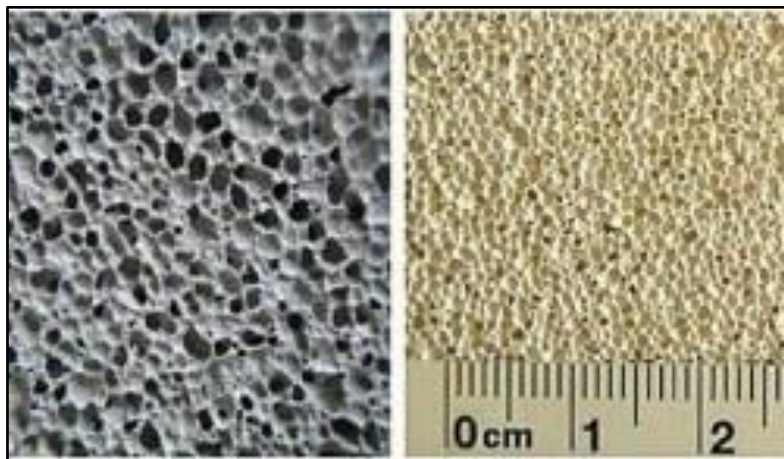


Figure 1.9. Béton cellulaire [101].

En général, les bétons cellulaires ont une faible résistance en compression (2 à 8 MPa), mais leurs avantages résident dans la masse volumique plus faible (500 à 1000 kg/m³) et des propriétés d'isolation thermique supérieures (conductivité thermique de 0,1 à 0,2 W/m.K) à celles des autres bétons.

1.4.3.3 Béton caverneux

Les vides se situent entre les gros granulats par suppression des granulats fins. Les bétons caverneux **Figure 1.10** sont fabriqués comme les bétons ordinaires mais sans le sable. Il existe donc de gros vides au sein de la matrice de mortier qui sont responsables de sa faible résistance. On l'utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure.



Figure 1.10. Béton caverneux [102].

1.4.4 Différence entre bétons classiques et bétons légers

Malgré que les bétons classiques présentent de bonnes qualités, ils ont toujours eu des inconvénients à savoir :

- Le poids propre des éléments de béton ordinaire est très élevé et cela peut présenter un grand pourcentage de charge de structure ;
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance ;
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage) ;
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres [13].

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

- D'éléments porteurs de faible section ;
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée ;
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance ;
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique [10].

1.4.5 Classification des bétons légers

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide **ACI 213R-87 [14]** distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci **Tableau 1.1.**

Tableau 1.1. Classification des bétons légers [14]

Classification	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	>17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	<7

De même **Kass J.L et Compbell. D [15]**, en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction **Tableau 1.2**. Cette classification a été recommandée par la suite par **RILEM [16]**.

Tableau 1.2. Classification des bétons légers [16]

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

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

1.4.5.1 Bétons de remplissage

Leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.

1.4.5.2 Bétons porteurs isolants

Leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs

caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

1.4.5.3 Bétons de structure

Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible.

1.4.6 Domaine d'utilisation

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

1.4.6.1 Bétons d'isolation pure, non porteurs

Leur faible masse volumique 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.

1.4.6.2 Bétons porteurs et isolants

Leurs masses volumiques variant comme cité précédemment (voir paragraphe 1.4.5.2) 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.

1.4.6.3 Bétons légers de structure

Avec leurs masses volumiques (voir paragraphe 1.4.5.3) et résistances 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 où 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.

1.4.7 Caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons légers

1.4.7.1 Propriétés physico-mécaniques des bétons légers

a) Légèreté

L'emploi des bétons légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m^3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m^3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m^3 pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m^3 pour un béton cellulaire. L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction [17].

b) Porosités

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom ($\text{\AA}$) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités. Les granulats possèdent une porosité intrinsèque, due à la présence de l'air intra-particule comme c'est présenté selon Cerezo [18] dans la Figure 1.11. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique [17].

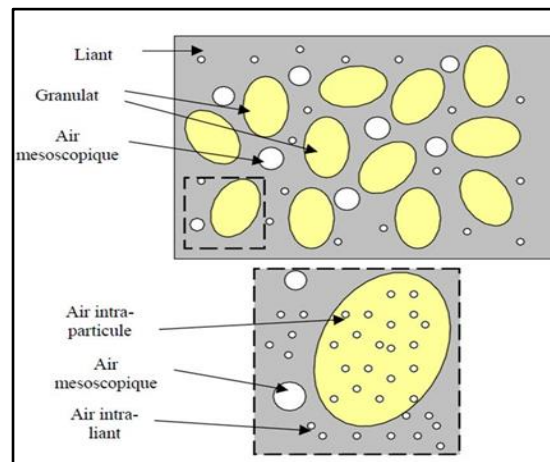


Figure 1.11. Porosités du béton [17].

c) Rhéologie des bétons légers

La rhéologie du béton à l'état frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité. On qualifie la rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage, relativement à la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et des coffrages [11].

d) Résistance à la compression

En général les bétons légers présentent une résistance à la compression inférieure à celles du béton traditionnel. Cependant ils existent des bétons légers qui peuvent atteindre des résistances comparables à celles du béton ordinaire comme il est le cas du béton léger de haute performance (BLHP) [11]. Tout dépend de la qualité des granulats, la qualité de la matrice cimentaire et la masse volumique du béton durci. Le **Tableau 1.3** suivant résume quelques caractéristiques physico-mécaniques des bétons légers selon Cerezo [18].

Tableau 1.3. Caractéristiques de quelques bétons légers [18]

	Constituants			ρ (kg/m³)	Porosité	Rc (MPa)	E (GPa)	Retrait ε (m/m)
	Nom	Masse (kg)	Volume (m³)					
Granulats	Granulat minéral (grés, granite.....)			2600	< 1%	-	60	-
	Argile expansée			850	60 à 70%	6 à 9	-	
	Copeau de bois en vrac			275	75 %	-	10 à 12	
	Granulat bois Agresta			600	60%	-		
Béton hydraulique	Granulat	755	0.285	2330	9%	30	36	1.10 ⁻⁴
	Sable	925	0.350					
	Ciment	440	0.140					
	Eau	210	0.215					
	Air	-	0.015					
Béton argile expansé	Granulat	351	0.414	1600	36%	25	14	-
	Sable	602	0.230					
	Ciment	400	0.127					
	Eau	193	0.193					
	Air	-	0.025					
Béton cellulaire	Mortier ciment			350-650	75 à 82%	5	2 à 3	2.10 ⁻³
	Air							
Béton de bois	Copeaux de bois	170	0.212	600-900	52 %	3.5 à 4	-	-
	Ciment	350	0.113					
	Eau	200	0.200					
	Air	-	0.379					
	Sable*	250	0.096					
	Filler*	-	-					

e) L'isolation thermique

L'une des caractéristiques les plus importantes des bétons légers est leur pouvoir isolant. Cette propriété est caractérisée par des paramètres thermo physiques qui sont : la conductivité thermique λ (W/m.K), la chaleur spécifique c (J.kg-1.K-1), la diffusivité thermique a (m²/s) et l'effusivité thermique b (J.m-2.s-1/2.K-1) [19-20].

f) Durabilité des bétons légers

L'utilisation des granulats légers n'affecte pas la durabilité à long terme du béton. En effet, la porosité des granulats est généralement discontinue et n'influence pas sur la perméabilité du béton. Cette propriété est plutôt contrôlée par la pâte du ciment durcie et par la qualité des interfaces pâte-granulats. La résistance au gel et à l'écaillage du béton est obtenue en combinant des granulats et une matrice de qualité. Bien que les granulats légers soient très absorbants, ils sont néanmoins très durables au gel. Comme dans les bétons ordinaires, l'air entraîné permet de protéger efficacement le matériau contre le gel et l'écaillage [16], [21].

1.4.8 Les avantages d'un béton léger

L'utilisation du béton de granulats légers en structure peut être bénéfique au niveau du coût d'un projet et de la fonctionnalité de la structure ou de l'ouvrage. Même si le coût par mètre cube d'une structure de béton de granulats légers est souvent plus élevé que celui en béton ordinaire, le coût total d'un projet utilisant le béton léger est souvent réduit grâce aux avantages liés au béton de granulats légers par rapport au béton ordinaire :

- La réduction de la charge transmise à la fondation mène à la réduction des dimensions de la fondation et des têtes de pieux, ainsi qu'à la diminution du nombre de pieux et du renforcement ;
- La réduction du chargement statique mène à la réduction des dimensions des structures portantes ;
- La réduction du chargement statique réduit la force d'inertie sismique ;
- Pour le béton précontraint préfabriqué, le béton de granulats légers permet de fabriquer des structures plus longues et plus larges sans augmenter la masse totale ;
- L'épaisseur de la structure résistante au feu peut être diminuée grâce à l'isolation thermique du béton de granulats légers, ce qui mène à la réduction du volume de béton ;
- La diminution du volume de béton conduit à une réduction du coût de transport.

L'utilisation du béton de granulats légers permet également de construire sur un sol de faible capacité portante, grâce à la réduction de la masse totale de l'ouvrage ainsi qu'à une augmentation de la productivité grâce à la réduction de la masse totale de matériaux à manipuler [10].

1.5 Les Granulats légers

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté. Ils peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et ayant subi ou non des transformations. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, selon le granulats léger choisi, la masse volumique. Par contre, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance à la compression.

Dans la documentation, on dénombre trois catégories de granulats légers, ceux destinés aux bétons légers structuraux, ceux pour les bétons légers isolants et ceux pour les bétons légers de remplissage. La **Figure 1.12** résume les différents types de granulats légers que l'on utilise dans les différentes applications recherchées selon [22]. Ainsi que les normes **ASTMC 330** et **ASTM-C332** regroupent les exigences ainsi que la description des essais de contrôle pour les granulats et les bétons légers de structure et les bétons légers isolants.

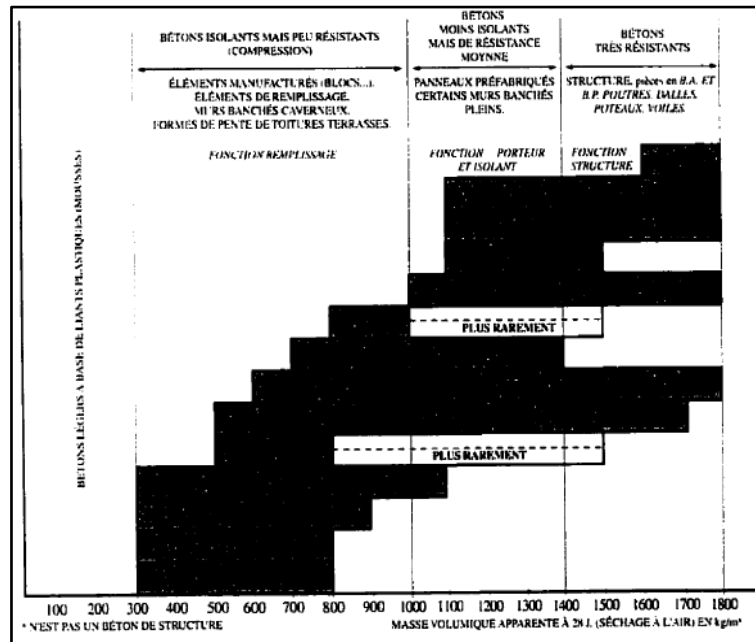


Figure 1.12. Classification des bétons légers suivant leurs masses volumiques et utilisation [22].

1.5.1 Classification des granulats légers

1.5.1.1 Granulats naturels

Les granulats légers naturels sont presque tous d'origine volcanique, à l'exception des diatomées. On trouve dans cette catégorie la pierre ponce, les diatomites et le laitier volcanique ainsi que les OPS **Figure 1.13**. Les granulats naturels ne sont pas très utilisés car ils ne se trouvent que dans certaines régions du monde [23].



Pierre ponce



OPS (Oil palm shell)



Diatomite



Laitier volcanique

Figure 1.13. Différents granulats légers naturels [23].

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. Ces matériaux naturels existent dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour des utilisations locales.

1.5.1.2 Granulats artificiels

Les granulats légers artificiels **Figure 1.14** fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau. Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à très haute température (1000°C à 1250°C environ).



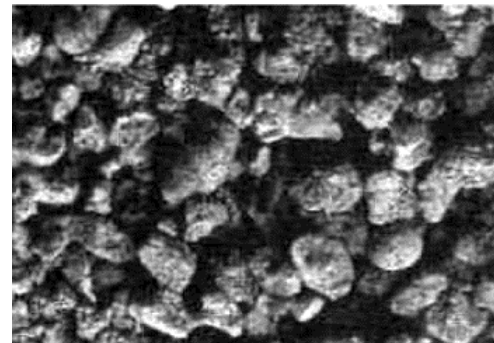
Argile expansé



Schiste expansé



Cendres volantes



Laitier expansé



Granulats de plastique



Granulats de polystyrène (PSE)

Figure 1.14. Différents granulats légers artificiels [23].

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 certaines régions ; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'PSE (Polystyrène Expandé) [24].

1.5.2 Propriétés physico-mécaniques et thermiques des granulats légers

D'après la littérature et selon divers ouvrages ainsi qu'à travers les différentes études antérieures faites par plusieurs chercheurs [25]–[29-31], et selon Ziregue [1], les

différentes caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des granulats légers sont classé dans le **Tableau 1.4**.

Tableau 1.4. Caractéristiques des granulats légers [1]

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

1.5.2.1 Masse volumique

Grace à leur structure cellulaire, les granulats légers ont une masse volumique plus faible que celle des granulats normaux. Elle est fortement liée à la porosité du granulat et à la densité de la matière d'origine du granulat. Selon Ferhat [25], le **Tableau 1.5** fixe le choix des granulats en fonction de la classe du béton.

Tableau 1.5. Choix des granulats en fonction des classes de béton [25].

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

(+) utilisation recommandée

+ utilisation possible

0 utilisation impossible

1.5.2.2 Résistance des granulats légers

La résistance des granulats légers a une grande influence sur la résistance du béton. Il a été montré que pour une masse volumique sèche donnée du béton léger, la

résistance à la compression du béton croissait avec la résistance des grains, déterminée à l'aide de l'essai au pot [32]. Une faible masse volumique traduit une forte expansion des grains, et donc la présence de nombreuses alvéoles dans les granulats légers, ou d'alvéoles de grandes dimensions. La présence de ses alvéoles nombreuses ou de grande taille, se traduit par une chute de résistance des grains. On pouvait donc s'attendre à ce qu'il existe une relation assez directe entre la résistance du béton léger et celle des grains constitutifs. La **Figure 1.15** montre la corrélation entre la résistance du béton léger et celle des grains déterminés par l'essai au fil.

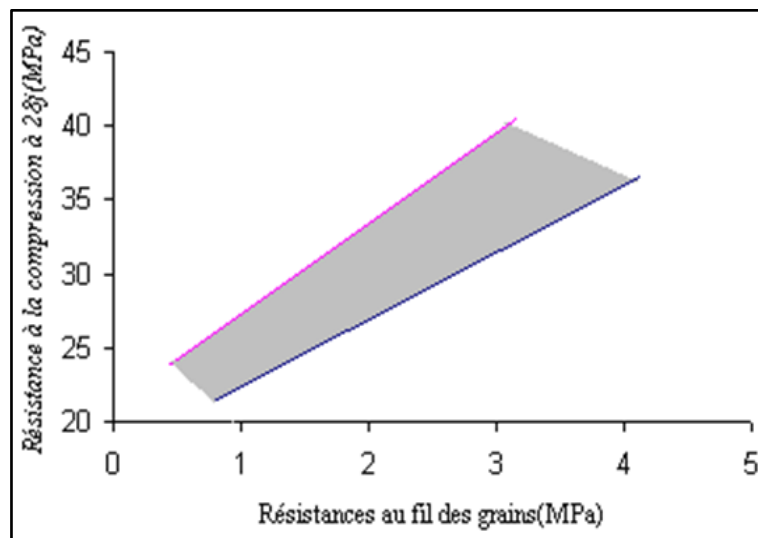


Figure 1.15. *Corrélation entre la résistance du béton léger et celle des grains déterminés au fil [32].*

1.5.2.3 Taille des granulats

Pour les granulats légers rigides utilisés dans les bétons de structures, on obtient des résistances meilleures avec les gros granulats qu'avec des petits granulats, alors pour les granulats légers utilisés dans les bétons de construction et d'isolation, le phénomène est inverse puisque les gros granulats sont relativement faibles et leur résistance peut constituer une limite pour celle du béton [10].

1.5.2.4 Porosité et absorption

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% [33],[34]. La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption. L'absorption d'eau, importante et variable, des granulats légers a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons [35] et même à long terme, la durabilité.

Selon les granulats, l'absorption après 48 heures d'immersion totale peut varier de 7 à 25 % en pourcentage du poids sec du granulat **Figure 1.16**.

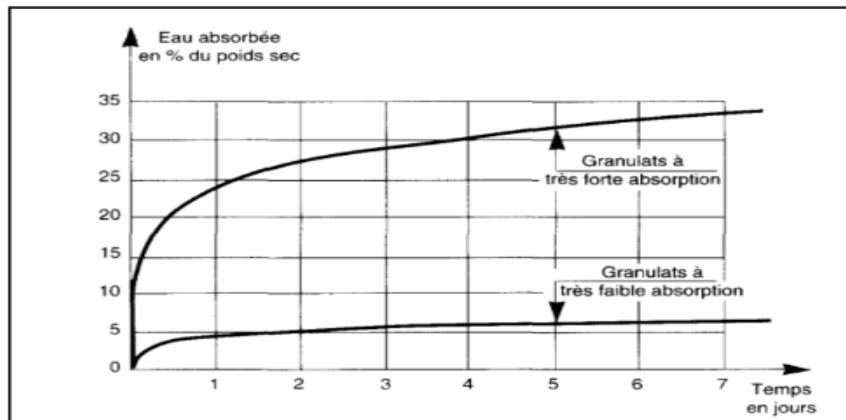


Figure 1.16. Courbe d'absorption d'eau [35].

1.5.3 Les granulats de polystyrène

1.5.3.1 Fabrication du polystyrène expansé

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

1.5.3.2 Pré-expansion

Le produit de base subit une phase de pré- expansion. Celle- ci s'effectue dans un pré mousser 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/h et à une température de 97 °C. Le produit obtenu a une densité comprise entre 17 et 18 kg/ m³.

1.5.3.3 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.

1.5.3.4 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.

1.5.3.5 Procédure d'élaboration des billes de polypropylène enrobées (traitées)

La première approche est de tenter d'enrober les billes de polypropylène avec

une très fine couche d'huile de vidange qui en séchant puisse se transformer en colle puis rouler les billes sur les fines poudres de marbre et céramique, après un temps de séchage une constatation a été faite que la coquille se détache facilement de la bille de polypropylène. Problème d'adhérence entre la bille et l'enveloppe extérieure. Dans une seconde approche, il a été opté pour un coulis de ciment qui a servi de colle entre la bille et la poudre, après un temps de prise, il a été remarqué que la coquille d'enrobage de la bille peut s'effriter facilement avec un petit effort de compression sur la bille.

Dans une troisième approche, les billes sont introduites dans un coulis de chaux à travers un filet (imprégnation), puis roulé sur des fines poudres de marbre et céramique, après un très petit temps de prise (durcissement à l'air libre) il a été vue que la coquille d'enrobage s'adhère remarquablement sur les billes de polypropylène [36].

1.5.3.6 Différence entre le polystyrène non traité et le polystyrène traité

L'emploi du polystyrène normal dans le béton donne une pauvre image de fragilité, pour minimiser ces problèmes on doit traiter ces billes de polystyrène de façons à d'améliorer ces caractéristiques.

a) ***Le polystyrène normal non traité***

- Le polystyrène revient à la surface du béton et flottera ;
- Le ciment descend au fond à cause de la différence de densité entre le polystyrène expansé et le ciment ;
- Difficultés d'obtention d'une homogénéité du matériau ;
- Difficulté de pomper ou de vibrer le béton ;
- Constatation d'aucune résistance au feu ;
- 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 ;
- Retrait important du béton dû 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).

b) Polystyrène traité

- Utilisable avec tous les types de ciment, et avec tous les types de granulats naturels ;
- Mixer avec des équipements traditionnels ;
- Grace à ce polystyrène le béton devenu homogène est réalisé avec les mêmes règles qu'avec le béton traditionnel ;
- Le béton transporté par camion est facile à pomper ;
- Aucun alvéole ne sera rempli d'eau pour réduire la différence de densité entre le mélange (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 ;
- Le polystyrène traité peut alléger tout type de béton de 3 à 80 % selon son taux d'incorporation ;
- Résistance à la compression élevée ;
- Le polystyrène traité est économique parce que les petites quantités de polystyrène traité sont suffisantes pour alléger le béton : les alvéoles du polystyrène traité ne seront remplis 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.

1.5.3.7 Caractéristiques physico-mécaniques et thermique du béton de polystyrène

a) Maniabilité

Il a été montré selon **Herihiri. O [36]** que la maniabilité augmente si le pourcentage du polystyrène PSE augmente **Figure 1.17** et cela revient à la réduction du volume du sable par contre le volume des autres composantes (ciment et l'eau) a été maintenu constant.

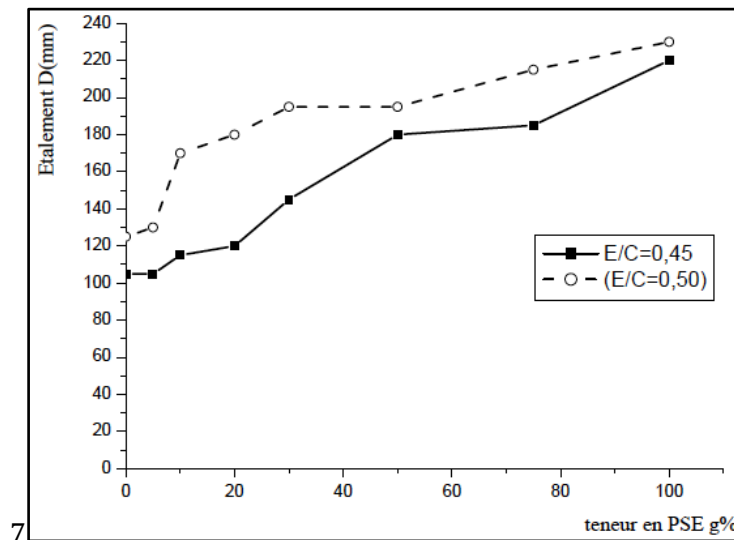


Figure 1.17. Influence de la teneur en polystyrène sur l'étalement [36].

b) Masse volumique

Les bétons confectionnés à partir de polystyrène ont une masse volumique aussi faible de l'ordre de 550 à 800 kg/m³ selon que l'on emploie une portion de sable ou non. Ces bétons offrent de piètres performances mécaniques : une résistance à la compression de l'ordre de 2,0 à 4,0 MPa en fonction du pourcentage de sable utilisé [36].

Selon une recherche [37] qui montrent que la masse volumique apparente des bétons élaborés (BPLPE,) diminue avec le pourcentage des granulats de polystyrène dans le temps.

Une étude sur la variabilité des masses volumiques en fonction du pourcentage de polystyrène a été menée par **Belmechrie O.H** [38] dont les résultats sont illustrés sur la **Figure 1.18** qui montre clairement l'influence de la substitution en polystyrène sur la chute de la densité du béton léger.

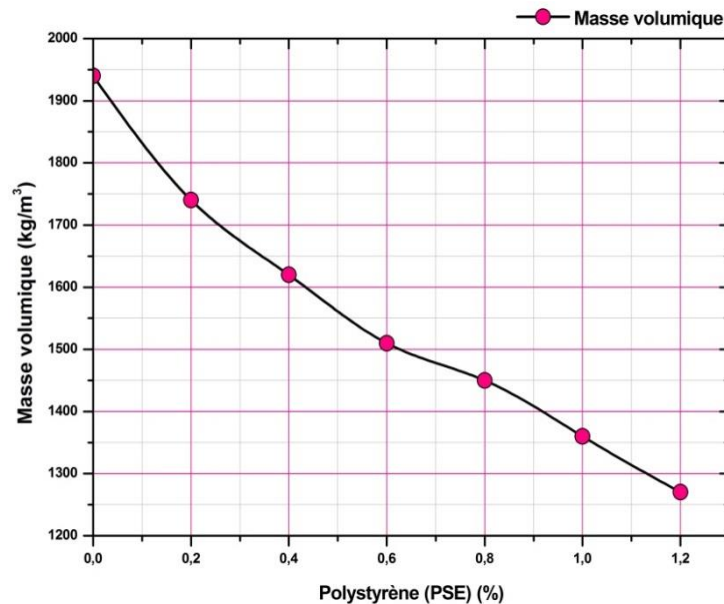


Figure 1.18. Influence de la teneur en polystyrène sur la masse volumique [38].

c) Résistance à la compression

Bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques. Chafi. N [39] a travaillé sur le béton de fibre de polystyrène expansé de densité comprise entre 1,1 et 2,2. Ses résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue sensiblement lorsqu'on augmente le taux de billes. A titre d'exemple, un béton de densité 0,1 a une résistance d'environ du 1/10 de celle du béton de densité 0,2 Figure 1.19.

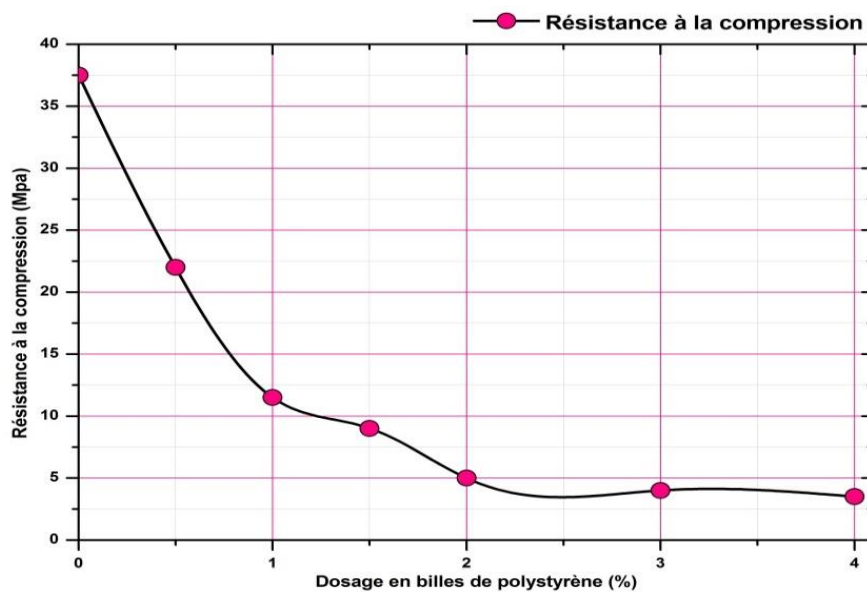


Figure 1.19. Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [39].

d) Résistance à la flexion

Par ailleurs, un comportement aux sollicitations de compression et de flexion très différent est observé. En effet, lorsqu'un béton de densité 1,3 possède une résistance à la compression de 1/10 de celle d'un béton de densité 2,2, il a une résistance à la flexion de 4/10 **Figure 1.20** selon **Chafi. N [39]** c'est-à-dire quatre fois plus. Il trouve que l'ajout du polystyrène au béton a une influence sur la résistance à la flexion moindre que sur la résistance à la compression.

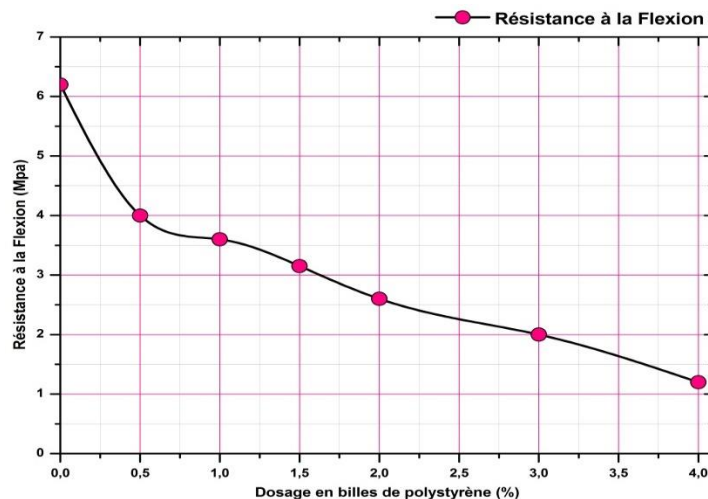


Figure 1.20. Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage du polystyrène [39].

e) Propriétés électriques et thermiques

Les polymères styréniques possèdent de bonnes propriétés d'isolation électrique. Ils peuvent recevoir des additifs pour devenir antistatiques ou conducteurs. Ils conduisent faiblement la chaleur [40].

Une des propriétés intéressantes des bétons légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Les bétons de polystyrène expansés ont une bonne isolation thermique, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20, pour des densités de 400 kg/m³ et 0,30 pour des densités de 800 kg/m³ [35].

La demande d'une isolation adaptée s'est considérablement accrue. En effet une bonne isolation thermique est économiquement rentable et les économies d'énergie sont devenues une préoccupation majeure des architectes, des concepteurs et des constructeurs.

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 [41].

Les recherches réalisées [36] ont montrées que l'évolution de la conductivité thermique du béton de polystyrène décroît avec l'augmentation des perles de polystyrène dans le béton comme l'indique la **Figure 1.21**

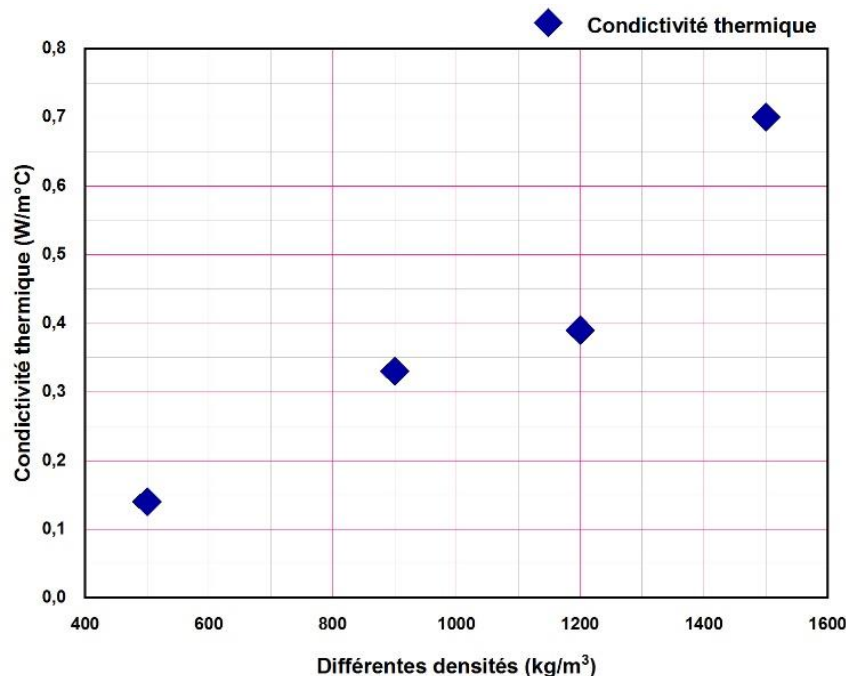


Figure 1.21. Conductivité thermique en fonction de différentes masses [36].

f) Comportement au feu

Les polymères styréniques sont facilement combustibles et dégagent une odeur sucrée. Lors d'une combustion, ils se décomposent vers 300 °C en formant du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau, mais les combustions incomplètes ajoutent de l'oxyde de carbone (CO). Puisque toutes les combustions ouvertes utilisent l'air contenant 78 % d'azote en plus de l'oxygène, des oxydes d'azote sont toujours présents. Pour améliorer leur tenue au feu, des additifs ignifugeants sont ajoutés pour certaines applications [42]. La combustion ajoutera alors les produits de décomposition de ces ignifugeants.

Les propriétés du béton contenant des billes de polystyrène sont regroupées et présentées dans le **Tableau 1.6 [11]**.

Tableau 1.6. Propriétés du béton léger à base de billes de polystyrène [11].

	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)	Rt (MPa)	E (GPa)	Retrait ϵ (m/m)	Dilatation (mm/m°C)	λ (Kcal/mh°C)
PSE	300 à 1000	1 à 10	0,3 à 1,5	2	1 à 2	$10 \cdot 10^{-6}$	0,05 à 0,25

1.5.4 Granulats de Plastique

1.5.4.1 Recyclage du plastique

Ces granulats sont produits à partir de déchets de sacs en plastique servant à être utilisés par la suite pour la fabrication de différents types d'emballage et sacs en plastique. Le traitement thermique consiste à l'homogénéisation des différents déchets plastiques en une feuille de plastique, qui sera transformé par la suite en fibres minces. Ces fibres seront découpées en granulats manuellement ou automatiquement **Figure 1.22** d'où des photos **Figure 1.23** ont été prises au sein de l'usine de recyclage qui se situe à Kolea - Tipaza. Les granulas en plastique recyclées ont généralement des diamètres de 3 à 4 mm et une densité de l'ordre de 0,9 g/cm³.

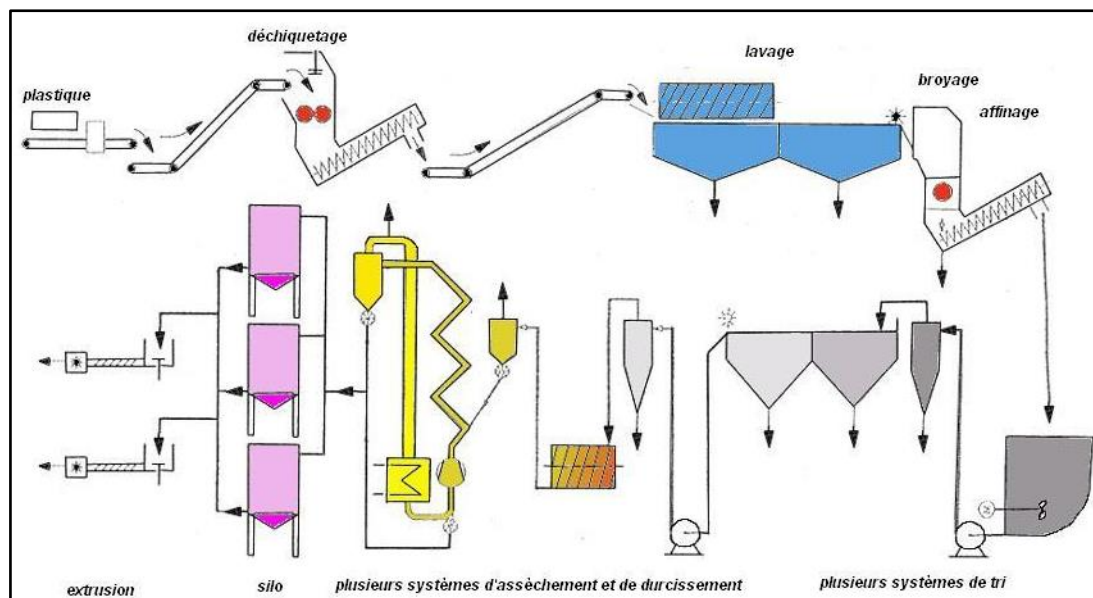


Figure 1.22. Schéma du recyclage du plastique [103].



Vue sur le lieu de fabrication des grains



Machine de découpages du plastique

Figure 1.23. Photos prise au niveau de l'usine de recyclage de plastique

1.5.4.2 Caractéristiques physico mécaniques et thermique du béton de plastique

Selon une documentation à la littérature qui se base sur les propriétés du béton confectionné avec des granulats de plastique et vu que ce dernier a un succès dans le bâtiment, comme dans les autres secteurs de l'industrie, cela s'explique par leurs propriétés spécifiques, dont les plus importantes sont :

- Une faible masse volumique, permettant une manipulation aisée et une construction légère ;
- Une bonne ténacité et une excellente résistance au choc pour certains types, comme le PE, le PC et le PVC plastifié ;
- Une résistance chimique exceptionnelle, même dans des milieux extrêmement corrosifs ;
- Une isolation électrique excellente ;
- Une faible conductivité thermique, encore améliorée si la matière plastique est moussée.

Les limites les plus fréquentes posées à l'usage de certaines matières plastiques sont :

- Une rigidité et une résistance mécanique moins élevées, le fluage, l'instabilité dimensionnelle à haute température, le vieillissement ou la dégradation sous l'influence de la radiation solaire.
- **Le comportement au feu** : toutes les matières plastiques peuvent brûler vu leur structure organique, ce comportement au feu est un phénomène extrêmement complexe qui nécessite plusieurs critères d'évaluation : l'inflammabilité, la vitesse de propagation, le contenu calorifique, la formation éventuelle de gouttes brûlantes, l'opacité des fumées, leur toxicité et leur corrosivité.

Des recherches visent principalement à valider l'influence d'une substitution du granulat fin par une matière plastique et d'en vérifier l'incidence sur les propriétés du béton durci. Dans l'ensemble, une substitution de 20% du sable par des matières plastiques améliore la résistance à la flexion du béton d'un facteur de 4 à 5 comparativement au béton de contrôle et d'un facteur 8 lorsque ce pourcentage passe à 40 % [43]. L'incorporation de matières plastiques s'est toutefois révélée néfaste quant à la résistance à la compression. Cette diminution de la résistance peut être attribuée, d'une part, à la diminution de la masse volumique et, d'autre part, à la faible rigidité des matières plastiques (module d'élasticité inférieur à 1GPa). Cependant, si l'on considère la baisse de résistance du béton en relation avec la diminution de sa masse volumique, on constate une légère augmentation de la résistance spécifique de ce béton [24].

a) Maniabilité

Le béton de déchets plastiques est peu compact par rapport au béton naturel et présente une difficulté de mélange et de mise en œuvre en fonction du pourcentage et du type d'ajout en déchets plastiques (grains ou fibres) [44] comme il est clair dans la **Figure 1.24** et ceci confirme les résultats d'autres chercheurs [44], [45].

Même selon l'étude menée par **M. Guendouz** et ses alliés [46] qui ont trouvé que les déchets fins de plastique contribuent à l'amélioration de la maniabilité du béton tandis que ceux en forme de fibres influent négativement sur elle.

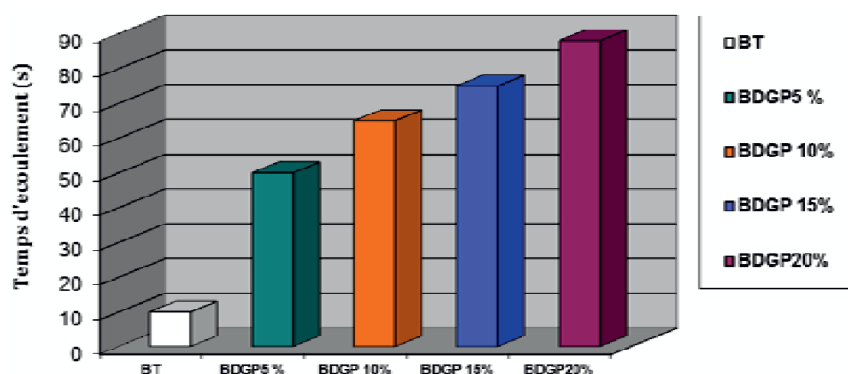


Figure 1.24. Temps d'écoulement des bétons de grains de plastiques [46].

L'ouvrabilité de béton avec ajout de déchet de plastique est meilleure par rapport au béton de référence. On constate aussi que l'augmentation de dosage en fibres métalliques fait décroître l'ouvrabilité de béton [47].

b) Masse Volumique

D'après des études de caractérisations physique et mécanique d'un matériau à base de granulats enrobés de sachets plastiques fondus dont les résultats ont montré que ces micros bétons contenant ce type de gravillons présentent des masses volumiques plus faibles que celles du micro béton témoin. Ces paramètres diminuent au fur et à mesure que le taux de granulats enrobés augmente. Comparativement au béton de référence, il a été observé une diminution allant jusqu'à 5,97% de la masse volumique [47]. La densité du béton de sable est diminuée en fonction de substitution de sable par la poudre de plastique, et d'ajout des fibres plastiques [46].

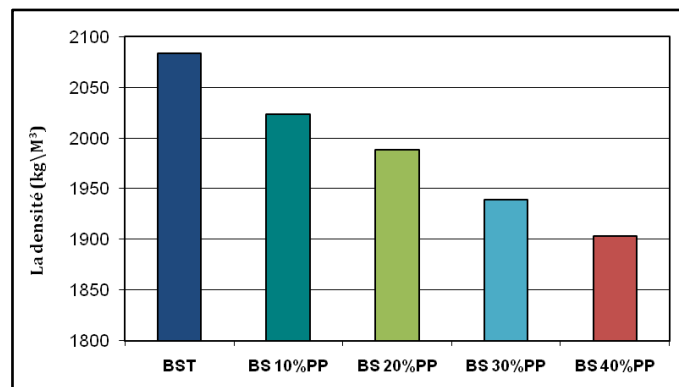


Figure 1.25. Masse volumique des bétons de poudre de plastiques [46].

c) Comportement mécanique

A travers des études antérieures qui ont montré qu'une diminution de la résistance mécanique en fonction de l'augmentation de pourcentage de déchet de plastique mais qui reste toujours proche du mortier de référence, où il a été enregistré une chute de résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 18 et 23% pour les mortiers contenant respectivement 10 et 20 % de déchets [47].

Les résultats ont montré que les micros bétons contenant les gravillons enrobés de sachets plastiques fondus présentent des masses volumiques et des résistances mécaniques plus faibles que celles du micro béton témoin. Ces paramètres diminuent au fur et à mesure que le taux de granulats enrobés augmente les résistances en compression et en traction par fendage ont chuté respectivement de 39,61% et 32,24% pour un taux de 75% de sachet plastique [47], [48].

Le béton à base de déchets de plastiques (surtout en forme ondulée) résiste mieux à la flexion par la traction en comparaison au béton naturel. Même ceux à base de poudre en plastique améliore les performances des bétons de sable. Les fibres plastiques

contribuent à l'amélioration de la résistance à la traction du béton de sable [44]. Et cela et aussi en accord avec **M. Guendouz** et ses alliés [46] qui ont trouvé que la poudre en plastique améliore les performances mécaniques des bétons comme illustré aux **Figure 1.26** et **Figure 1.27**.

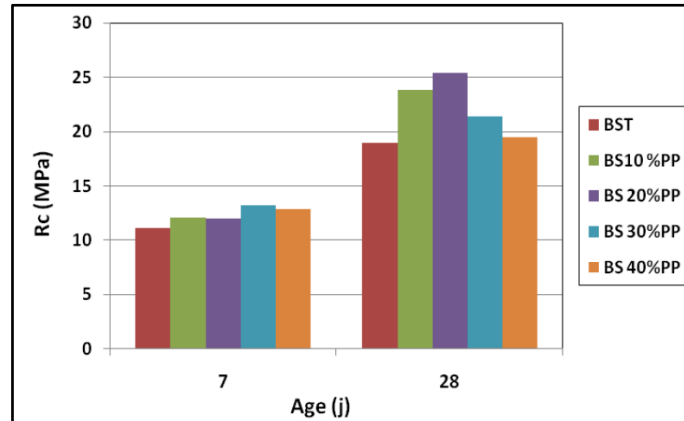


Figure 1.26. Résistance à la compression en fonction d'ajout de poudre plastique [46].

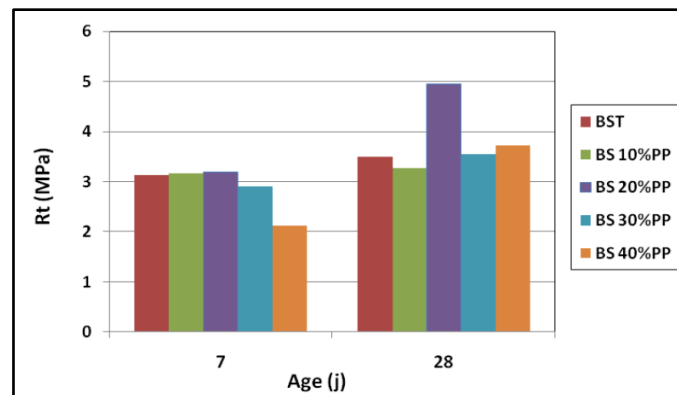


Figure 1.27. Résistance à la traction en fonction d'ajout de poudre plastique [46].

1.6 Synthèse du chapitre

L'utilisation des matériaux recyclés dans le domaine de la construction en générale et dans les bétons en particulier favorise d'une part, la récupération des déchets en circulation et d'autre part, la protection de l'environnement et la minimisation de la pollution et cela dans le cadre du développement durable.

Le béton constitue donc un bon matériau pour la récupération vue qu'il ne dispose pas d'incompatibilité avec les matériaux incorporés (granulats recyclés) lors de sa fabrication, le béton produit classé dans la gamme des bétons légers pourrait être utilisé pour fabriquer une multitude de produits de consommation dans le domaine de la construction et même redonner une seconde vie à ces déchets qui en les valorisant redeviennent des granulats légers artificielles avec des avantages dus à leurs performances physico-mécanique et thermiques sans avoir à utiliser les granulats naturels.

L'étude bibliographique nous a permis de situer l'utilisation des bétons de granulats légers dans le domaine de construction et la mise en œuvre du recours à la valorisation des déchets industriels pour les utiliser dans l'élaboration des bétons ou de mortiers légers dans l'objectif d'isolation thermique des locaux

Cette recherche nous a permis aussi de revoir les différents travaux de recherche réalisés sur les composites à base de granulats légers en générale et les composites à base de granulats de plastique et de polystyrène en particulier afin de situer notre travail et de faire ressortir son originalité et son apport dans le domaine de construction.

A travers cette partie de ce mémoire nous avons pu voir que les caractéristiques physico-mécaniques et thermique des composites à base de granulats légers sont étroitement dépendantes de celles des granulats. Une remarque est pratiquement observée pour tous ces composites est que l'incorporation de granulats légers fait diminuer leur densité d'autant plus que les granulats sont légers, l'apport des granulats légers est très remarquable en matière d'isolation. En revanche on signale des chutes parfois considérables des résistances mécaniques.

Chapitre 2 . Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Dans le but de l'élaboration d'un micro-béton léger et de l'exploitation des déchets de polymères (plastique & polystyrène) dans le domaine de la construction, spécialement le domaine des matériaux en génie civil, nos produits de départ choisis pour la confection des composites sont :

- Plastique (polyéthylène à basse densité) ;
- Polystyrène traité ;
- Sable alluvionnaire ;
- Ciment, adjuvant et eau.

Le choix des matériaux pour cette application expérimentale exige une connaissance et une maîtrise de leurs caractéristiques physico-mécaniques.

C'est ce dont nous allons parler dans ce chapitre, les montages expérimentaux utilisés pour la réalisation du matériau seront présentés, d'où notre étude a pour objectif principal l'élaboration d'un micro-béton léger isolant à base de granulats issu du recyclage de co-produits industriels, billes de polystyrène traité et granulats de plastique, ces derniers sont substitués dans la matrice globale du composite.

Le travail expérimental vise l'étude de l'influence d'ajout de granulats léger sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du matériau composite élaboré. Pour cela, des systèmes de différents pourcentages de substitution de 25, 50 et 75% de la matrice composé de ciment, sable alluvionnaire, eau et superplastifiant ont été choisis en faisant varier les dosages en plastique et en polystyrène à de différents pourcentages.

Commençant par les essais de caractérisation en premier lieu afin d'entamer ensuite la partie confection des composites pour qu'au finale parler des techniques et des essais expérimentaux effectuées une fois le produit fini.

Notons que les essais ont été fait au sein du laboratoire de génie civil de l'université Ammar Thelidji- Laghouat.

2.2 Caractérisation des matières premières

2.2.1 Granulats

2.2.1.1 Sable alluvionnaire

Le sable utilisé dans cette étude est un sable alluvionnaire ramené de la région de Laghouat de lit d'oued M'zi.

Ses caractéristiques physiques sont représentées ci-dessous :

a) Analyse granulométrique

L'essai de l'analyse granulométrique est l'un des essais les plus importants effectués sur les matériaux granulaires puisque la notion même de sable est basée sur un critère de taille des éléments. L'essai est réalisé selon la norme **NF P 94-056** [49] dont les tamis utilisés sont conformes à la norme **EN 933-2** [50] présenté dans la **Figure 2.2** dans le but de classer et définir la granulométrie des matériaux employés dans la confection du composite selon la forme des grains, leur grosseur et la forme de la courbe granulométrique.

Cette répartition de grains de sable est traduite par une courbe granulométrique qui est représentées dans la **Figure 2.1** ci-dessous.

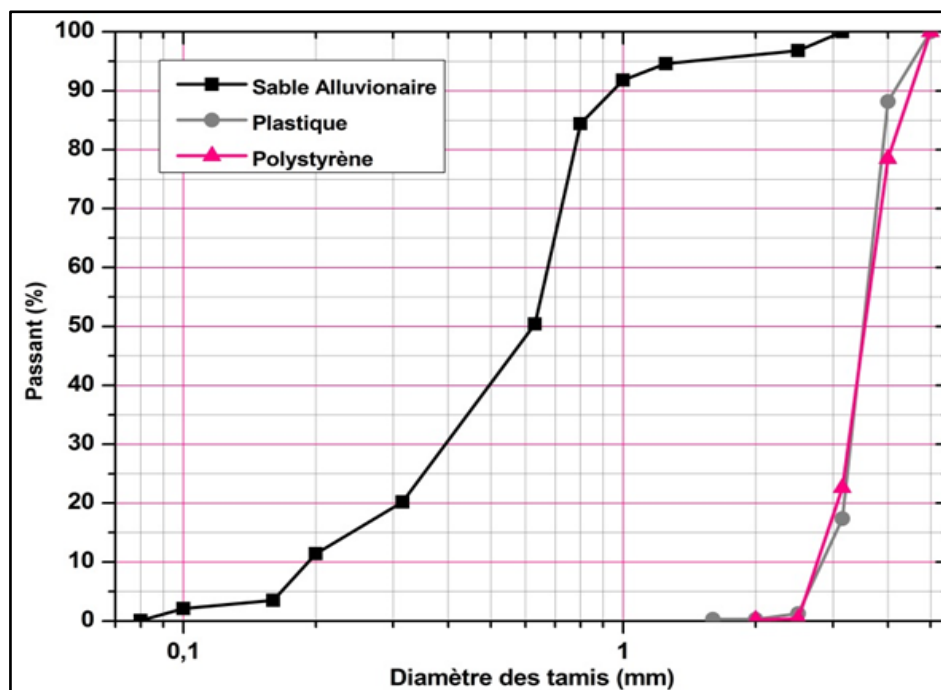


Figure 2.1. Courbe granulométrique des granulats utilisés.



Figure 2.2. Photo du tamiseur de l'essai granulométrique.

La courbe granulométrique du sable alluvionnaire montre que notre sable a une granularité continue (étalée) sur l'intervalle 0/3.

b) Module de finesse

La courbe granulométrique nous permet d'identifier la finesse de notre sablé grâce au module de finesse et cela est fait selon la norme **NF P 18-360 [51]** qui est noté M_f donné par la formule suivante :

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulée en \% pondéral des tamis (0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.5; 5)}}{100} = 2,345$$

D'après la valeur du module de finesse, il s'agit d'un sable référentiel moyennement grossier.

Ont conclu que notre sable alluvionnaire est de classe granulaire 0/3 qui présente une granularité étalée **Figure 2.1** et un taux de fines assez faible d'une valeur de 2%.

c) Essai d'équivalent de sable (propreté du sable)

L'essai de l'équivalent de sable est réalisé selon la norme **EN 933-8 [52] / NF P 18-598 [54]**, utilisé de manière courante qui consiste à donner une indication sur l'importance des impuretés (argile, poussière, matière organique, ...etc.) contenues dans le sable pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons car en cas de leur présence, cela influe négativement sur l'adhérence du ciment avec les grains de sable.

L'essai consiste à séparer les particules contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers comme illustré dans les **Figure 2.3** et **Figure 2.4**. Une procédure normalisée

permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci [55].

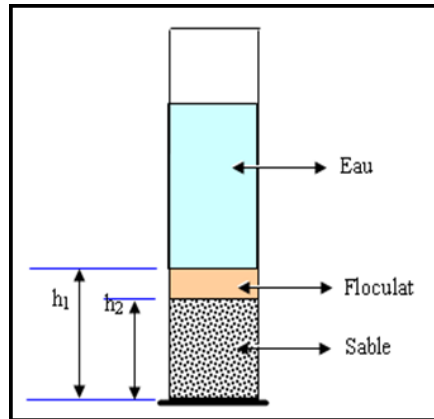


Figure 2.3. Schématisation de l'essai de l'équivalent de sable.



Agitateur normalisé



Echantillon en repos



Figure 2.4. Dispositifs d'essai de l'équivalent de sable.

En se basant sur les valeurs du **Tableau 2.1** indiquant les natures et qualités du sable selon l'équivalent de sable et si l'on se réfère aux valeurs de l'équivalent de sable préconisés [35] pour les sables à béton traditionnel, un équivalent de sable élevé indique que nous sommes en présence des sables très propres, avec une absence presque totale de fines particules argileuse. On constate donc que notre sable est un sable très propre contenant un faible pourcentage de fines argileuses, risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

Tableau 2.1. La nature et qualité du sable.

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

d) Masse volumique absolue et apparente

Les essais sont réalisés selon la norme **NF P 18-555** [56] et les résultats sont exprimés en Kg/m³.

La masse volumique **absolue** est la masse par unité de la matière qui constitue l'agrégat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_{\text{abs}}} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.1}$$

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

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V_{\text{app}}} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.2}$$

Les méthodes utilisées sont :

- Masse volumique **apparente** : Le récipient de 1L, **Figure 2.6**

- Masse volumique **absolue** : on utilise la méthode de pycnomètre. Il s'agit d'un récipient de 1000 cm³ comportant un bouchon rodé muni d'un tube très fin sur lequel est gradué un trait de repère, **Figure 2.5**



Figure 2.5. Mesure de la masse volumique absolue au pycnomètre



Figure 2.6. Mesure de la masse volumique apparente

e) Compacité et porosité

L'essai est réalisé selon la norme **NF P 18-555 [56]**. La compacité (C_p) est le rapport du volume de la matière pleine au volume total.

$$C_p = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - n \quad \text{.....Équation 2.3}$$

$$C_p = \frac{V_{abs}}{V} = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad \text{.....Équation 2.4}$$

D'où :

V_v : Volume des vides

V : Volume total apparent

n : Porosité.

f) Coefficient d'absorption

L'essai est réalisé selon la norme **NF P 18-555 [56]** comme présenté dans la **Figure 2.7**. On en déduit le coefficient d'absorption (en pourcentage de la masse sèche) après immersion pendant 24h (**WA₂₄**).

$$WA_{24} = 100 \frac{M_1 - M_2}{M_2} \quad \text{.....Équation 2-5}$$

M_1 : Granulat avec l'eau retenue dans leurs pores.

M_2 : Granulats après étuvage jusqu'à obtenir une masse constante.



Figure 2.7. Photo du kit de l'essai d'absorption

g) Synthèse des résultats des caractéristiques physiques du sable alluvionnaire et les déchets utilisés

Le **Tableau 2.2** regroupe l'ensemble des résultats des essais physiques effectués sur les différents granulats utilisés.

Tableau 2.2. Les caractéristiques physiques des granulats utilisé.

Essais	Normes	Sable	Plastique	Polystyrène
Masse volumique apparente ρ_{app} (kg/m ³)	NF P 18-555	1501,75	526,8	27,16
Masse volumique absolue ρ_{abs} (kg/m ³)		2654,88	906,54	43,32
Equivalent de sable visuel ESv (%)	NF P 18-598	93,47	**	**
Equivalent de sable à piston ESp (%)	NF P 18-598	92,09	**	**
Module de finesse (Mf)	NF P 18-360	2,345	**	**
Compacité (Cp)	NF P 18-555	0,566	0,581	0,627
Porosité (P)	NF P 18-555	0,434	0,419	0,373
Coefficient d'absorption Abs (%)	NF P 18-555	0,99	0	77,37

D'après les valeurs des caractéristiques physiques du sable, Les résultats obtenus montrent que le sable alluvionnaire utilisé est un sable dense et compact ce qui va donner probablement un béton ou un mortier avec des performances mécaniques meilleurs. D'après la courbe granulométrique et le module de finesse il s'agit bien d'un sable référentiel. La **Figure 2.8** montre la morphologie (forme) des grains du sable utilisé.

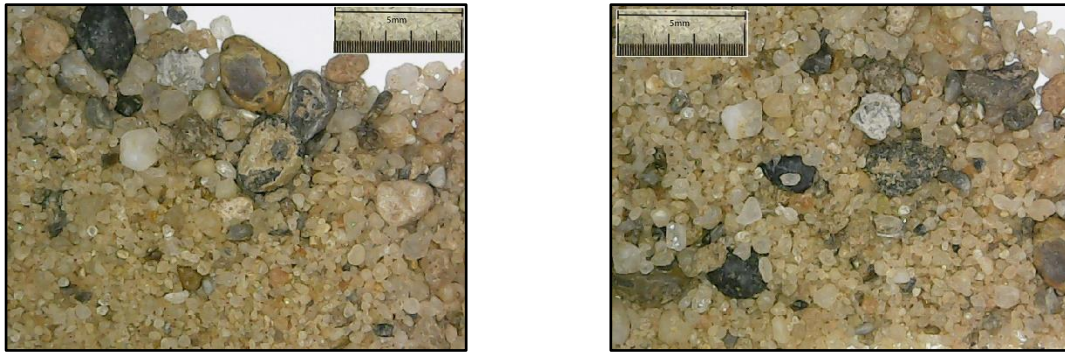


Figure 2.8. Morphologie du sable observé par microscope optique.

2.2.1.2 Granulats de plastique

Le plastique utilisé dans cette étude est un polyéthylène issu du recyclage des films de paillage utilisés en agriculture ainsi que toute sorte de sac en plastique, produit par des usines de recyclage et commercialisés sous forme de billes coupés d'une granularité serrée **Figure 2.1**. Ces billes de plastique sont classées de basse densité et présentant une absorption nulle **Tableau 2.2**.

Obtenue par plasturgie du polypropylène, la plasturgie est l'ensemble des procédés de transformation des matières plastiques (polymère). Avant la transformation la matière plastique doit être portée à température suffisante afin de réduire sa viscosité à l'état liquide (au-dessus de la température de transition vitreuse pour les polymères amorphes et au-dessus de la température de fusion pour les polymères semi cristallins).

Pour obtenir la matière première à l'état des granulés, les procédés sont :

- Injection
- Extrusion
- Co extrusion
- Extrusion-soufflage [57]

a) Analyse granulométrique

L'essai a été fait selon la norme **EN 933-1** [58] et les tamis utilisés sont conforme à la norme **EN 933-2** [59] **Figure 2.9** dont ces résultats sont représentés par la courbe granulométrique **Figure 2.1**.



Figure 2.9. Tamis utilisés lors de l'essai granulométrique du plastique et polystyrène

b) Masse volumique apparente et absolue

L'essai a été fait selon la norme **NF P 18-555 [56]**, la mesure de la masse volumique fut assez compliquée vu que le plastique flotte en présence de l'eau **Figure 2.10** et les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.2**.



Figure 2.10. Photo du dispositif de mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre

c) Coefficient d'absorption

L'essai de mesure du coefficient d'absorption a été fait selon la norme **NF P 18-555 [56]** d'où les photos sont illustrées dans les **Figure 2.11** et **Figure 2.12** et les résultats sont présentés dans le **Tableau 2.2**.



Figure 2.11. Immersion du plastique dans l'eau pendant 24h



Figure 2.12. Etuvage du plastique jusqu'à l'évaporation totale de l'eau

D'après les valeurs des caractéristiques physiques du plastique, on constate qu'il est d'une granulométrie assez étalée, dont ses grains sont de formes variables et d'une nature hydrophobe.

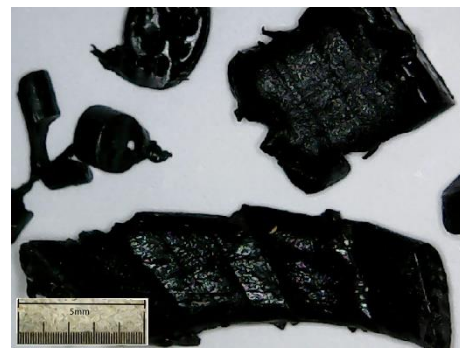
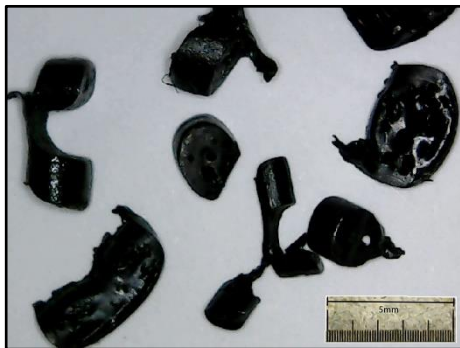


Figure 2-13. Morphologie des granulats de plastique vue par microscope optique.

2.2.1.3 Billes de polystyrène traité

Ce sont des granulats artificiels, les échantillons se présentent sous forme de billes parfaitement sphériques, l'enveloppe extérieure de ces perles est lisse selon la fiche technique du produit, les bille de polystyrène on étaient traité ce qui les rend hydrophobes, elles demeurent donc imperméables, même sous forte pression d'eau [60]

a) Analyse granulométrique

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

La granulométrie est de classe 1/2,5 dont les résultats de l'analyse granulométrique des granulats de polystyrène sont illustrés sur la courbe granulométrique de la **Figure 2.1**.

b) *Masse volumique du Polystyrène*

L'essai a été fait selon la norme **NF P 18-555 [56]**, la mesure de sa masse volumique fut aussi assez compliquée vu que le polystyrène flotte en présence de l'eau **Figure 2.14**. La nature du polymère, la teneur en agent porogène et la présence de certains adjuvants permettent d'obtenir des produits ayant des masses volumiques variables : entre 8 et 40 kg/m³ **[61]**.

Les propriétés des billes de polystyrènes sont reportées sur le **Tableau 2.2**.



Figure 2.14. Mesure de la masse volumique absolue par pycnomètre.

Des observations faites par microscope optique montrant la macrostructure des billes de polystyrène **Figure 2.15** ainsi que l'aspect de la matière vu de l'intérieur **Figure 2.16**.



Figure 2.15. Morphologie des billes de polystyrène observé par microscope optique.



Figure 2.16. Morphologie des billes de polystyrène coupées observé par microscope optique.

2.2.2 Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé dont la dénomination est CPJ-CEM II/B 42,5N selon la fiche technique de qualité, il est conforme la norme Algérienne **NA 442**, le ciment (MATIN) confectionné et mis en sac de 50kg, provenant de la cimenterie de Hamame Dhalade M'sila par la cimenterie ACC « Algerian Cement Company » et procédant toutes les capacités liantes et répondant à la normalisation Algérienne. Sa composition chimique respecte bien les normes recommandées pour ce genre de ciment.

- Masse volumique apparente **1128,6 kg/m³**
- Masse volumique absolue **3050 kg/m³**

Les caractéristiques chimiques et physiques d'après la fiche technique de ce ciment utilisé sont résumées dans les **Tableau 2.3-Tableau 2.6** ci-dessous :

Tableau 2.3. Caractéristiques chimiques du ciment [104].

Propriétés chimiques exprimé en (%)				
SiO₂	CaO	Al₂O₃	Fe₂O₃	K₂O
17,49	62,78	04,51	03,02	00,64
Na₂O	SO₃	MgO	Chlorures	Perte au feu
00,05	2,5±0,5	1,7±0,5	0,02-0,05	10,00±2

Tableau 2.4. Caractéristiques physiques du ciment [104].

Propriétés physiques	Valeurs
Consistance normale de la pâte de ciment	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de blaine	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en $\mu\text{m}/\text{m}$	< 1000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Tableau 2.5. Temps de prise du ciment [104].

Temps de prise à 20°C	Valeurs
Début de prise (min)	140 – 195
Fin de prise (min)	195 – 290

Tableau 2.6. Résistance mécanique du ciment [104].

Résistance à la compression	Valeurs
2 jours (MPa)	$\geq 10,0$
28 jours (MPa)	$\geq 42,5$

2.2.3 Eau de gâchage

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

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des substances qui pourraient avoir un effet négatif appréciable sur la qualité et la durabilité du mortier ou du béton.

L'eau utilisée pour la totalité de nos essais est une eau courante du réseau du laboratoire de département de génie civil de Laghouat, sans aucun traitement supplémentaire.

Le PH est voisin de 7,5 d'une température variante entre 12 et 17°C.

Les **Tableau 2.7** et **Tableau 2.8** ci-dessous représentent la présence des espèces chimiques exprimées en (mg/l) dans l'eau.

Tableau 2.7. Caractéristiques Chimique de l'eau : Analyse chimique de l'eau utilisée [A.D.E]

Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^{+2}	K^{+}
119,04	32,93	144,90	5,69
Cl^{-}	SO_4^{-2}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}
169,96	420	153,80	11,07

Tableau 2.8. Composition chimique de l'eau de gâchage [A.D.E]

Nature du point d'eau		Robinet	
Ca^{+2} en mg/ℓ	104	Balance cations m. éq/ℓ 17.81	5.20
Mg^{+2} en mg/ℓ	97		8
Na^{+} en mg/ℓ	102.3		4.45
K^{+} en mg/ℓ	646		0.14
Cl^{-} en mg/ℓ	148	Balance Anions m. éq/ℓ 16.74	4.17
SO_4^{-2} en mg/ℓ	520		10.82
HCO_3^{-} en mg/ℓ	94		/
NO_3^{-} en mg/ℓ	12.4		0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/ℓ	PH 7.70	Conductivité en 1/10 mm à 25°C 16.77	Dureté totale 43.25
Test chlore (mℓ d'eau de Javel à 15°/m ³) 0.96 mℓ/ℓ		T.A.C 7.8°F	S.A.F 75°F
MINERALISATION 1010.60	M.O milieu Acide en O ₂ 8.53	SiO ₂ 4.45 mg/ℓ	Somme des ions 1084 mg/l
Cations	$\text{Ca}^{+2} = 15\%$	$\text{Mg}^{+2} = 23.2\%$	$\text{Na}^{+} + \text{K}^{+} = 13.4\%$
Anions	$\text{HCO}_3^{-} = 4.5\%$	$\text{SO}_4^{-2} = 53.8\%$	$\text{Cl}^{-} + \text{NO}_3^{-} = 12.6\%$

2.2.4 Adjuvant

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui, incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5 % du poids de ciments, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés. Ils sont définis par la norme **EN 934-2 [55]**.

Le plastifiant est un produit qui améliore la plasticité d'un béton frais, sa stabilité (diminution du risque de ségrégation), et donc son ouvrabilité. Il peut être réducteur d'eau sans diminution du dosage en ciment **[62]**.

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau de type MEDAPLAST (SP40). Fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implanté à Oued Samar Alger. C'est une solution hydrosoluble de polynaphtalène sulfone (PNS), d'extrait sec 40 % (±1%), de couleur marron, d'une densité de 1,2± 0,01 et de PH 8.2.

L'utilisation du super plastifiant avait pour but principale l'amélioration de la maniabilité du matériau.

2.3 Formulation et élaboration du micro-béton léger (MBL)

La plupart des bétons légers, notamment les bétons légers de structure sont formulés de la même manière que les bétons classiques. Les critères recherchés dans les méthodes de formulation sont généralement la résistance et la maniabilité [55], [63-64] Par contre, pour les bétons légers de construction et d'isolation, un compromis entre la résistance et les performances physiques et thermiques doit être optimisé lors de la formulation, c'est le cas des micros bétons à base de plastique et de polystyrène élaborés dans ce travail.

2.3.1 Méthodes de formulation pratiquée

Afin d'élaborer au mieux notre micro béton et pour étudier l'influence du facteur granulats dans les compositions de nos composites, on a pris un dosage en ciment constant pour ne pas avoir son effet, car l'augmentation du dosage en ciment améliore la résistance en compression de façon conséquente et cela pourras fausser nos résultats par la suite.

Pour chaque type de béton on a choisi un mode de conservations : à l'air libre

Le choix des proportions de chacun des constituants du micro béton dépend des propriétés mécaniques et de la mise en œuvre souhaitée.

L'absence d'une formulation pour les micros bétons légers nous a conduit à suivre la méthode de substitution et l'adapter selon les spécificités de notre travail, nous avons donc procédé au développement d'un logiciel tableur Excel pour nous faciliter le calcul et avoir les proportions exactes de chaque constituant pour chaque mélange.

2.3.2 Elaboration des composites et techniques expérimentales

Ce travail consiste à étudier à l'état frais ainsi qu'à l'état durci les caractéristiques physico-mécaniques du micro-béton léger (MBL), A cet effet, des mélanges variables ont été réalisés et la méthode de formulation de ces derniers repose sur le principe de la substitution volumique de la matrice.

Cette méthode consiste à substituer un taux du volume de la matrice et de le remplacer par un volume égal de granulats légers à des proportions 25, 50 et 75%. Ce volume est de son côté aussi divisé en deux pourcentages permutant entre le plastique et le polystyrène par les proportions suivantes : 0, 25, 50, 75 et 100%.

La substitution se fait en rapport volumique tout en gardant les rapports constants (E/C, C/S, % SP/C).

2.3.3 Notation des matrices et répartition des pourcentages de substitution

Pour gérer au mieux le travail expérimental sans avoir à se confondre entre les mélanges de différents taux de substitution, une notation des mélanges fut obligatoire.

Au cours de ce travail et pour cette formulation nous avons trois groupes de matrices :

- **Système 1** : 25% de substitution par les grains de plastiques et les billes de polystyrène, Noté **M25**
- **Système 2** : 50% de substitution par les grains de plastiques et les billes de polystyrène, Noté **M50**
- **Système 3** : 75% de substitution par les grains de plastiques et les billes de polystyrène, Noté **M75**

Le **Tableau 2.9** ci-dessus représente un exemple de division des proportions des granulats légers dans le système au taux de substitution de 25% de la matrice (M25)

Proportion des granulats légers

Tableau 2.9. Proportion des granulats légers

Codification	Plastique (P)	Polystyrène (Y)
Témoin	0%	0%
M25P0Y100	0%	100%
M25P25Y75	25%	75%
M25P50Y50	50%	50%
M25P75Y25	75%	25%
M25P100Y0	100%	0%

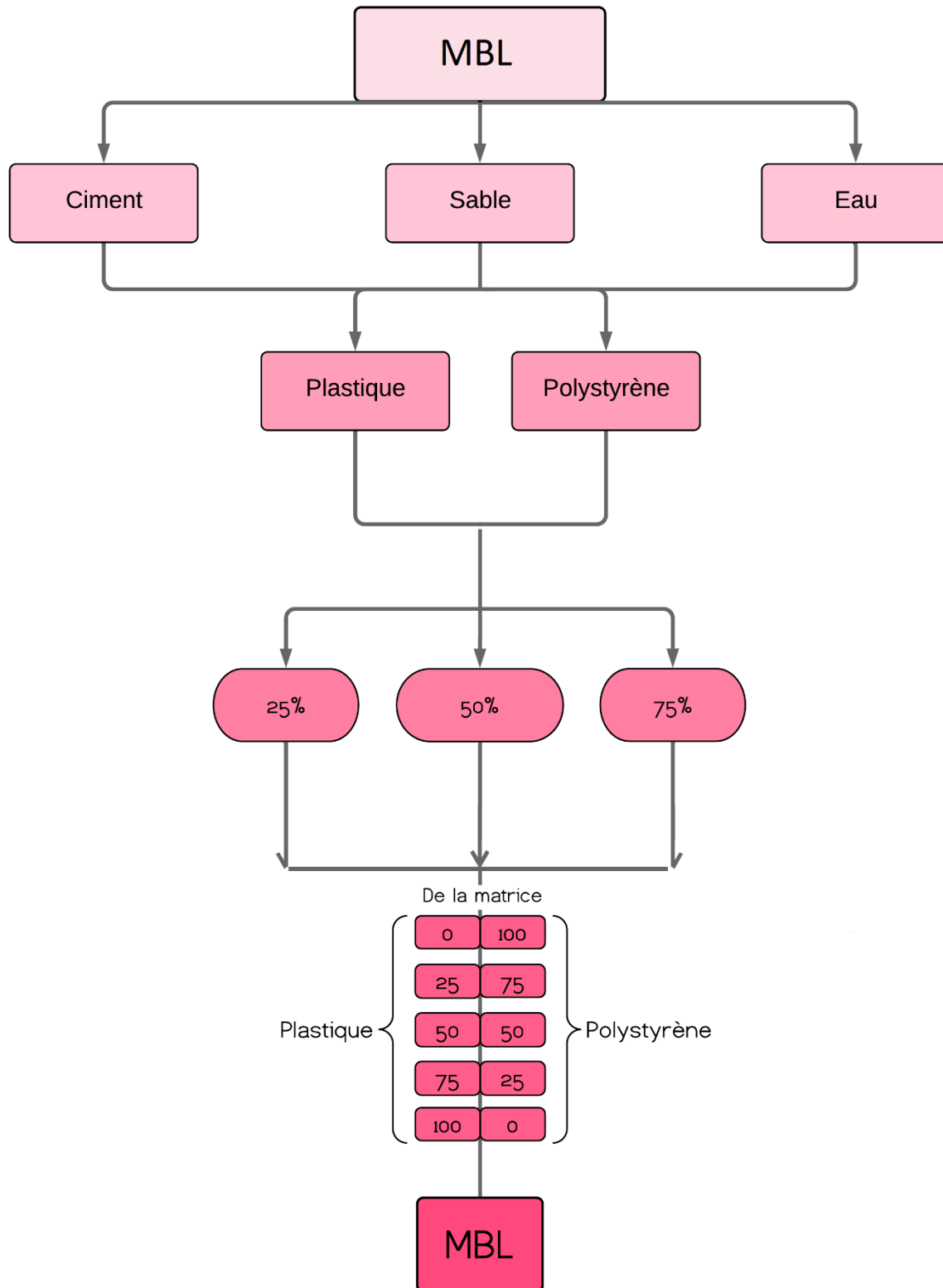


Figure 2.17. Organigramme de répartition des dosages des composites.

2.3.4 Dosage en ciment

La confection du micro béton léger consiste à définir la composition du mélange optimal des différents constituants dont on dispose, ainsi que le dosage en eau et les agrégats.

Comme il a été cité auparavant pour l'élaboration d'un micro béton témoin, nous avons choisi un rapport $C/S = \frac{1}{3}$, ce dosage sera fixé pour tous les mélanges élaborés selon Ziregue [1].

2.3.5 Composition des MBL à base de granulats de plastique et de polystyrène

Les **Tableau 2.10**, **Tableau 2.11** et **Tableau 2.12** suivant représentent les différents dosages pondéraux **Figure 2.18** et **Figure 2.19** exprimés en kg, pour la composition d'un m³ de micro béton à base de granulats légers aux trois différents systèmes (l'air occlus n'a pas était pris en considération).

Tableau 2.10. Composition d'un m³ de MBL- M25.

	E/C	C/S	SP/C (%)	Sable	Ciment	Eau	Plastique	Polystyrène	SP
Témoin	0,525	$\frac{1}{3}$	0	1508,81	502,94	278,98	0	0	0
P0Y100			1	1289,03	429,68	243,08	0,00	6,12	4,30
P25Y75							32,04	4,59	4,30
P50Y50							64,08	3,06	4,30
P75Y25							96,12	1,53	4,30
P100Y0							128,16	0,00	4,30

Tableau 2.11. Composition d'un m³ de MBL- M50.

	E/C	C/S	SP/C (%)	Sable	Ciment	Eau	Plastique	Polystyrène	SP
Témoin	0,525	$\frac{1}{3}$	0	1508,81	502,94	278,98	0	0	0
P0Y100			2	1073,54	357,85	203,56	0,00	12,19	7,16
P25Y75							63,76	9,14	7,16
P50Y50							127,52	6,09	7,16
P75Y25							191,28	3,05	7,16
P100Y0							255,03	0,00	7,16

Tableau 2.12. Composition d'un m³ de MBL- M75.

	E/C	C/S	SP/C (%)	Sable	Ciment	Eau	Plastique	Polystyrène	SP
Témoin	0,525	1/3	0	1508,81	502,94	278,98	0	0	0
P0Y100			2,5	862,84	287,61	167,11	0,00	18,24	7,19
P25Y75							95,40	13,68	7,19
P50Y50							190,80	9,12	7,19
P75Y25							286,20	4,56	7,19
P100Y0							381,60	0,00	7,19



Figure 2.18. Proportions des constituants



Figure 2.19. Malaxeur utilisé.

2.3.6 Formulation du micro-béton témoin

Ce micro-béton est dépourvu de granulats, il est composé essentiellement de ciment, de sable et éventuellement de l'eau, confectionné afin de le mettre comme référence de base dans nos travaux expérimentaux.

2.3.7 Processus de malaxage et de mise en moule du micro béton

Nous avons adoptées pour les bétons de sable un malaxage normalisé selon la norme européenne EN 196-1 [65], [55] comme nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage, le mélange soit le plus homogène possible.

Les granulats légers sont introduits dans un malaxeur avec 70% de la quantité d'eau nécessaire pour le gâchage du mélange. Un malaxage est indispensable pour bien homogénéiser le mélange spécialement quand il y a les deux types de granulats ensemble afin d'éviter au polystyrène de flotter, Ces derniers sont alors mélangés pendant trente secondes à vitesse lente.

Le sable est ajouté progressivement pendant trente seconde, ainsi de suite pour le ciment suivi par la quantité d'eau de gâchage restante (30%) mélangé avec le super

plastifiant. L'homogénéisation du matériau est assurée par un malaxage à vitesse lente, un malaxage à vitesse rapide est requis pendant trente secondes en l'arrêtant après pendant une minute pour un raclage et un repos, le malaxage se poursuit pendant deux minutes et trente secondes.

Après des coups réguliers d'une force moyenne manuellement pour chacune des deux couches et la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'aire libre où la température variait entre 17 et $19^{\circ}\text{C} \pm 1$ et une humidité relative de $20 \pm 5\%$.

Au bout de 24 heures elles sont démoulées et conservées en ambiance sèche à la même température.

Les essais à l'état frais (faits directement après confection et avant la mise en moule) ainsi que ceux à l'état durcis (après durcissement à 7 et 28 jours) ont été réalisés et les résultats obtenus sont montrés dans la partie suivante.

2.4 Essais expérimentaux réalisés

Après analyse et caractérisations de toutes les matières premières utilisés pour l'élaboration de nos composites, nous présentons les principaux essais réalisés au sein du laboratoire sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques des micros-bétons légers à base de deux types de granulats (plastique et polystyrène).

2.4.1 Essais à l'état frais

Afin de voir en mieux le comportement de nos mélanges avec chaque composition à l'état frais et de les classer correctement, nous avons procédé à une série d'essais **Figure 2.20** réalisés suivant les normes directement après la confection.



Figure 2.20. Dispositifs des essais à l'état frais

2.4.1.1 Affaissement au mini Cône d'Abrams

L'essai de l'affaissement au mini cône d'Abrams a été fait selon la norme **NF EN 12350-2** [66] adapté à cette version, il a montré que les mélanges ont une consistance variable mais qui reste dans la gamme voulu avec l'utilisation du super plastifiant.

2.4.1.2 Masse volumique apparente

La masse volumique du béton frais, notée ρ_b est déterminée à partir de la composition expérimentale, après correction sur la composition théorique, leurs mesures ont été faite selon la norme **NF P 18-555** [56].

Elle est donnée par la relation suivante :

$$\rho_b = \frac{M - M'}{V} \text{ en (kg/m}^3\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.6}$$

D'où :

- M : masse du moule rempli de béton juste après la fin de malaxage.
- M' : masse du moule.
- V : volume du moule.

2.4.1.3 Essai d'écoulement au Maniabilimètre

Conformément à la norme **NF P 18-452** [67], l'essai de la maniabilité est utilisé pour déterminer l'homogénéité du béton par référence à sa maniabilité et sa plasticité. Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un Maniabilimètre à mortier LCL (type B) indiqué sur les **Figure 2.21** et **Figure 2.22**, il s'agit du temps mis par le matériau pour atteindre la hauteur repérée sous l'effet des vibrations qui sont instantanément déclenchées une fois la cloison est enlevée, par le trait dans le compartiment vide est mesuré à l'aide d'un chronomètre. Le temps t mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance.



Figure 2.21. Maniabilimètre B (180x90x90mm).

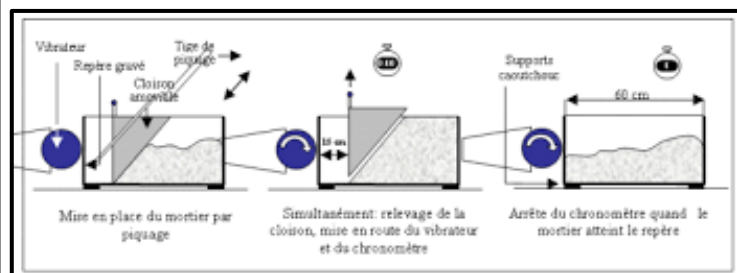


Figure 2.22. Schématisation du dispositif [105]

Le **Tableau 2.13** traduit que d'après la valeur du temps d'écoulement (t), on peut conclure que le micro béton est [68]:

Tableau 2.13. Type du béton en fonction de son temps d'écoulement

Ferme	$t \geq 40s$
Plastique	$20s < t \leq 30s$
Très plastique	$10s < t \leq 20s$
Fluide	$t \leq 10s$

2.4.2 Essais à l'état durci

Après durcissement à 7 et 28 jours, des essais physiques, mécaniques et thermiques ont été réalisés, cette procédure a pour but d'avoir une éventuelle indication pour l'identification des différentes caractéristiques des composites étudiés, les essais ont été réalisés suivant les normes indiquées.

2.4.2.1 Caractéristiques mécaniques

a) Essais de Résistance à la flexion (flexion 3 points)

L'essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm³ selon la norme **NF P. 18-407 [69]**, La machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 100 kN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/sec $\pm$ 10N/sec. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion, tel que celui schématisé dans les **Figure 2.23** et **Figure 2.24**.

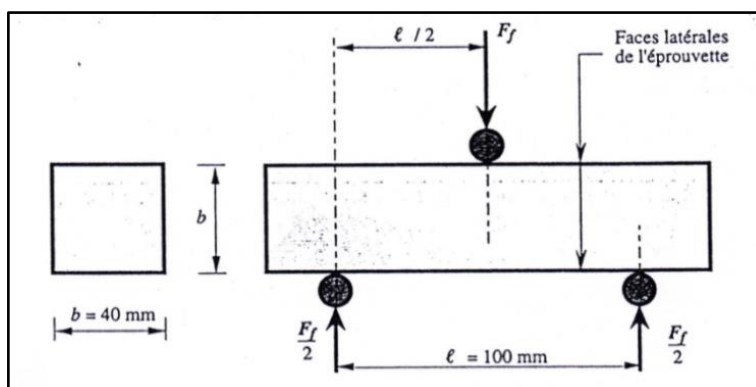


Figure 2.23. Schématisation du dispositif de flexion à 3 points.



Figure 2.24. Dispositif de flexion à 3 points.

La résistance à la flexion est calculée par la formule de la R.D.M suivant :

$$R_f = \frac{1.5 F_r L}{b^3} \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.7}$$

L : Distance entraxe des rouleaux d'appuis de l'éprouvette 40x40x160 mm³ (L= 100 mm)

R_f: Résistance à la flexion en MPa.

F_r: Charge à la rupture en N.

b: Largeur de la section carrée du prisme en mm (b = 40 mm).

b) Essais de Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression par écrasement ont été effectués sur des six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion conformément à la norme **NFP 18-406 [70]**.

L'écrasement des morceaux est fait sur une presse hydraulique de vitesse de chargement force 2400 N/s ± 200 N/s.

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

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2-8}$$

R_c : Résistance à la compression en MPa.

F_c : Charge à la rupture en N.

A: l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires en mm² (1600 mm²).

La **Figure 2.25** montre le dispositif de l'écrasement par compression :

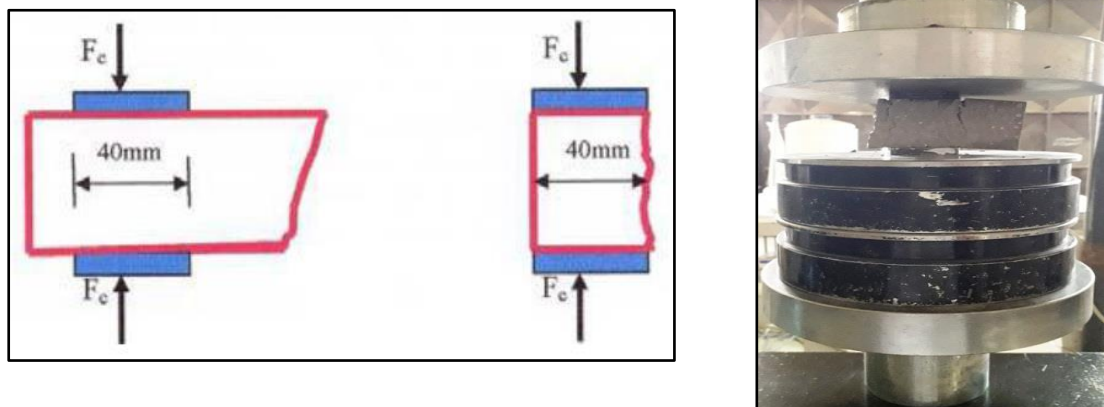


Figure 2.25. Principe de réalisation de l'essai de l'écrasement à la compression

2.4.2.2 Essai d'absorption capillaire

Le terme sorptivité et l'a défini comme une mesure de la capacité du milieu d'absorber ou de désorber un liquide par capillarité introduit par John Philip en 1957.

L'absorption d'eau est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du mortier durci, c'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Sa mesure est un outil de caractérisation macroscopique de son réseau poreux. C'est un paramètre important vis-à-vis de la durabilité des bétons, car un grand nombre d'agression telles que la carbonatation, l'attaque des sulfates et les acides, l'alcali-réaction, le gel-dégel, peuvent être minimisées si l'absorption d'eau du béton est faible.

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs, la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (la sorptivité) [71].

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Les éprouvettes seront préalablement conditionnées dans l'étuve environ 60°C jusqu'à une masse constante.

L'essai de la sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette 4x4x16cm³ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la **Figure 2.26** de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisée par un film plastique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps, le montage expérimental de l'essai d'absorption est clair dans la **Figure 2.27** selon la norme **NF EN 13057** [72].

Ce paramètre hydrique est déterminé en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'éprouvette 4x4x16 cm³ en fonction de la racine carrée du temps. Cette évolution est caractérisée en général par deux tronçons linéaires. Le premier, qui est caractérisé par une pente assez importante, est utilisé pour la détermination de la sorptivité du matériau [38].

La sorptivité est définie par l'équation suivante : $i = S_w \sqrt{t}$
Où S_w est la sorptivité du matériau et i est le volume d'eau absorbée par unité de surface [10].

Le taux d'absorption volumique par unité de surface i à un instant t donné est calculé en utilisant la formule suivante [38]:

$$i = \frac{M(t) - M(0)}{\rho_w \cdot A_{ab}} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.9}$$

$M(t)$: masse de l'échantillon humide à l'instant t

$M(0)$: masse initiale de l'échantillon à l'état sec

ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm³)

A_{ab} : Surface absorbante de l'échantillon (4x4 =16 cm²).

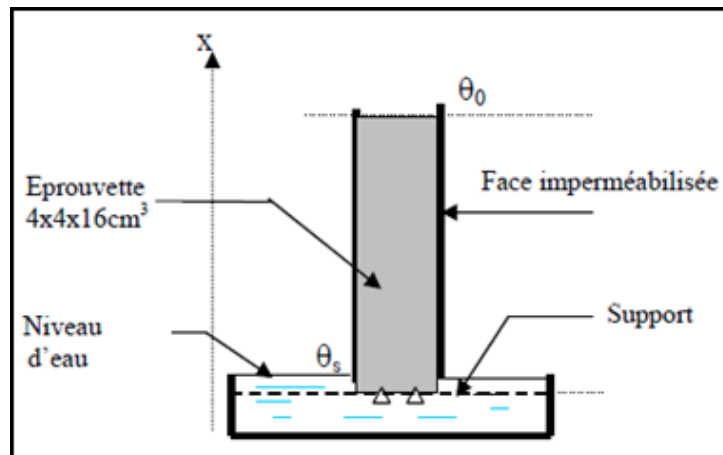


Figure 2.26. Schéma de l'essai de l'absorption par capillarité [73].

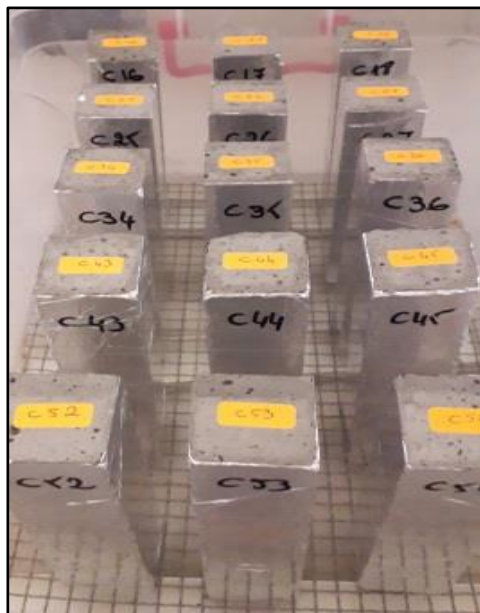


Figure 2.27. Montage expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption par capillarité

2.4.2.3 Caractéristiques physiques

a) Masse volumique

Les éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été pesées régulièrement au cours du temps et cela à l'aide d'une balance d'une précision de 0.1g, la **Figure 2.28** montre le procédé de mesure.



Figure 2.28. Prise de masse des éprouvettes

Les masses volumiques à l'âge de 28 jours sont mesurées lors de cette étude expérimentale

Notons qu'au taux de substitution le plus élevé 75%, la forme des éprouvettes n'était pas régulière avec une surface assez rugueuse qui peut nous fausser les valeurs des masses volumiques.

b) La porosité

La porosité est un paramètre très important à prendre en compte lors de l'étude de caractérisation d'un matériau poreux, elle influe sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons.

La taille des pores de dimensions variables dans un même matériau, influence en partie le caractère hygroscopique du matériau. Un autre phénomène qui dépend de la taille des pores, se traduit par la quantité d'eau liée présentée dans le matériau [74]

On peut différencier deux types de porosité :

- **La porosité ouverte** (ou libre) accessible à la pénétration du fluide (ensemble de pores reliés à l'extérieur).

- **La porosité fermée** (occluse) non accessible à la pénétration du fluide (celle qui n'est pas connecté avec l'extérieur).

La porosité totale est la somme de la porosité connectée ou ouverte et de la porosité fermée. **Figure 2.29** présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur : Les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins). Les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur. Les pores ou bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport [74].

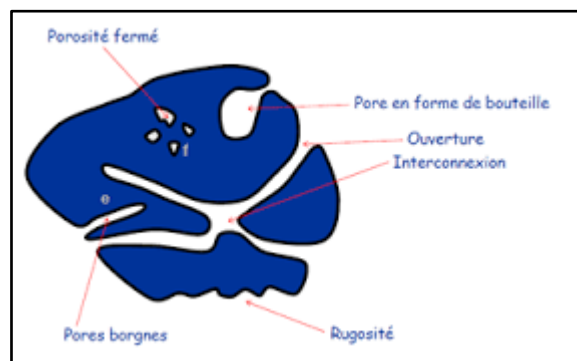


Figure 2.29. Trois types de porosité présente dans les matériaux (Connecté, Occluse et Piégée) [106].

La porosité totale (P totale) de béton provient de celle de la matrice et celle du granulat, elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction de volume des vides dans le matériau par rapport au volume total [75]. De plus la porosité totale ε est immédiate si on connaît la masse volumique apparente ρ_{app} et absolue ρ_{abs} de l'échantillon auquel on s'intéresse. En effet, on peut écrire la porosité :

$$P_T = \frac{V_v}{V_T} = \left[\frac{V_T - \frac{m_{sec}}{\rho_{abs}}}{V_T} \right] = \left[1 - \frac{m_{sec}}{\rho_{abs} V_T} \right] = \left[1 - \frac{\rho_{rel}}{\rho_{abs}} \right] = \left(\frac{\rho_{abs} - \rho_{rel}}{\rho_{abs}} \right) \quad \text{..... Équation 2.10}$$

c) La Porosité totale

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

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

Connaissant la masse volumique ρ_{abs} du solide obtenue, le calcul de la porosité totale ε est immédiat si l'on connaît, de plus, la masse volumique apparente ρ_{app} de l'échantillon auquel on s'intéresse [76]. En effet, on peut écrire :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.11}$$

D'autres techniques sont également utilisées pour accéder à la porosité utile des matériaux élaborés, il s'agit de l'immersion dans l'eau sous vide (technique de saturation totale : porosité accessible à l'eau) [38], [77].

– *Protocole d'essais de mesure de porosité adapté*

Les morceaux d'éprouvettes sont immergés dans de l'eau pendant 24h ou plus jusqu'à saturation complète et stabilisation de la masse, on pèse la masse saturée, le récipient de mesure de porosité est rempli d'eau au bec jusqu'à ce que l'eau s'arrête de couler, c'est là que les échantillons sont mis un par un tout en pesant la quantité d'eau qui sort du bec **Figure 2.30** et **Figure 2.31**, les échantillons sont alors mis dans l'étuve pour un séchage complet, une dernière prise de masse sèche est faite

Enfin la porosité est égale a :

$$P = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{V_{eau}} \quad \dots\dots\dots \text{Équation 2.12}$$

- m_{sat} : la masse de l'échantillon saturée (g).
- m_{sec} : la masse l'échantillon sec (g).
- V_{eau} : le volume de l'eau (g).



Figure 2.30. Immersion des échantillons dans l'eau jusqu'à saturation



Figure 2.31. Montage expérimentale utilisé dans l'essai de calcul de porosité

Remarque :

Cette méthode de mesure de porosité ne donne pas une valeur sûre et complète sur les pores compris dans la matrice mais seulement une indication approximative.

2.4.2.4 Caractéristiques thermiques

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique. Cette dernière est définie comme la quantité de chaleur qui traverse normalement pendant l'unité de temps l'unité de surface isotherme quand la température présente un écart de 1° sur l'unité de longueur de distance, Ceci dépend des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation (rôle de l'eau). Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau [78], [76].

Dans notre travail expérimental on a pu réaliser l'essai thermique permettant de calculer la conductivité thermique λ

De nombreuses méthodes et différents instruments de mesure ont été utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux.

La mesure utilisée dans notre cas est la méthode dite de la « sonde plane **TPS** (Transient Plane Source) » en raison de sa capacité de détermination de la conductivité des matériaux contrairement à la méthode de la sonde mono tige qui ne permet de déterminer que la conductivité thermique, de plus les erreurs liées à la résistance de contact sont minimales dans la **TPS** que dans la sonde monotige [25].

a) La conductivité thermique

La conductivité thermique λ exprimée en W/m.K, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Parmi les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des matériaux de construction, citons : la porosité et la teneur en eau.

b) Méthodes de mesure

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

c) Dispositif expérimental

L'essai consiste à placer en sandwich la sonde **TPS** **Figure 2.32** et la relier à un circuit électrique. La variation de la résistance aux Bornes du pont de Whestone, ΔU permet d'accéder à la différence de potentielle $\Delta E(t)$ aux bornes de l'élément TPS. Une relation entre $\Delta E(t)$ et la variation de température dans l'élément **TPS** peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique **a** et de conductivité thermique λ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à λ , **a** et ensuite **c** [75].



Figure 2.32. Dispositif de serrage, sonde, éprouvettes.

d) Conception de l'élément TPS

L'élément TPS qui doit être utilisé dans cette méthode doit être constitué d'un élément résistif jouant, à la fois, le rôle de résistance chauffante et de capteur de température. Il peut, en principe, avoir plusieurs formes (rectangulaire, disque, etc.) et plusieurs tailles suivant la configuration géométrique de l'échantillon et le type de matériau utilisé. Pour des raisons de commodité, tant sur le plan théorique que sur le plan

expérimental, deux configurations ont été retenues pour le modèle résistif TPS, la forme rectangulaire et la forme disque **Figure 2.32**. Cependant il existe plusieurs tailles du capteur afin de pouvoir effectuer des mesures sur des échantillons de différentes dimensions.

Dans ce travail, l'élément TPS utilisé **Figure 2.32** dont le capteur est constitué d'une feuille métallique en Nickel en forme de spirales bifilaires insérées entre deux couches isolantes en Kapton, Teflon ou Mica pour des températures inférieures à 200°C. Les épaisseurs de la feuille et de la couche de Kapton sont respectivement de 10 et 25 µm.

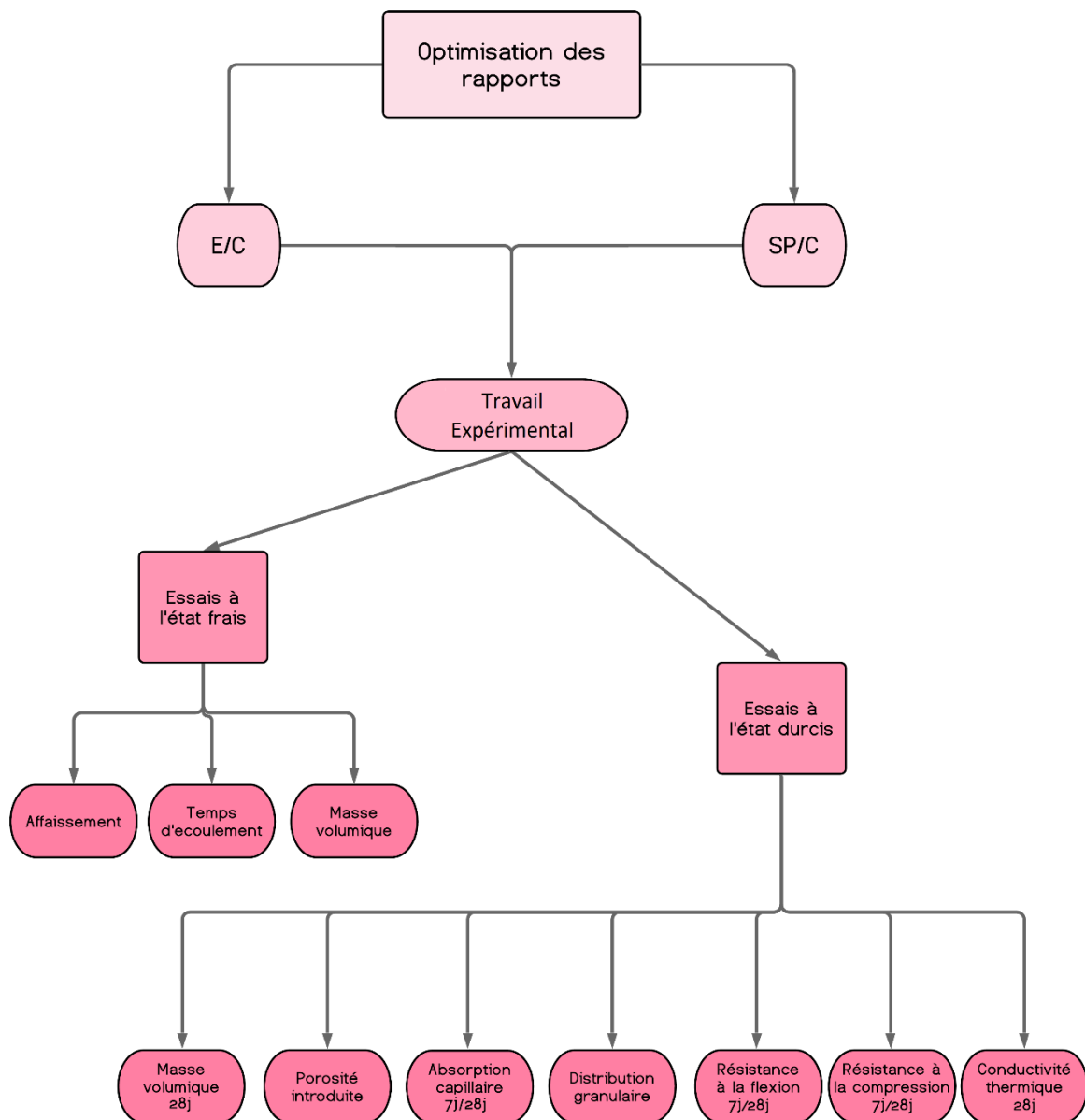


Figure 2.33. Organigramme récapitulatif des essais réalisés.

2.5 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a été essentiellement consacré en premier lieu, à la présentation des différents essais de caractérisation fait sur les produits de départ (sable alluvionnaire, polystyrène, plastique, ciment et eau), en second lieu à la présentation du matériel associé et utilisé lors de ces essais, une partie est faite sur l'élaboration des composites qui font l'objet principale de cette étude expérimentale afin de les soumettre par la suite aux divers essais expérimentaux selon les normes aux différents états, frais et durcis comme présenté à la **Figure 2.33**.

Chapitre 3 . Résultats expérimentaux et discussion

3.1 Introduction

Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent, notre expérimentation a pour objectif principal, l'élaboration d'un micro béton léger isolant à base de granulats issu du recyclage de co-produits industriels, billes de polystyrène traité et granulats de plastique, ces derniers sont substitués dans la matrice globale du composite. Ce travail vise l'étude de l'influence de ces types de granulats combinés sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du composite.

C'est dans ce contexte que se présente ce chapitre, où nous présentons les résultats obtenus lors la réalisation de notre programme expérimental

3.1 Formulation des bétons élaborés

3.1.1 Optimisation du rapport E/C

En premier lieu, la détermination du rapport E/C est importante c'est alors dans ce cadre qu'on l'a fait varier de 0,50 à 0,575 par un pas de 0,025, puis confectionné des éprouvettes de (4x4x16) qu'après 7 jours on a procédé à l'écrasement afin de définir sa résistance à la compression optimale, les résultats sont représentés sur le **Tableau 3.1**.

Tableau 3.1. Détermination du dosage en eau.

E/C	Résistance à la compression à 7j	Temps d'écoulement
0,5	11,58 ($\pm 2,42$)	59,8
0,525	15,97 ($\pm 2,44$)	26,22
0,55	13,06 ($\pm 3,38$)	19,43
0,575	9,49 ($\pm 2,61$)	9,52

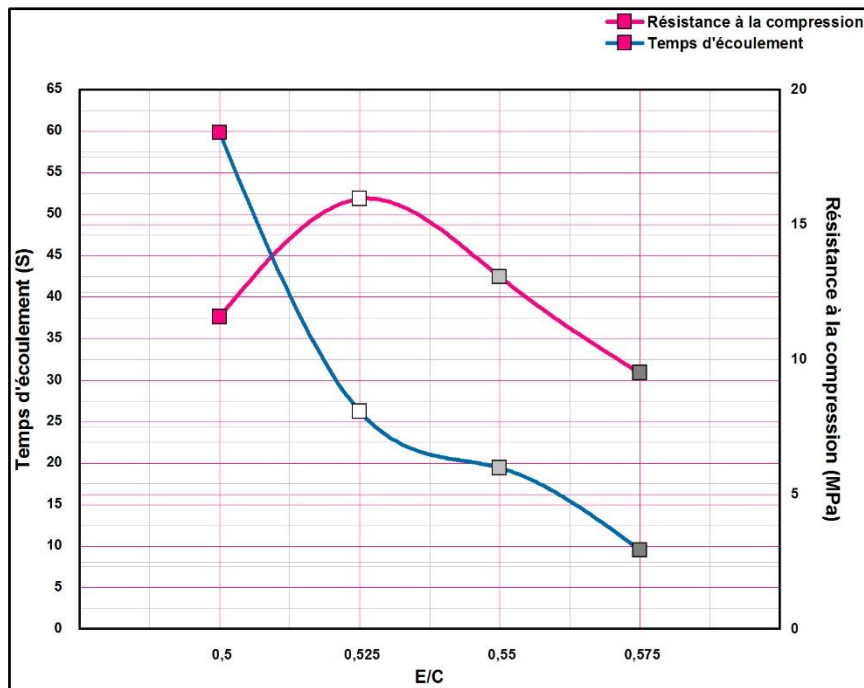


Figure 3.1 Variation des résistances et de temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.

D'après les résultats illustrés dans la **Figure 3.1**, on constate que les résistances à la compression présentent un optimum vers la valeur de $E/C = 0,525$. Pour l'ouvrabilité à travers le temps d'écoulement on remarque une diminution en fonction de l'augmentation de rapport E/C. Cependant on a opté à fixer le rapport E/C sur la valeur de 0,525 pour tous les mélanges à élaborer.

3.1.2 Optimisation du rapport SP/C

Une deuxième phase dans l'étude d'optimisation est liée à la maniabilité. Une optimisation du dosage en adjuvant (superplastifiant) a été également étudiée afin d'améliorer la maniabilité de nos composites que nous envisageons qu'avec l'ajout des granulats de plastique la perdent et cela pour faciliter leur mise en moule.

Toutefois, l'optimum de la résistance (compacité maximale) et celui de la bonne maniabilité ne correspondent pas au même rapport E/C, cette dernière demande un rapport E/C plus élevée qui affectera sans doute les performances mécaniques. Cependant, la recherche d'un compromis entre la compacité et la maniabilité demeure nécessaire. La voie envisagée est l'utilisation d'un adjuvant réducteur d'eau (superplastifiant). Celui-ci permet de fixer le rapport E/C correspondant à la résistance à la compression maximale tout en recherchant le dosage en SP correspondant à la bonne maniabilité.

La fiche technique du superplastifiant indique un taux d'utilisation maximal (degré de saturation) de 2,5% de la masse du ciment utilisé, c'est sur cette base que le choix des pourcentages du SP a été fait après plusieurs tentatives d'essai pour les différentes matrices dont il dépend du taux de substitution de la matrice, qui quand elle est minimale, l'utilisation du superplastifiant est minimale aussi et vice versa en variant le pourcentage d'un pas de 0,5 à 1%.

3.2 Etude des propriétés rhéologiques du micro béton

L'étude du micro béton léger à l'état frais consiste à étudier l'ouvrabilité des différentes compositions confectionnées avec différents pourcentages de substitution par des granulats légers (plastique et polystyrène) dans le but de proposer une étude rhéologique de ce type de bétons afin d'avoir des mélanges faciles à mettre en œuvre.

3.2.1 Maniabilité

Des essais au Mini-cône d'Abrams et au maniabilimètre ont été réalisés sur le béton frais afin de mesurer son ouvrabilité, les **Tableau 3.2**, **Tableau 3.3** et **Tableau 3.4** ci-dessous regroupent les résultats de temps d'écoulement et de l'affaissement.

D'après les **Tableau 3.2**, **Tableau 3.3** et **Tableau 3.4**, on remarque que la maniabilité des différentes compositions étudiées change et la consistance varie considérablement ce qui montre que pratiquement les différents systèmes étudiés présentent un effet remarquable sur la maniabilité du béton.

Tableau 3.2. L'ouvrabilité du mélange M75.

N° Réf	Temps d'écoulement (s)	Affaissement (cm)	E/C	SP (%)
Témoin	26,22	3,5	0,525	0
M75P0Y100	4,18	6		2,5
M75P25Y75	5,68	4,5		
M75P50Y50	5,82	2		
M75P75Y25	29,56	0		
M75P100Y0	33,23	0		

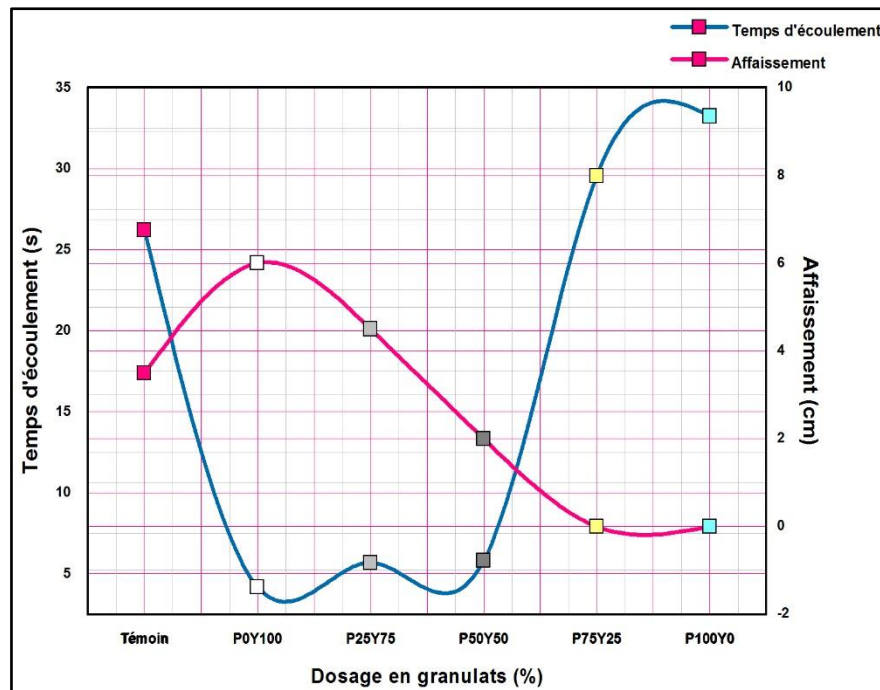


Figure 3.2 L'ouvrabilité du mélange M75.

D'après la **Figure 3.2**, dans le système M75 vu que les granulats occupent la partie majoritaire des mélanges et il y a un manque de sable, ciment et eau (phase liquide), et seules les mélanges P0Y100 et P25Y75 donne une bonne maniabilité

Nous avons démarré notre étude avec un béton témoin d'un affaissement de 3,5cm sans adjuvant et d'un temps d'écoulement de 26,22s.

Par la substitution de 75% du volume de la matrice et d'un dosage en plastique à 100%, le béton est devenu ferme vu que le temps d'écoulement a augmenté de 21,1% et pris 33,23s avec un affaissement de 0cm ce qui montre que le plastique a un effet négatif sur les propriétés rhéologique du matériau à cause de sa forme semi-angulaire et la présence de série non parfaitement coupé à défaut de fabrication et cet effet reste dominant même avec l'ajout du polystyrène avec des proportions de P75Y25 avec un léger recul du temps d'écoulement et cela même avec l'utilisation du superplastifiant.

A 50-50% de polystyrène et de plastique, un changement remarquable apparait sur le mélange avec affaissement de 2cm, comme on remarque une considérable amélioration de la viscosité présentée par un court temps d'écoulement qui a chuté à 5,82s ce qui est énorme (80,49% d'amélioration), cela est certainement dû aux billes de polystyrène vu leur forme.

Aux mélanges P25Y75 et P0Y100 l'affaissement augmente vu la nature du composite qui frôlent la limite supérieure du béton plastique avec $A_{fr} = [4,5 \text{ et } 6 \text{ cm}]$ respectivement tandis que la viscosité a légèrement diminué mais qui reste pratiquement constante.

Tableau 3.3. L'ouvrabilité du mélange M50.

N° Réf	Temps d'écoulement (s)	Affaissement (cm)	E/C	SP (%)
Témoin	26,22	3,5	0,525	0
M50P0Y100	1,96	9		2
M50P25Y75	2,36	8		
M50P50Y50	2,42	8		
M50P75Y25	2,87	1,5		
M50P100Y0	4,38	0,5		

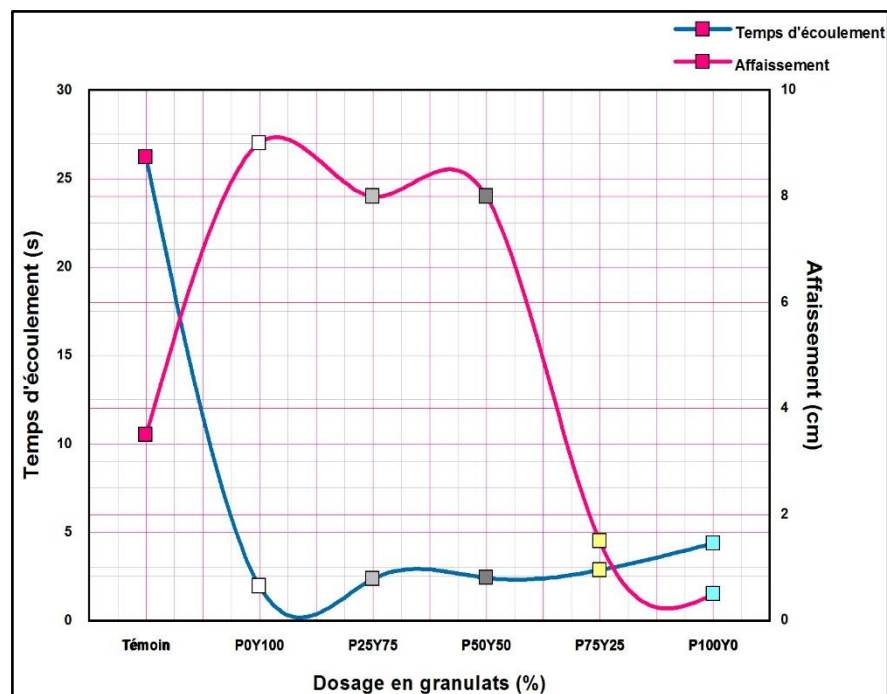


Figure 3.3 L'ouvrabilité du mélange M50.

Dans le système M50, et selon la **Figure 3.3**, le taux de substitution a diminué ce qui fait augmenter les proportions de notre phase liquide dont l'ajout du ciment joue un rôle important de lubrificateur du composite et le superplastifiant a été réduit à 2%, on remarque que même avec l'ajout du plastique P100Y0 et un faible pourcentage de polystyrène P75Y25, nos mélanges ont toujours une viscosité importante et proche du M75POY100 ($T_e = 4.18s$) tandis que l'affaissement est toujours faible vu l'effet négative

de la quantité importante du plastique et la forme des granulats affectant le seuil de cisaillement qui est l'effort minimal appliqué pour que l'écoulement commence.

Avec l'ajout du polystyrène aux dosages P0Y100, P25Y75 et P50Y50 comme expliqué précédemment, nous obtenons un optimum qui nous donne des valeurs convenables vis-à-vis la viscosité représentée par le temps d'écoulement et le seuil de cisaillement par l'affaissement.

Tableau 3.4. L'ouvrabilité du mélange M25.

N° Réf	Temps d'écoulement (s)	Affaissement (cm)	E/C	SP (%)
Témoin	26,22	3,5	0,525	0
M25P0Y100	7,78	1		1
M25P25Y75	7,23	1		
M25P50Y50	6,73	1		
M25P75Y25	6,14	0,5		
M25P100Y0	10,49	0,5		

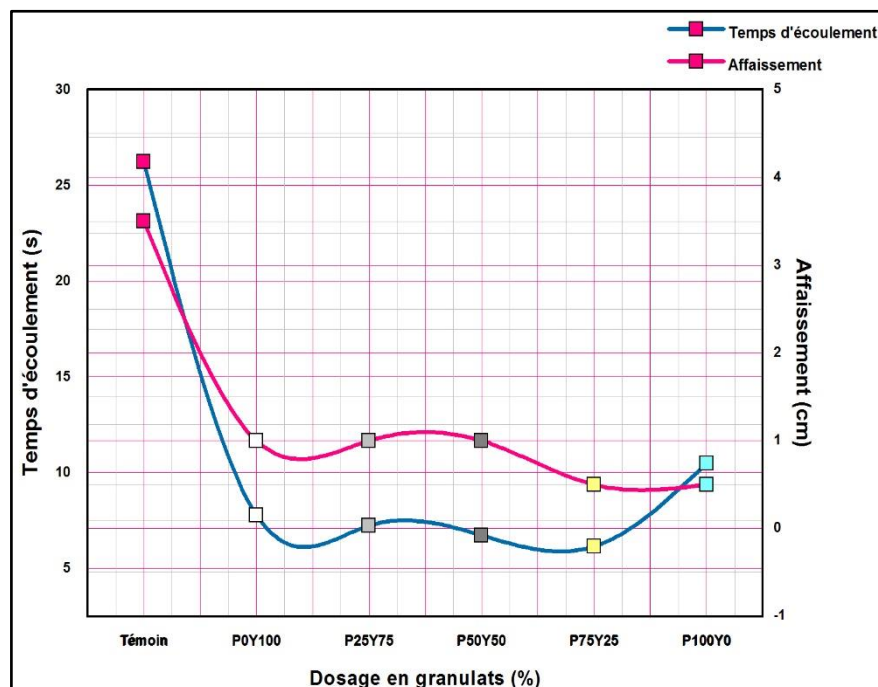


Figure 3.4 L'ouvrabilité du mélange M25.

Basé sur l'illustration présenté sur la **Figure 3.4**, il apparait qu'avec le taux de substitution minimale de notre étude expérimentale, le système M25 comporte assez de pate que de granulats cela fait perdre le frottement intergranulaire et par conséquent l'augmentation de seuil de cisaillement qui engendre une diminution de l'affaissement,

tandis que la viscosité reste pratiquement dans le même ordre avec une amélioration par l'ajout des billes de polystyrène.

Nos constatations ont été confirmées dans la majorité des études, nous citons [57] leur étude a montré que la forme et la taille du plastique ajouté ou remplacé possède un grand effet sur les propriétés à l'état frais.

Ainsi que **Ismail, Z et A Al-Hashmi [79]**, qui assure que la valeur d'affaissement du béton léger avec des granulats en plastique est plus faible par rapport à celle du mélange de béton conventionnel, ceci est due à l'ajout croissant des agrégats en plastique qui abaisse encore la valeur d'affaissement ce qui est en accord avec nos résultats trouvés. **Saikia et Brito [80]** voient que, les raisons de la plus faible valeur d'affaissement du mélange de béton contenant des granulats de plastiques sont les arêtes vives et la granulométrie angulaire de ces granulats. Ce qui est le cas de notre plastique utilisé qui a une forme cylindrique semi angulaire aux abords due à la coupe lors du procédé de fabrication.

Et **Choi** et ses alliés [81] qui remarquent une augmentation de la valeur d'affaissement due à l'incorporation d'agrégat plastique ; cette dernière est en raison de la présence d'eau libre dans les mélanges contenant du plastique que dans le béton mélange contenant des granulats naturels seuls, les granulats plastiques ne peuvent pas absorber l'eau pendant le mélange. L'ouvrabilité du béton diminue en raison de la résistance offerte par les agrégats.

Il a aussi été montré par **Herihiri. O [36]** que la maniabilité des bétons à base de polystyrène augmente si le pourcentage du polystyrène augmente et cela revient à la réduction du volume du sable par contre le volume des autres composantes (ciment et l'eau) a été maintenu constant.

Les résultats obtenus montrent que :

- Plus le dosage en polystyrène augmente, plus le temps d'écoulement devient court et la maniabilité est améliorée, cela est probablement dû à la surface lisse des billes de polystyrène ainsi qu'à leurs formes parfaitement sphériques qui facilitent le frottement entre elles donnant une matrice ouvrable facile à mettre en œuvre,
- L'ajout des granulats de plastique affecte négativement les paramètres rhéologiques des composites et par conséquent leur ouvrabilité.
- L'utilisation du superplastifiant a aidé à améliorer les propriétés à l'état frais de la majorité des mélanges à l'exception des M75P100Y0 et M75P75Y25.

3.2.2 Masse volumique à l'état frais

La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes, Elle est définie comme le rapport de la masse du composite à un volume apparent d'un litre à l'état frais.

Les masses fraîches des micros bétons ont été déterminé par pesée directement après la confection.

Il est clair qu'avec la substitution d'une entité de la matrice et son remplacement par des granulats légers va engendrer une perte de masse remarquable de la matrice, la **Figure 3.5** représente la variation des masses volumique du micro-béton frais en fonction des différents pourcentages de dosage en granulats légers.

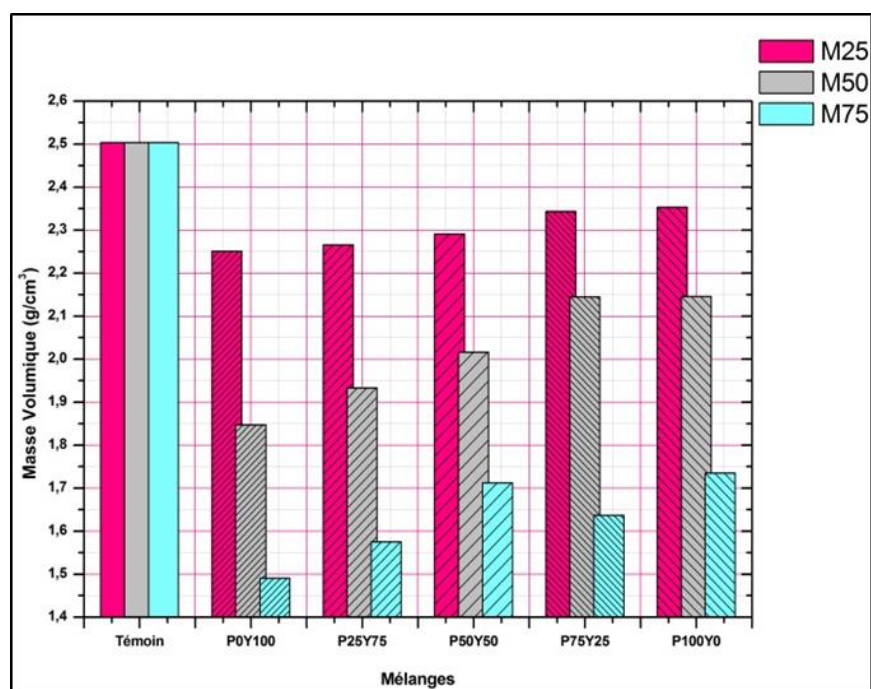


Figure 3.5. Variation des masses volumiques à l'état frais en fonction des dosages en granulats.

D'après la **Figure 3.5** nous pouvons voir que la densité à l'état frais pour les trois systèmes de substitution M75, M50 et M25 diminue par rapport à notre béton témoin.

Cette perte de masse est visiblement claire pour les mélanges P0Y100 pour tous les systèmes de substitution, d'une part dans M75 la masse volumique a chuté d'une valeur importante de 35%, tandis que pour le système M50 a engendré une diminution d'une valeur de 20%, d'autre part le taux de substitution minimale a résulté une faible perte de masse de 8%.

Les masses volumiques chutent considérablement par l'ajout du polystyrène mais regain de la masse par l'ajout du plastique, cela est tout à fait logique vu l'énorme écart des densités entre les granulats bruts dont le polystyrène fait $43,32 \text{ kg/m}^3$ tandis que le plastique fait $906,54 \text{ kg/m}^3$.

D'une part, au système M75 nous obtenons les plus basses densités par rapport à l'ensemble des mélanges pour les autres systèmes, notons que la diminution du poids est à son maximum avec 40% pour le P0Y100 qui augmente avec l'ajout du plastique pour en arriver à une perte de 31% pour le mélange P100Y0, mais qui reste un gain de légèreté important par rapport au témoin. Pour les mélanges hybride (Polystyrène et/ou Plastique), on constate que la valeur de masse volumique à l'état frais varie environ de 1.5 à 1.7 g/cm^3 .

Le mélange avec le taux de substitution à la moitié (M50), les proportions pate/granulats sont assez élevé par rapport au système précédent ce qui explique le regain de masse mais par rapport au témoin reste intéressant car avec que du polystyrène (P0Y100) la $M_v = 1,847 \text{ g/cm}^3$ ce qui est l'équivalent d'une diminution de 26%. On remarque aussi un comportement similaire à l'état frais par rapport au système M75 pour les mélanges hybride et le mélange P100Y0.

D'autre part, le M25 au taux de substitution minimale, on note que nous avons la densité la plus élevée au composite P100Y0, cette valeur de densité expliqué par une chute de masse volumique de seulement 6% par rapport au témoin, ce qui est totalement logique vu la nature des granulats et leurs masses volumiques absolues, cette densité diminue au fur et à mesure l'introduction progressive du polystyrène jusqu'à en atteindre une densité minimale pour ce système égale à $2,504 \text{ g/cm}^3$ qui reste assez proéminente par rapport au témoin et aux autres systèmes.

3.3 Etude du micro béton léger à l'état durcis

3.3.1 Caractéristiques physiques

3.3.1.1 Masse volumique sèche

La masse volumique peut être considérée comme la caractéristique principale des bétons légers et sa mesure est la plus simple à réaliser qui permet de déterminer la perte en masse en fonction des dosages en granulats et ce à 28 jours, dû à l'eau évaporée de l'éprouvette après son démoulage et les conditions atmosphériques.

Sur la base de valeurs trouvées de la masse volumique nous pouvons classer notre micro béton et indiquer son domaine d'application.

La combinaison des différents types de déchets (Système hybride) fait varier leurs masses comme il a été conclu lors de l'étude à l'état frais (Voir paragraphe 3.2.2), ce qui rend nécessaire l'étude de l'influence des différents taux de substitution et l'addition des granulats légers sur la masse volumique sèche du micro béton, les valeurs de densité sont illustrées dans la **Figure 3.6** Afin de constater et étudier l'évolution en fonction des différents dosages en granulats légers.

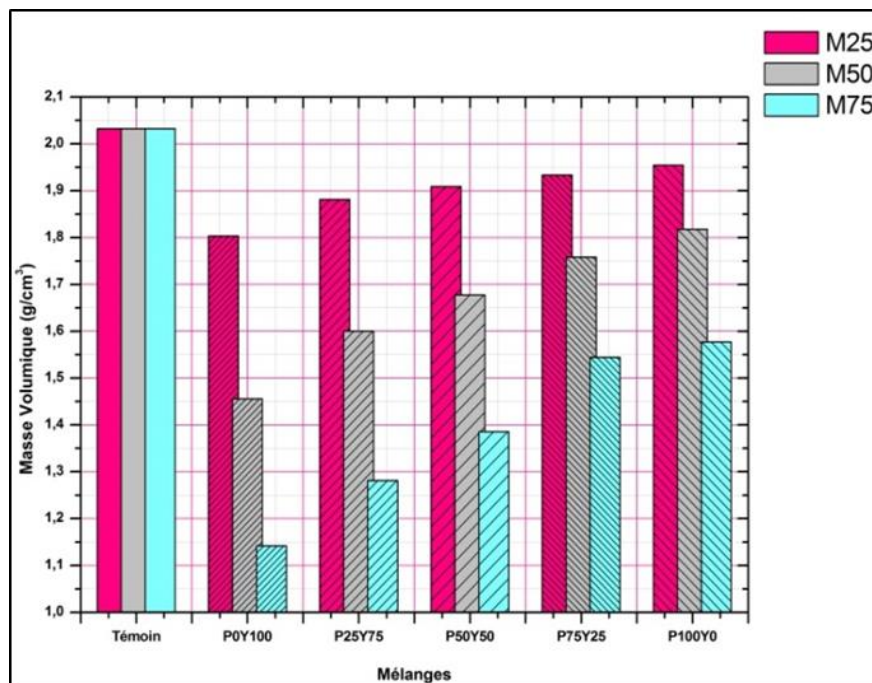


Figure 3.6. Variation des masses volumiques à l'état durci en fonction des dosages en granulats.

L'évolution de la variation des masses volumiques en fonction des dosages en granulats léger pour différents taux de substitution, déterminée par pesée à l'âge de 28 jours et illustrée dans la **Figure 3.6**, a montré une diminution progressive en fonction du pourcentage de substitution, la diminution de la masse volumique est de l'ordre de 8%, 19% et 35% respectivement pour les différents système M25, M50 et M75, on observe que plus la quantité des granulats augmente, plus la densité diminue, cela est dû à la nature légère des granulats de plastique et de polystyrène mettant en accord avec les observations des masses volumiques à l'état frais (Voir paragraphe 3.2.2) qui aux différents états, ont le même comportement.

La perte de masse à l'état sec a évolué considérablement par rapport à l'état frais, cela est dû à l'évaporation de l'eau contenu dans les mélanges.

Le M75 qui, avec le taux de substitution le plus élevé, perd la masse minimale par rapport à l'ensemble des systèmes car il comporte plus de granulats que de pâte, par contre au système M25, il perd en moyenne moins de masse par rapport au système M75 et cela est dû au faible taux de substitution. On remarque aussi que le système M50 présente des densités intermédiaires entre les M75 et M25.

Notons que cette diminution de la masse volumique est confirmée par plusieurs auteurs [82]–[84].

3.3.1.2 Corrélation entre la masse volumique à l'état frais et celle à l'état durci

D'après les études expérimentales faites sur les composites aux différents états, frais et durci, nous constatons qu'il y a une relation remarquable entre les deux donc, sur cette base, nous présentons des courbes qui montrent cette concordance entre les deux facteurs présentés dans la **Figure 3.7**

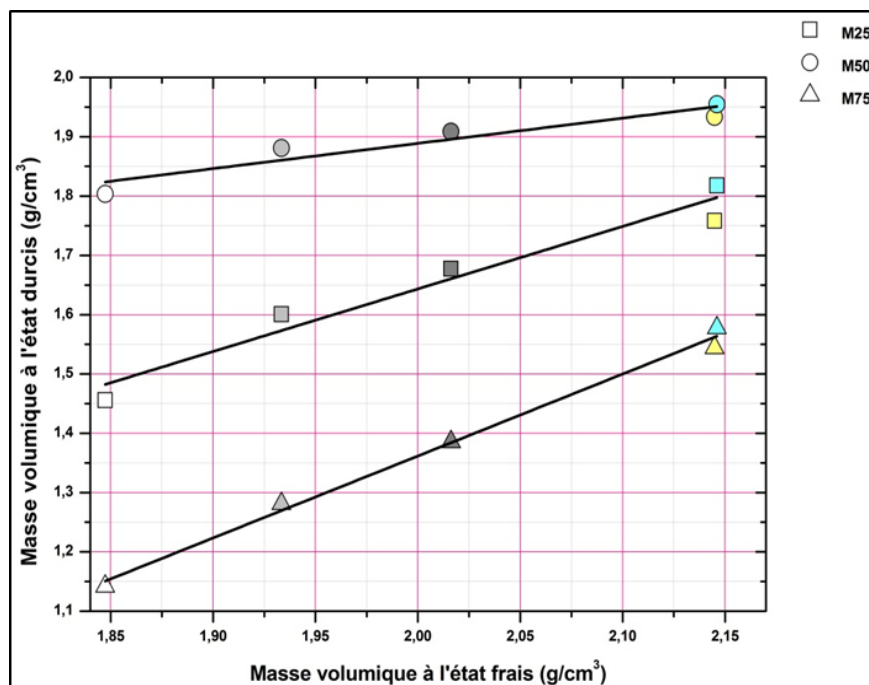


Figure 3.7. Relation entre la masse volumique aux états frais et durcis.

- **M25** : $MV_{abs}^d = 0,42573MV_{abs}^f + 1,0374$ avec $R^2=0,872$
- **M50** : $MV_{abs}^d = 1,05484MV_{abs}^f - 0,46624$ avec $R^2=0,939$
- **M75** : $MV_{abs}^d = 1,38253MV_{abs}^f - 1,4033$ avec $R^2=0,992$

D'où :

MV_{abs}^f : Masse volumique à l'état frais.

MV_{abs}^d : Masse volumique à l'état durci.

Des observations ont été faites à travers la **Figure 3.7** qui montre qu'il existe une corrélation sous forme des équations polynomiales pour les trois systèmes de substitutions entre les masses volumiques à l'état frais et durcis, représenté par un coefficient de corrélation (R^2) qui varient entre 0,85 et 0,95. Cette corrélation entre les masses volumiques fraîches et sèches pourrai être utile lors de la mise en œuvre pour avoir d'une part un contrôle de qualité des différents mélange avant le coulage et mise en moules, et d'autre part ça pourra donner d'éventuelles estimations sur la masse volumique à l'état durci.

D'après différentes études menées sur les bétons confectionnés à base de polystyrène [85]–[88], où ils ont montré avoir une masse volumique faible selon que l'on emploie une portion de sable ou non et ce qui en accord avec nos résultats.

A travers les résultats obtenus dans ces parties consacrés à l'étude des masses volumiques aux deux différents états, frais et sec, nous pouvons conclure que :

- La perte de masse observée dans les différents mélanges lors de cette étude expérimentale demeure logique puisqu'on remplace une entité plus dense (matrice) par une même entité moins dense (granulats légers).
- Les mélanges avec seulement de polystyrène, présentent les masses volumiques les plus faibles par rapport aux mélanges avec du plastique.
- Pour les mélanges avec que de plastique, la masse volumique augmente à sa valeur maximale mais reste inférieur à celle du micro-béton de référence.
- Pour les systèmes hybrides en granulats, le mélange P25Y75 rechute la masse volumique et cela due à la quantité supplémentaire de polystyrène, alors que le P50Y50 et P75Y25 la lui fait regagner, ce gain est dû à la quantité de plastique.
- Les résultats de la masse volumique à l'état durci concernant le système M25 sont insatisfaisants par rapport aux M50 et M75.
- Pour les dosages en plastique et/ou polystyrène des systèmes M50 et M75, des masses volumiques inférieures à 1800 kg/m³ réglementairement préconisées pour les bétons légers ont pu être atteintes.

3.3.1.3 Porosité introduite

La porosité est un paramètre très important à prendre en compte lors de l'étude de caractérisation d'un matériau poreux, elle influe sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons. Les résultats des essais de porosité introduite sont illustrés sous forme de courbes dans la **Figure 3.8** qui présente la variation de la porosité en fonction des trois systèmes de substitution M75, M50 et M25 ainsi que les dosages en granulats (plastique et/ou polystyrène).

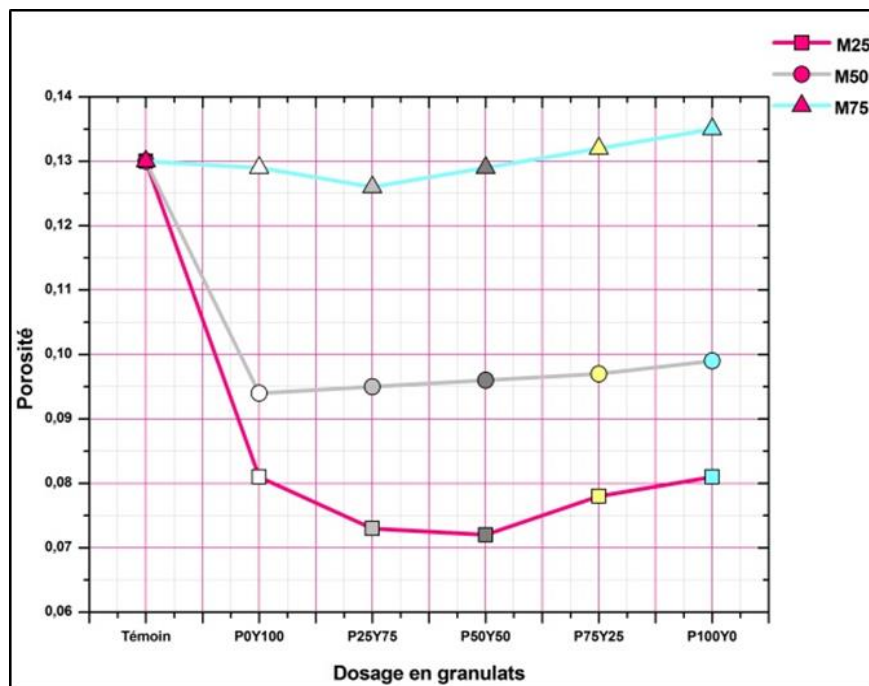


Figure 3.8. Variation de la porosité introduite en fonction des dosages en granulats.

L'évolution de la courbe illustrée dans la **Figure 3.8** montre qu'une augmentation du taux de substitution de la matrice en granulats de plastique et de polystyrène engendre une augmentation et un développement de la porosité introduite dans le composite. Le système M75 présente le mélange le plus poreux suivi par le M50 et le M25, ce dernier est moins poreux mais présente quand même une certaine porosité vue de la faible teneur en granulats. Ceci est peut-être dû à la présence des granulats en grande partie ainsi qu'à leur orientation, qui entre elles, forment des pores et empêchent la pénétration de la pâte, qui quand elle est en grande partie dans le composite, forme un matériau assez compact non poreux.

La présence d'une porosité élevée dans le matériau le rend moins dense d'où résulte une chute sur les résistances mécaniques.

Une chute de la porosité est remarquée pour les trois systèmes au mélange P0Y100 par rapport au micro-béton de référence surtout pour le système M25 et M50. Pour les mélange hybride, la porosité poursuit sa diminution jusqu'à un optimum vers les deux mélanges P25Y75 et P50Y50. Au-delà de P50Y50 la porosité augmente légèrement avec l'augmentation de la quantité de plastique et qui atteint des valeurs maximales pour les mélanges qui contiennent uniquement du plastique.

Nous pouvons conclure que :

- Plus la quantité en granulats augmente plus la porosité deviens importante.
- L'absence des granulats fins (sable et ciment) cause une porosité assez remarquable.
- La grande teneur en granulats au système M75, comme mentionné précédemment vu que les granulats occupent la partie majoritaire des mélanges et qu'il y a un manque de sable, ciment et eau (phase liquide) affecte en quelques sortes la maniabilité et la mise en moule non seulement qu'en minimisant les vibrations pour ce type de micro-béton, cela s'influe négativement sur la compacité qui n'est pas à son maximum et par conséquent ça apparait sur le taux de la porosité.

3.3.1.4 Absorption par capillarité (l'absorptivité)

Le processus de transfert hydrique dans le béton a été étudié par plusieurs chercheurs, dans la plupart des cas et pour des éprouvettes sèches et sans aucune addition, il est possible d'expliquer le processus d'une façon satisfaisante au premier âge.

Dans notre étude, la sorptivité (S_w) est mesurée expérimentalement par la méthode décrite dans le chapitre II conformément à la norme **NF EN 13057** [72].

Il a été fréquemment montré que, pour un béton ou un mortier exposé au mouillage avec de l'eau, le taux d'absorption d'eau (i), pendant les premières heures de l'essai de l'absorption, correspond au premier tronçon de droite qui est proportionnel à la racine carrée du temps ($\sqrt{t}$) [91].

La sorptivité (S_w ($m.s^{-1/2}$)), est la propriété qui caractérise la possibilité d'un matériau poreux d'absorber et transmettre l'eau par capillarité pour des conditions initiales et limites.

Ce paramètre a été introduit pour la première fois par **Philippe J.R** [90] et adopté par la suite par d'autres recherches de **Christopher H** [89], [91], [92]. Elle est déterminée par le lissage des premiers points expérimentaux par l'équation linéaire de type [93]:

$$i = Sw. \sqrt{t} \quad \text{..... Équation 3.1}$$

Les résultats des essais d'absorption par capillarité en fonction du temps pour nos différents mélanges sont représentés dans les **Figure 3.9** et **Figure 3.10**, **Figure 3.12** et **Figure 3.13**, **Figure 3.14** et **Figure 3.15**.

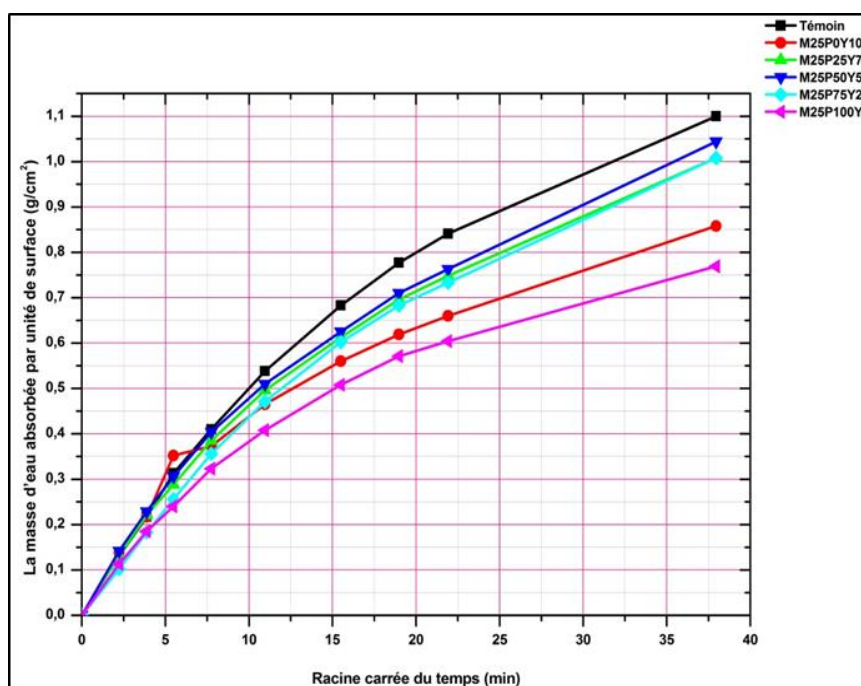


Figure 3.9. Evolution pendant 24h de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M25.

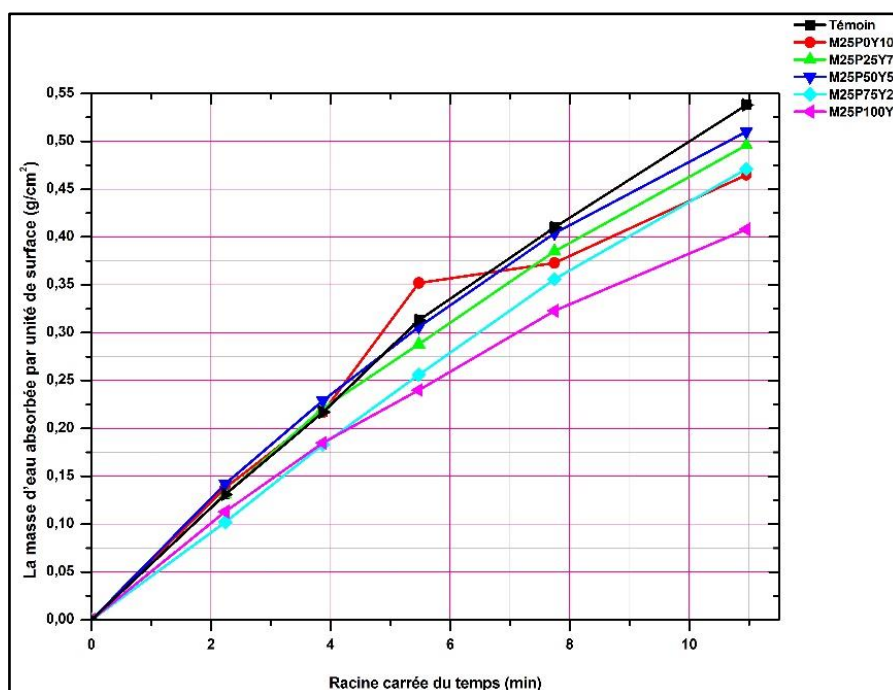


Figure 3.10. Evolution partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M25.

Dans ce système, on remarque que d'après la **Figure 3.9**, une légère diminution dans la masse d'eau absorbé par rapport au béton témoin, cela est probablement dû à la proportion matrice-granulats, dont la matrice occupe 75% du volume totale tandis que les granulats sont minimes.

Notons que le plastique a une absorption nulle, cela explique le comportement du P100Y0 qui a l'absorptivité minimale du système globale, qu'avec l'ajout du polystyrène qui augmente vu que ce dernier est absorbif mais que pendant les 15 premières minute et cela est probablement dû à l'existence des granulats de polystyrène à la surface d'éprouvette ce qui favorise l'absorption capillaire au début, le P0Y100 se redresse avec le temps après la saturation des grains de polystyrène en eau qui forme par la suite une sorte de barrière empêchant l'eau de poursuivre son chemin, et le mélange deviens le moins absorbif après le P100Y0. Le composite dont son absorption est la plus élevé est le P50Y50 suivi par les deux mélanges P25Y75 et P75Y25 qui ont pratiquement le même comportement vis-à-vis l'absorption par capillarité et qui se superpose avec le temps. Cela est visuellement clair dans la **Figure 3.11**

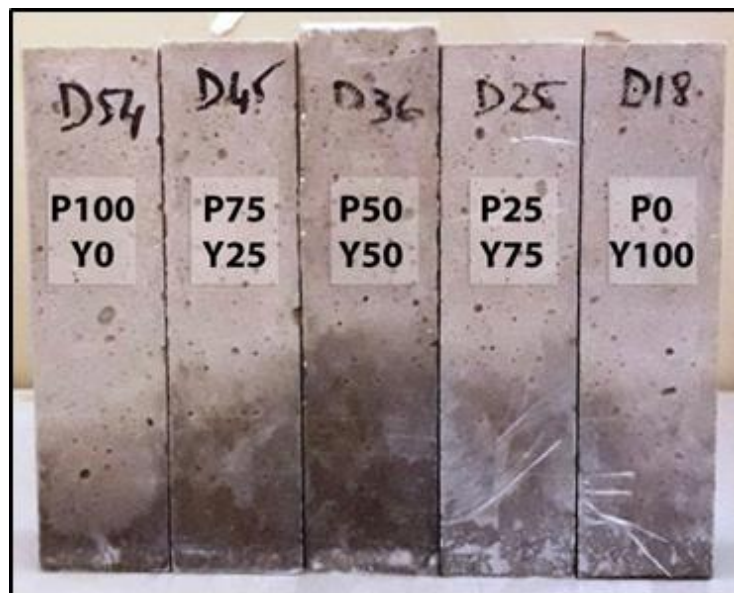


Figure 3.11. Photo des profondeurs de pénétration d'eau dans les éprouvettes - M25.

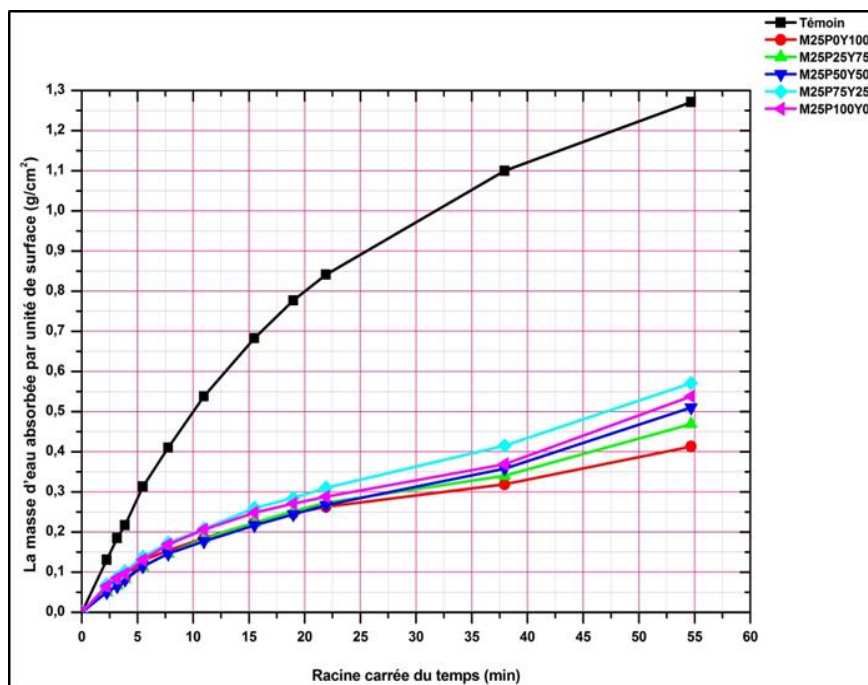


Figure 3.12. Evolution pendant 24h partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M50.

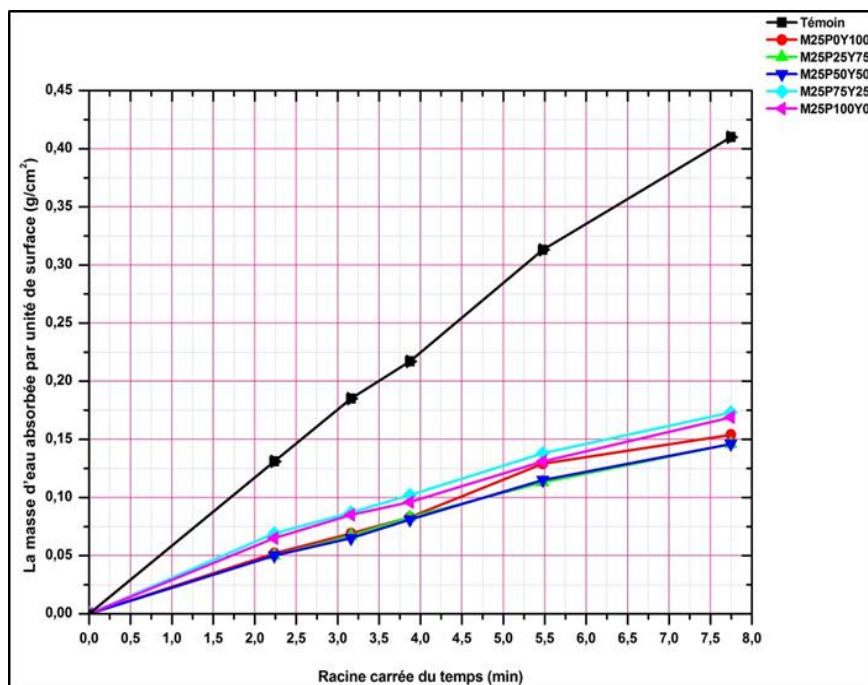


Figure 3.13. Evolution partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps – M50.

A travers la **Figure 3.12**, on remarque qu'avec l'augmentation de la substitution de la matrice à 50%, une diminution de la masse d'eau absorbée en fonction du temps a été remarquée par rapport au témoin ainsi qu'au système M25. On remarque aussi que les valeurs d'absorption sont tous comparable pour les différents mélanges avec une masse d'eau absorbé à 28 jours variant entre 0.4 et 0.6 g/cm^2 . On peut constater la forte

concentration des granulats qui joue un rôle d'une barrière entre les pores et empêche leur continuité ce qui défavorise l'absorption capillaire.

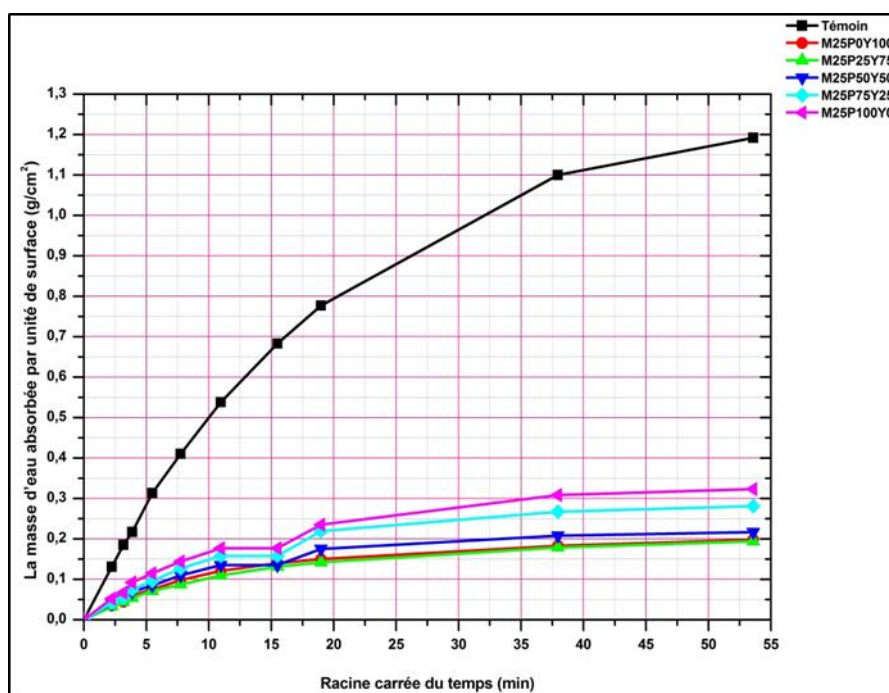


Figure 3.14. Evolution partielle pendant 2 heures de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps - M75.

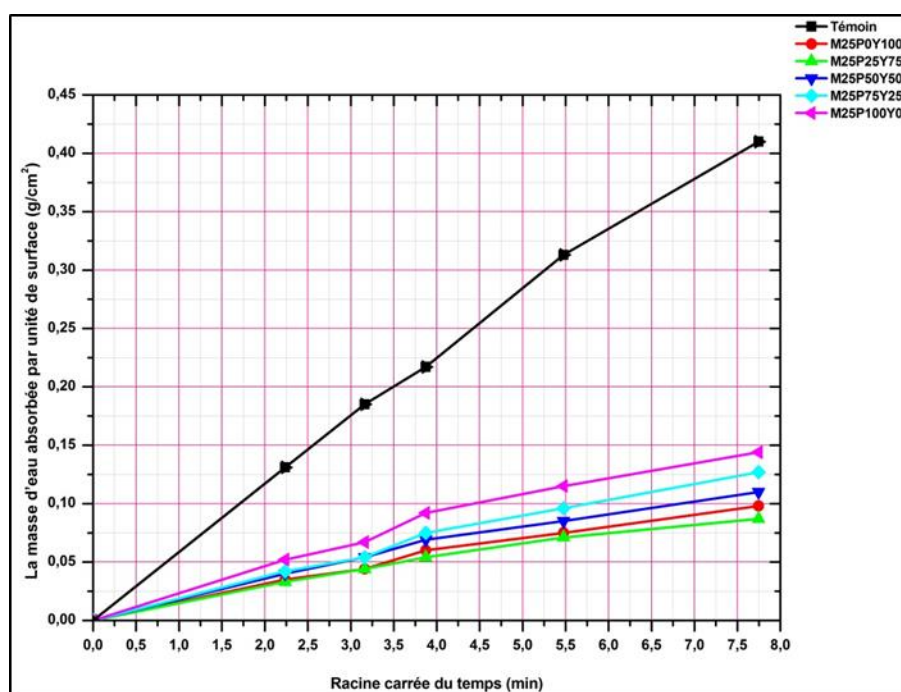


Figure 3.15. Evolution pendant 24h de la masse d'eau absorbée par unité de surface (g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps - M75.

Un comportement similaire et plus remarquable est aussi constaté pour le système M75, selon la **Figure 3.14**, l'absorption des composites est minimale et réduite à des valeurs comprises entre 0.2 et 0.3 g/cm², par rapport au béton témoin qui présente une valeur de 1.27 g/cm². D'où à travers la **Figure 3.16** montre que l'absorption est visuellement remarquable.



Figure 3.16. Photo des profondeurs de pénétration d'eau dans les éprouvettes - M75.

D'après les **Figure 3.10**, **Figure 3.13** et **Figure 3.15** qui illustrent les évolutions partielles d'absorption d'eau pendant 2 heures des composites des différents systèmes de substitution, et comme il a été mentionné avant que le taux d'absorption d'eau (i) pendant les premières heures de l'essai de l'absorption capillaire correspond au premier tronçon de droite qui est proportionnel à la racine carrée du temps ($\sqrt{t}$), le **Tableau 3.5** ci-dessous représente ces coefficients d'absorption qui a travers eux, et en s'appuyant sur les précédentes interprétations, nous confirment ce qui avait été dit sur le fait que les mélanges en ordre du plus absorbant au moins sont respectivement M25, M50 et M75.

Tableau 3.5. Classification des coefficients d'absorption et des MBL.

Mélange	M25					
N° Réf	Témoin	P0Y100	P25Y75	P50Y50	P75Y25	P100Y0
Coeff _{Abs} (i)	0,047	0,037	0,041	0,042	0,042	0,034
Mélange	M50					
N° Réf	Témoin	P0Y100	P25Y75	P50Y50	P75Y25	P100Y0
Coeff _{Abs} (i)	0,047	0,019	0,018	0,018	0,019	0,019
Mélange	M75					
N° Réf	Témoin	P0Y100	P25Y75	P50Y50	P75Y25	P100Y0
Coeff _{Abs} (i)	0,047	0,011	0,010	0,012	0,016	0,017

L'essai de capillarité a montré que les micro-bétons élaborés à base des grains de plastique et de polystyrène sont des matériaux peu absorbants par rapport au béton témoin.

Il est à noter qu'en général, plus le diamètre des pores est réduit et plus le matériau présente une porosité continue, plus l'absorption capillaire est importante.

D'après les résultats illustrés dans les **Figure 3.9**, **Figure 3.12** et **Figure 3.15** requis lors de notre étude expérimentale sans préciser la nature des granulats, on remarque clairement qu'avec l'augmentation de pourcentage des grains, l'absorption diminue progressivement.

D'après les trois **Figure 3.9**, **Figure 3.12** et **Figure 3.15**, nous remarquons que le taux d'absorption le plus élevé appartient au M25 qui comporte la proportion minimale en granulats.

Ceci est dû à la pâte qui a une nature absorbante vue qu'elle comporte plus de grains d'une certaine finesse (sable et ciment) qui rend les pores connectés entre eux et par conséquent favorise la montée d'eau par capillarité. Ainsi, plus les pourcentages des granulats augmentent, plus l'absorptivité du béton est réduite, on peut expliquer ce phénomène par la diminution de la compacité et par conséquent l'augmentation de diamètre des pores ce qui défavorise la capillarité.

Notons également que l'ajout des grains de plastique et polystyrène a affecté significativement l'absorptivité, sauf qu'il est relativement dépendant aussi de l'orientation des grains dans la matrice d'où la nécessité de faire une étude bien détaillée sur ce phénomène, ce qui n'est pas le sujet de notre étude.

D'après cette étude consacrée à la mesure de l'absorption capillaire sur les micro-bétons légers nous constatons que :

- Plus le taux de substitution diminue, plus l'absorption devient importante.
- La diminution de mortier dans la matrice défavorise l'absorption capillaire.
- Plus les grains sont en grande proportion dans la matrice, plus les pores intergranulaires deviennent grands et plus l'absorption diminue.
- La présence des granulats légers (plastique et/ou polystyrène) empêche l'infiltration d'eau par capillarité.

3.3.1.5 Distribution granulaire

Afin d'avoir une idée sur la microstructure des composites étudiés et de voir de près la liaison matrice-granulats, des observations ont été prises par microscope optique avec une échelle agrandie, la **Figure 3.17** montre l'aspect général des différentes compositions étudiées.

A noter que ces visualisations ont été réalisées sur des coupes d'éprouvettes résultantes de l'essai destructif après polissage et ce, au laboratoire de génie mécanique à l'université Ammar Thelidji de Laghouat.

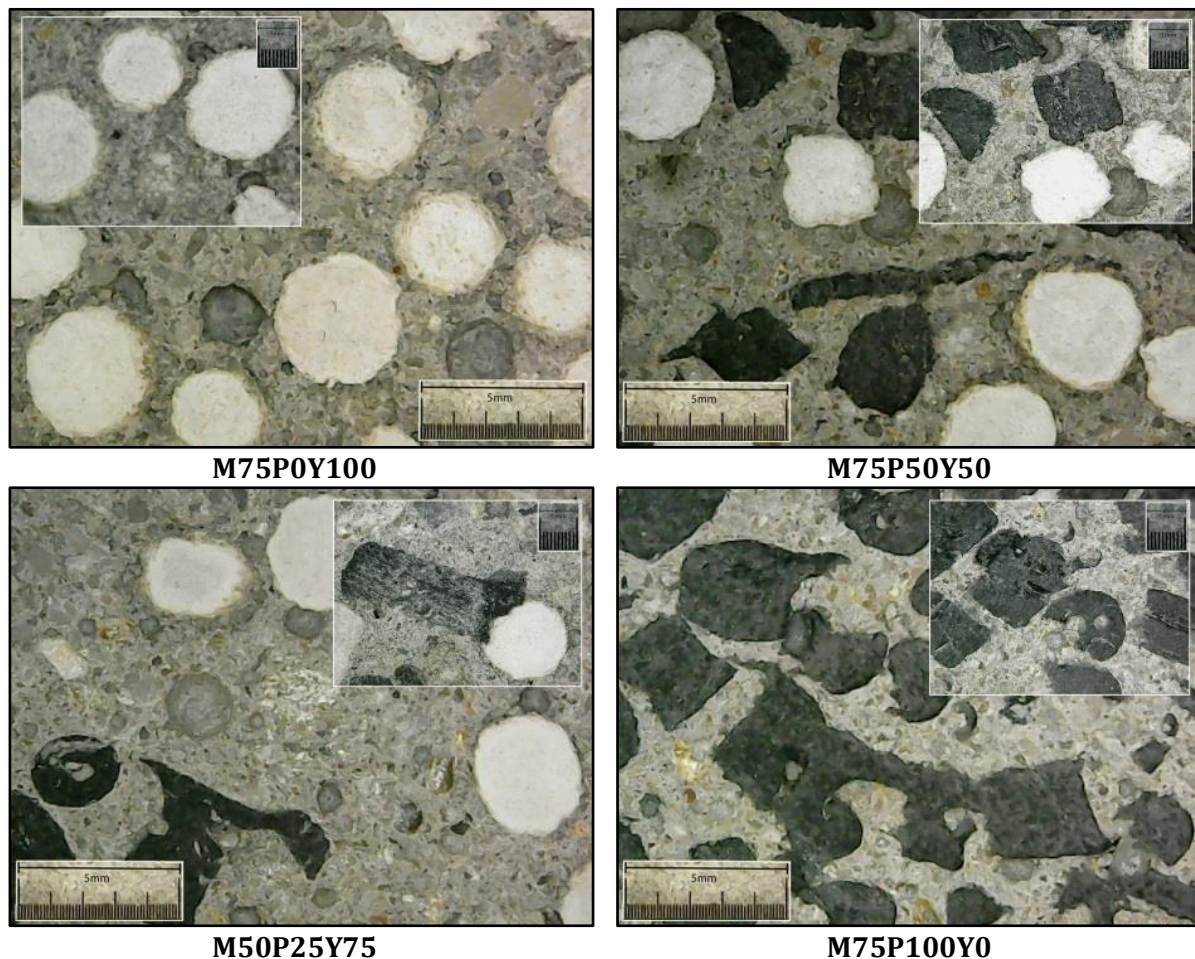


Figure 3.17. Aspect général de quelques micros bétons légers à base de granulats de plastique et de polystyrène vue pas microscope optique.

D'après les agrandissements et observations présentées dans la **Figure 3.17**, on remarque la présence d'une bonne adhérence entre la matrice et les granulats, dont les composites paraissent plus ou moins homogènes vis-à-vis la distribution des granulats dans toutes les compositions que ce soit avec le plastique, le polystyrène ou la combinaison entre les deux.

Le phénomène d'adhérence est plus remarquable surtout en cas des composites P100Y0 où on note la présence d'une grande cohésion entre granulat-pâte vu que cette dernière épouse parfaitement les différentes formes des grains, ce qui explique les bons résultats obtenues pour les propriétés mécaniques, notons également la présence d'une certaine proportion de pores dans la matrice, cela est probablement dû à la mise en moule et la minimisation des vibrations pendant l'élaboration ainsi qu'aux différentes formes et tailles granulaires. On constate aussi que les grains de polystyrène présentent une interaction pâte-granulats faible par rapport à celle des micro-bétons avec seulement du plastique est cela est dû à la différence considérable de module d'élasticité (Voir la **Figure 3.17**).

3.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de notre micro béton sont basées essentiellement sur les résultats des essais de résistance à la compression et la résistance à la traction par flexion.

Des tableaux comme des figures regroupent les propriétés mécaniques des micro-bétons pour les différents taux de substitution et les différents dosages en granulats légers ont été réalisés afin de faciliter les interprétations de ces études expérimentales.

3.3.2.1 Résistance à la compression

a) Influence de la substitution sur la résistance à la compression

Bien que les bétons légers soient connus pour leurs faibles résistances à la traction comme à la compression, n'empêchant pas d'étudier leurs performances mécaniques et leurs évolutions à l'âge de 7 et 28 jours.

Nous présentons dans la **Figure 3.18** les résultats des résistances à la compression des micro-bétons.

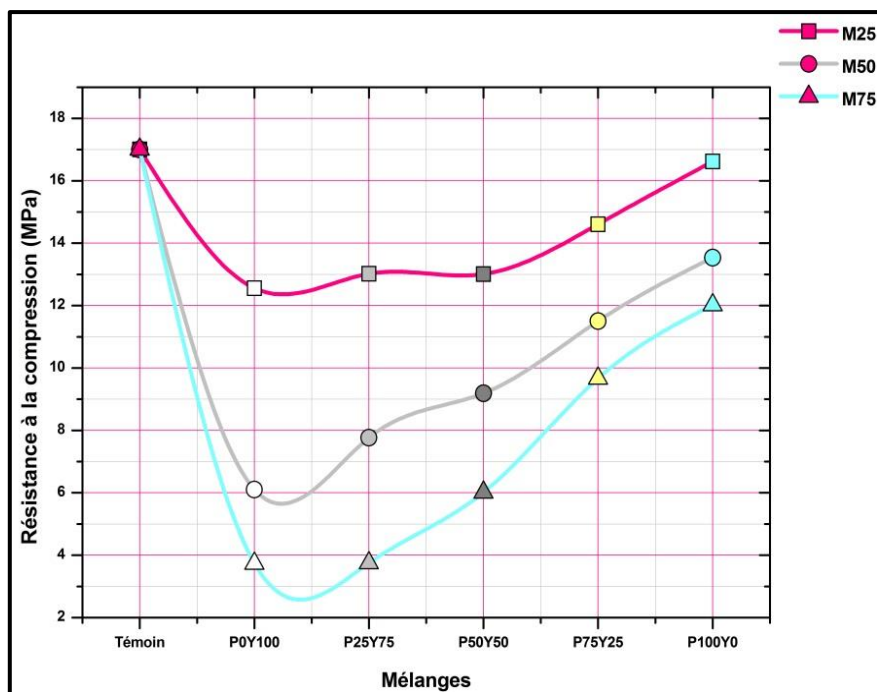


Figure 3.18. Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats légers à 7 jours.

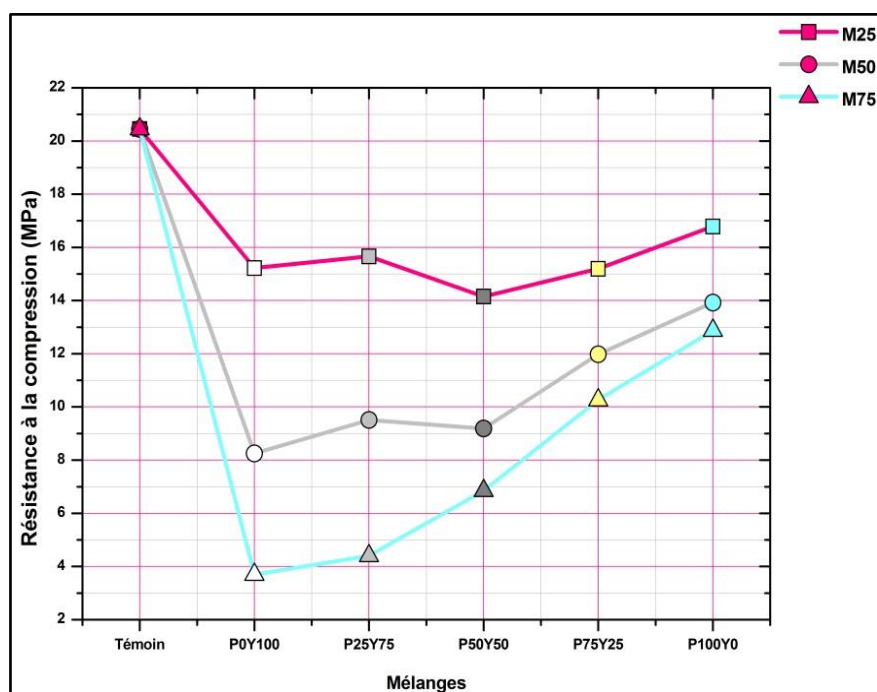


Figure 3.19. Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats légers à 28 jours.

Les courbes des résistances à la compression en fonction des dosages en granulats dans les **Figure 3.18** et **Figure 3.19** représentent une allure décroissante pour tous les mélanges comportant les différents pourcentages de substitution ce qui est totalement

logique vu la nature des granulats et leurs faibles résistances et aussi l'utilisation de quantité du ciment qui est proportionnel à la quantité des granulats.

Le mélange le plus performant en résistances est celui du M25, on remarque qu'on a un optimum inférieur de la résistance à la compression de l'ordre de 12 MPa pour le mélange P0Y100, au-delà de ce mélange la résistance regagné et atteint des valeurs comparable à celle de référence. Tandis que les deux autres taux de substitution ont une assez faible résistance par rapport à notre micro-béton témoin dont le M75 a diminué de 63% et le M50 à presque la moitié avec 48% ce qui est énorme en termes de perte de résistance. Cette chute est relative à la quantité de pâte réduit, et à la nature des granulats dont leurs masses volumiques absolues sont aux deux extrêmes l'une à l'autre, le polystyrène avec une densité de $43,32 \text{ kg/m}^3$ alors que celle du plastique est d'une valeur de $906,54 \text{ kg/m}^3$. On constate aussi que pour les mélanges hybride la résistance à la compression augmente d'une manière considérable est atteint des valeurs entre 12 et 17 MPa pour le mélange P100Y0.

Vu qu'une bonne adhérence fut remarquée aux observations faites par microscope optique surtout en cas des composites P100Y0 où la présence d'une grande cohésion entre granulat-pâte a été notée vu que la pâte épouse la majorité des différentes formes des grains, cela se reflète positivement sur les résultats obtenus pour les propriétés mécaniques.

b) Corrélation entre la résistance à la compression et la masse volumique

La résistance à la compression a une relation proportionnelle avec la masse volumique du matériau, plus il est dense plus la résistance augmente.

La **Figure 3.20** qui suit représente la variation et l'évolution de la résistance à la compression en fonction des densités pour les mélanges M25, M50 et M75 respectivement, en variant leurs différentes teneurs en plastique et en polystyrène.

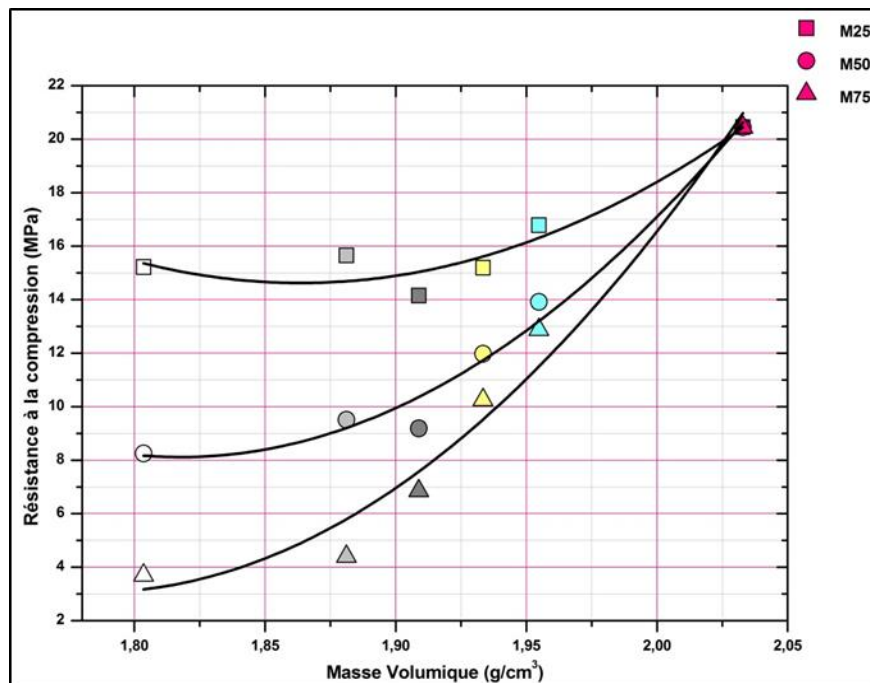


Figure 3.20. Résistance à la compression en fonction du dosage en granulats légers à 28 jours.

Les équations qui résultent des courbes présentés dans la **Figure 3.20** et qui indiquent la relation de l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la densité sont comme suit :

- **M25** : $R_c = 203,32MV_{abs}^2 - 757,85MV_{abs} - 720,84$ **avec $R^2=0.856$**
- **M50** : $R_c = 34,32MV_{abs}^2 - 98,2MV_{abs} + 78,39$ **avec $R^2=0.966$**
- **M75** : $MV_{abs} = 1,02MV_{abs}^2 + 16,78MV_{abs} - 17,67$ **avec $R^2=0.954$**

D'où :

R_c : Résistance à la compression.

A travers les courbes de tendances et en s'appuyant sur les coefficients de corrélation des différents mélanges M25, M50 et M75 présenté précédemment dans la **Figure 3.20** qui sont de $R^2 = [0,856, 0,966 \text{ et } 0,954]$ respectivement, on remarque qu'ils montrent qu'on a une bonne corrélation entre les deux facteurs variables des micro-bétons légers. On remarque aussi qu'on a une relation de puissance d'ordre 2 entre la résistance à la compression et la masse volumique, ces modèles peuvent être utile dans l'estimation de la résistance à la compression à partir de la masse volumique à l'état durci.

Notre constatation résume d'une manière générale que plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée et vice versa. Ces résistances restent bien dans les normes exigées pour un béton léger de construction et d'isolation (**classe II**) et pour

un béton d'isolation (**classe III**) conformément au classement fonctionnel de la [94] voir le **Tableau 1.2**.

On remarque aussi que le gain de résistance mécanique (résistance à la compression), se développe en majorité des composites pendant les premiers 07 jours, par contre une légère augmentation est remarquée après cette période, ce qui donne une idée favorable au mode de décoffrage en utilisant ce type de micro-béton et à la rapidité de l'exploitation.

Les résultats qui peuvent être tiré de cette étude consacré aux caractéristiques mécaniques sont résumés comme suit :

- Les caractéristiques mécaniques des micros-bétons légers élaboré s'avèrent très intéressantes dans la mesure où les caractéristiques mécaniques restent acceptables.
- Selon la quantité de plastique, il est possible d'avoir des résistances mécaniques intéressantes.
- La substitution de la matrice en granulats léger affecte les résistances mécaniques.
- L'augmentation de la teneur en plastique favorise la résistance à la compression

3.3.2.2 Résistance à la traction par flexion

Les résultats de la résistance à la traction par flexion de nos composites élaborés sont présentés dans le **Tableau 3.6**.

Tableau 3.6. Les résultats des résistances à la traction par flexion des MBL.

Mélange	M25					
N° Réf	Témoin	P0Y100	P25Y75	P50Y50	P75Y25	P100Y0
Rf7	3,070	3,715	3,773	2,344	2,703	2,594
Rf28	4,383	4,348	5,266	4,063	4,477	4,711
Mélange	M50					
N° Réf	Témoin	P0Y100	P25Y75	P50Y50	P75Y25	P100Y0
Rf7	3,070	2,133	2,500	2,359	2,477	2,820
Rf28	4,383	2,988	3,414	3,242	3,430	4,367
Mélange	M75					
N° Réf	Témoin	P0Y100	P25Y75	P50Y50	P75Y25	P100Y0
Rf7	3,070	0,797	1,148	1,070	1,891	2,320
Rf28	4,383	1,547	1,633	2,367	3,508	3,875

L'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de la teneur en granulats légers montre qu'elle diminue avec l'augmentation du taux de substitution bien qu'elle reste faible ce qui est normal et fréquent pour les bétons, connues pour leurs faibles résistances à la traction.

Le **Tableau 3.6** qui englobe les résultats des résistances à la flexion par traction des trois systèmes montre une décroissance dans les valeurs de la résistance à la traction en fonction du dosage en plastique et en polystyrène. Le taux de décroissance est de l'ordre de 41% pour le M75, 20% pour le M50 et 2 % pour le M25 que sa résistance n'a pas beaucoup chuté. Cette chute est à l'exception des M25P0Y100 et M25P25Y75 qui, leurs résistances à la flexion ont légèrement augmenté à 7 jours probablement due à la concentration de matrice dans la zone de rupture.

3.3.3 Caractéristiques thermiques

La connaissance du comportement thermiques des compositions « micro béton léger à base de granulats de plastique et de polystyrène » nécessite la détermination des différents paramètres thermiques : conductivité, diffusivité et chaleur massique, Rappelons que les impératifs qui ont conduit au choix de la méthode expérimentale employée au (voir paragraphe **2.4.2.4**) sont triples : d'une part, la technique « hot disk TPS » est relativement simple d'utilisation et présente une précision satisfaisante, la disponibilité du dispositif de l'essai au niveau du laboratoire de recherche de génie civil à l'université d'Amar Thelidji à Laghouat et d'autre part, il a été confirmé qu'elle ne perturbe pas la distribution de l'humidité dans les milieux poreux étudiés.

3.3.3.1 Conductivité thermique (w/m.K)

La conductivité thermique λ exprimée en W/m.K, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur, les valeurs moyennes des conductivités thermiques obtenues avec l'essai thermique basé sur le principe de fil chaud (Transient Plane Source), sont illustrées dans la **Figure 3.21**.

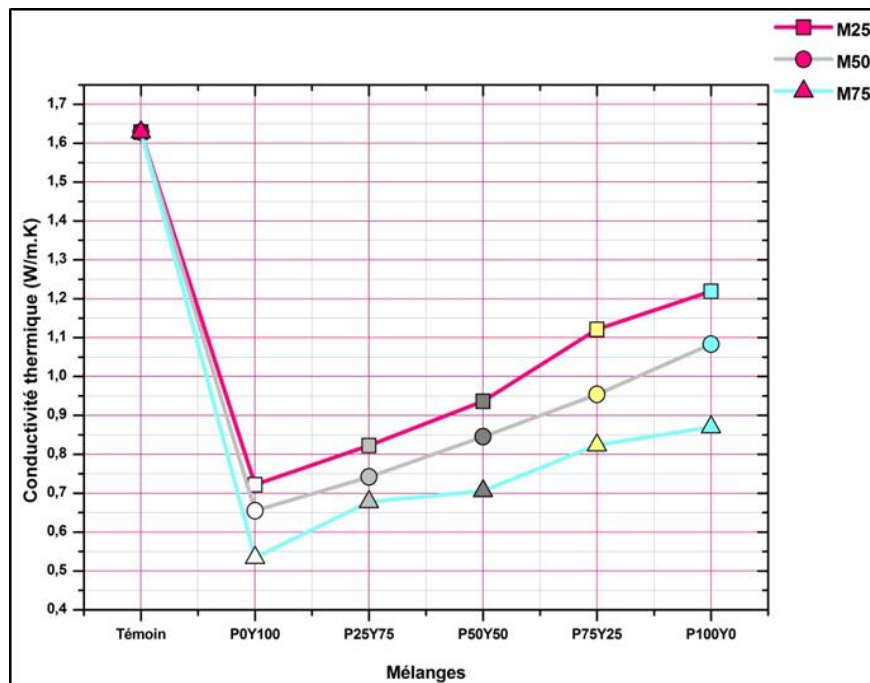


Figure 3.21. Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage en granulats.

D'après les résultats obtenus, on constate qu'il y a une diminution de la valeur de la conductivité thermique dans les compositions aux trois différents systèmes par rapport à notre témoin,

On remarque clairement que l'augmentation du taux de substitution fait diminuer les valeurs de la conductivité thermique λ . Par contre, au fur et à mesure de l'ajout des déchets de plastique, on obtient un effet qui, dans notre cas est relativement négative vu qu'il a une grande influence sur λ , cette dernière augmente avec l'augmentation du dosage en plastique, l'effet du déchet en plastique devient de plus en plus important pour en arriver à des valeurs de λ maximales de 1,219 W/m.K relative au composé (M25P100Y0). Par contre l'introduction du polystyrène dans les mélanges a affecté positivement la conductivité thermique et devienne plus en plus satisfaisantes comprise entre 0,534 et 0,655 et 0,722 W/m.K pour le mélange P0Y100 des trois systèmes respectivement. Avec des taux de réduction de 38,6%, 39,5% et 40,7% entre les mélanges qui contiennent uniquement du plastique et ceux qui contiennent uniquement du polystyrène.

Dreux et Festa [63] ont montré que les bétons de polystyrène expansés ont donné de bonnes isolations thermiques à travers le coefficient de conductivité de l'ordre de 0,20 pour des densités de 400 kg/m³ et 0.30 pour des densités de 800 kg/m³, ces résultats sont comparables à nos résultats, d'où notre micro-béton a donné de conductivité de l'ordre de 0.5, 0.6 et 0.7 pour des densités de 1142, 1456 et 1804 kg/m³ respectivement.

Parmi les facteurs qui influent sur la conductivité thermique des matériaux de construction, citons : la densité, la température, la nature du matériau, la porosité et la teneur en eau.

Afin de s'approfondir dans l'étude des caractéristiques thermiques, de différentes corrélations ont été réalisées.

3.3.3.2 Relation entre la conductivité thermique et la masse volumique

Il est évident qu'il y a une relation entre la densité et la conductivité, observé lors des essais précédents remarquant que quand la densité augmente la conductivité augmente aussi, cela est valable avec les trois systèmes de substitution.

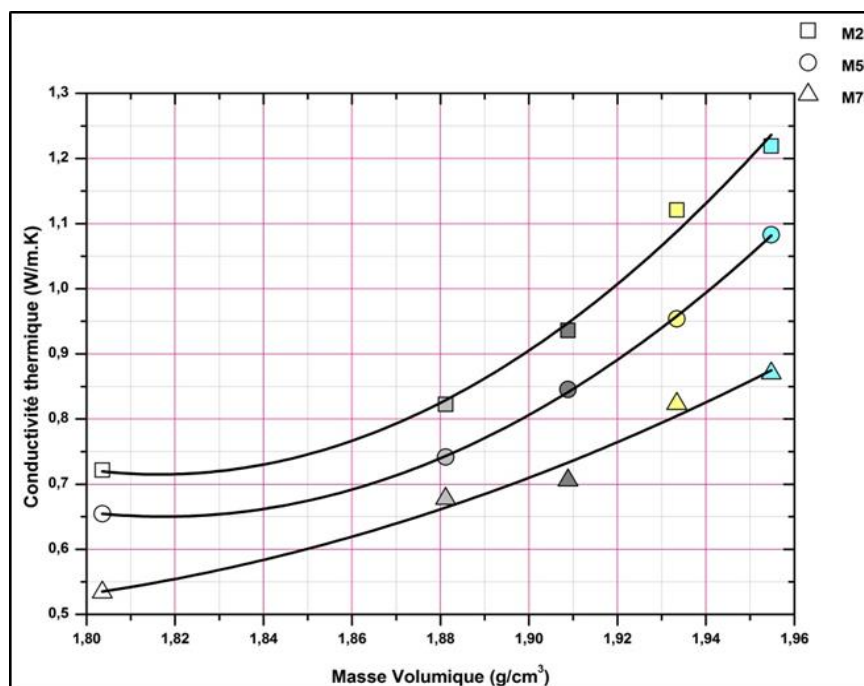


Figure 3.22. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

Le M75 a été noté comme le système ayant les densités les plus faibles et que sa conductivité est marquée la plus faible aussi ainsi de suite pour le restant des systèmes, la **Figure 3.22** illustre la variation de ces deux facteurs et la relation qui les relie.

Les équations tirées des courbes de tendances présentées dans la **Figure 3.22** exprimant la relation de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la densité sont présentées comme suit :

- **M25** : $MV_{abs} = 27,264\lambda^2 - 99,05013\lambda - 90,67735$ **avec $R^2 = 0,981$**
- **M50** : $MV_{abs} = 2,51445\lambda^2 - 7,05936\lambda + 5,60256$ **avec $R^2 = 0,996$**
- **M75** : $MV_{abs} = -0,18265\lambda^2 + 1,21843\lambda - 0,61076$ **avec $R^2 = 0,954$**

Notons que basé aux **Figure 3.22** et à travers les équations polynomiales des trois systèmes M25, M50 et M75, il y a une assez bonne concordance entre les masses volumiques et la conductivité thermique, représenté par des coefficients de corrélation satisfaisants de $R^2=0,98$, $0,99$ et $0,95$ respectivement pour M25, M50 et M75 et cela est totalement logique, quand un matériaux a une importante densité, sa conductivité thermique augmente et le contraire est prouvé avec les extrêmes systèmes M25 et M75.

Conclusion Générale

L'objectif de ce travail était de montrer les potentialités de développement et de l'élaboration d'un micro béton léger isolant à base de granulats provenant des coproduits industriels, le plastique issu du recyclage des sachets et le polystyrène expansé, dans une perspective de son utilisation dans l'allègement des différents éléments non porteurs de la structure.

Le but majeur de cette étude était d'examiner l'effet de l'ajout des granulats issu des déchets de polymères (polystyrène et/ou plastique) dans une matrice cimentaire suite à une substitution d'un certain pourcentage de cette dernière et cela sur le comportement physico-mécanique et thermique du matériau.

Les résultats obtenus montrent que :

- Plus le dosage en polystyrène augmente, plus le temps d'écoulement devient court et la maniabilité est améliorée, cela est probablement dû à la surface lisse des billes de polystyrène ainsi qu'à leurs formes parfaitement sphériques qui facilitent le frottement entre elles donnant une matrice ouvrable facile à mettre en œuvre,
- L'ajout des granulats de plastique affecte négativement les paramètres rhéologiques des composites et par conséquent leur ouvrabilité et cela semble être dû à la surface et forme semi angulaire des granulats.
- Les mélanges avec seulement de polystyrène, présentent les masses volumiques les plus faibles de l'ordre de $1,14 \text{ g/cm}^3$ pour un taux de substitution maximal par rapport aux mélanges avec du plastique de l'ordre de $1,95 \text{ g/cm}^3$ pour la substitution minimale.
- Pour les systèmes hybrides en granulats, la masse volumique de mélange P25Y75 a rechuté par rapport au témoin, cela semble être à cause de la quantité supplémentaire de polystyrène, alors que le P50Y50 et P75Y25 la regagnent en masse, ce gain est dû à la quantité de plastique d'où ces masses volumiques varient dans un intervalle de $[1,28-1,93] \text{ g/cm}^3$ pour tous les systèmes.
- Pour les dosages en plastique et/ou polystyrène des systèmes M50 et M75, des masses volumiques inférieures à 1800 kg/m^3 réglementairement préconisées pour les bétons légers ont pu être atteintes.
- Plus la quantité en granulats augmente plus la porosité deviens importante.

- L'absence des granulats fins (sable et ciment) cause une porosité assez remarquable et par conséquent plus de légèreté.
- La grande teneur en granulats au système M75 affecte négativement la compacité de la partie solide et par conséquent cela influe sur la porosité.
- Plus le taux de substitution diminue, plus l'absorption capillaire devient importante.
- La diminution de mortier dans le micro-béton défavorise l'absorption capillaire.
- Plus les grains sont en grande proportion dans la matrice, plus les pores intergranulaires deviennent grands et plus l'absorption diminue.
- La présence des granulats légers (plastique et/ou polystyrène) empêche l'infiltration d'eau par capillarité.
- Les caractéristiques mécaniques des micros-bétons légers élaborés s'avèrent très intéressantes dans la mesure où les caractéristiques mécaniques restent acceptables variant de l'ordre de 3,735 à 16,784 MPa.
- L'utilisation des déchets plastique de (type PE), améliore remarquablement la résistance à la compression
- Les matériaux à base de plastique s'avèrent avoir une conductivité thermique plus élevée de l'ordre de 0,87, 0,1083 et 1,219 W/m.K pour les systèmes M75, M50 et M25 respectivement par rapport à ceux à base de polystyrène qui eux ont une assez faible conductivité thermique de 0,534, 0,655 et 0,722 W/m.K
- En matière d'isolation thermique, les résultats des essais réalisés sur les micros-bétons élaborés à base de granulats de plastique et de polystyrène ont montré des performances thermiques très appréciables avec une valeur minimale de 0.53 W/m.K présentant un taux de réduction de 67% par rapport aux béton témoin

A la fin de cette étude, nous pouvons dire que l'utilisation de ce type de micro-béton semble être une vraie alternative dans le domaine de la construction surtout en matière d'isolation à travers la préfabrication de plaques destinées à l'usage immédiat dans le but de l'isolation ainsi que pour les éléments susceptibles à être porteurs-isolants.

Recommandations et perspectives

Cette recherche a été limitée à l'étude l'effet des granulats de polymères sur le comportement rhéologiques, physico-mécaniques et thermiques des micros bétons légers

D'autres aspects restent à élucider et enrichir dans des futurs travaux de recherche, nous recommandons ce qui suit :

- Utiliser des déchets de plastique et de polystyrène avec la composition C/S=2/3 au lieu de 1/3 pour avoir des performances mécaniques meilleurs ;
- Etude des paramètres rhéologiques et la pompabilité des micros bétons légers surtout dans l'application pour les chapes ;
- Mesure des propriétés du transfert pour ce type du béton ;
- Développer un micro-béton léger avec l'utilisation de deux techniques d'allègement en utilisant les granulats légers et la technique d'élimination des fines existent dans le sable ou bien la combinaison entre les granulats légers et l'utilisation des adjuvant entraîneur d'air ;
- La réalisation des essais approfondies sur la porosité tel que la mesure par le porosimètre à mercure d'où la possibilité de quantifier la quantité et le diamètre des pores.

Annexes

Annexe A. Interface du fichier de formulation pour la confection des 144 éprouvettes prismatiques (4x4x16) des 16 différents composites élaborés lors de notre étude expérimentale, Exemple pris M50P50Y50

Feuille de formulation & composition des matériaux constituant du béton	
Date :	
Heure :	
Température au labo :	°C
N° Référence :	M50P50Y50
% du volume de la matrice	50
% de Plastique (P)	50
% de Polystyrène (Y)	50
Les données à faire entrer dans les cellules en rouge	
Quantité a mélangé	

S/C	3
E/C	0,525
%SP	2

Matériaux	Sable	Ciment	Plastique	Polystyrène	Eau	SP	
Densité (kg/m ³)	2654,88	3000	906,54	43,32	1000	1000	
Absorption (%)	0,99	/	0,00	77,37	/	/	

Mortier Témoin		
	M	V
Ciment	497,93	165,98
Sable	1493,78	562,65
E _{aefficace}	261,41	261,41
Eau absorbée	14,79	14,79
E _{autotale}	276,20	276,20
Super plastifiant	9,96	9,96
Volume Total		1000,00

		% Y	50
Quantité par 1 m ³			Quantité à mélanger En Litre
% du volume de la matrice a substitué	50		2
M(Kg)	V(L)		Dosages en gramme
Ciment	357,85	119,28	Ciment 715,69
Sable	1073,54	404,36	Sable 2147,08
Granulats légers	139,70	281,33	Granulats légers 279,41
Billes de polystyrène	6,09	140,66	Billes de polystyrène 12,19
Billes de plastique	127,52	140,66	Billes de plastique 255,03
E _{aefficace}	187,87	187,87	E _{aefficace} 375,74
Eau absorbée	118,59		Eau absorbée 237,43
E _{autotale}	306,59	306,59	E _{autotale} 613,17
Super plastifiant	7,16	7,16	Super plastifiant 14,31
		1000,00	

Annexe B. Confection des différentes éprouvettes



B.1. Mise en moule des composites



B.2. Composites après démoulage et séchage à l'aire libre

Annexe C. Aspect et distribution granulaire des déchets dans le micro-béton.



C.1. Distribution granulaire de l'ensemble des mélanges



C.2. Distribution granulaire M75

Annexe D. Les photos dans la figure **D.1** présentent le dispositif et les échantillons utilisés pour l'essai d'absorption capillaire.



D.1. Disposition des éprouvettes dans le bac à eau

Annexe E.



D.2. Microscope optique utilisé.

Références bibliographiques

- [1] A. Ziregue, « Valorisation de coproduits industriels influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment », Thèse de Magistère, Université de Laghouat-Amar Telidji, 2005.
- [2] F. Hernández-Olivares, M. R. Bollati, M. del Rio, et B. Parga-Landa, « Development of cork-gypsum composites for building applications », *Construction and Building Materials*, vol. 13, no 4, p. 179-186, juin 1999.
- [3] Bederina, M et Makhloufi, Z, « Allègement des bétons de sables locaux par ajout de copeaux de bois traités et non traités - caractérisation physico-mécanique et microstructur. 1st international conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries », Enset, Oran, 2009.
- [4] A. Bessi et A. Meghezzi, « étude des propriétés thermiques et caractérisation des Mélanges à base de polystyrène (PS) – polyéthylène (PE) », 2005.
- [5] « Déchet de plastique affectant la nature ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.planete-durable.com/le-recyclage-des-dechets-plastiques-comment-ca-fonctionne/>.
- [6] Salazi, .
- [7] « Recyclage de plastique (polyéthylène) ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.servipac-salazie.com/recyclage-dechets/polystyrene>.
- [8] « Solution pour minimiser la consommation d'énergie ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ecocem.fr/developpement-durable-definition/>.
- [9] « Isolation Thermiques ». [En ligne]. Disponible sur : <https://sites.google.com/site/tpeisolationthermique/>.
- [10] Adam M. Neville, Propriétés des Bétons, Eyrolles. Paris, France, 2000.
- [11] Contant. M, « Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux », Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure, L'université du Québec, Montréal, 2000.
- [12] O. Herihiri, « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. », Université Mohamed Khider-Biskra, 2010.
- [13] N.E. Kedjour, « Propriétés et pathologie du Béton », 1993.
- [14] « ACI 213R-87, Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete ».
- [15] Kass. J. L et D. Compbell, Functional classification of lightweight concrete, Matériaux et Constructions, vol. N°5, N°27 vol. 1972.
- [16] « Rilem bimestriel : Porosité accessible à l'eau, Vol.13-N° 75, P176 », juin 1980.
- [17] Mazouz Laid, « Contribution à l'étude des bétons légers à base de pouzzolane et de polys bétos », Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2010.
- [18] V. Cerezo, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique », Doctorat, INSA de Lyon, 2005.
- [19] J. Åstrand, L. Bessadi, E. Johansson, S. Laïd, H. Teggour, et N. Toumi, Matériaux thermiquement isolants : béton mousse: panneaux en laine de bois. Lund Centre for Habitat Studies, Lund University, 1994.
- [20] D. I. Buckley et J. Ramachandran, « Characterization of corticotropin receptors on adrenocortical cells », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 78, no 12, p. 7431-7435, 1981.
- [21] A. Steopoe, « La durabilité du béton Eyrolles », Paris, France, 1970.
- [22] P. Cormon, Bétons légers d'aujourd'hui. Édition Eyrolles, 1973.
- [23] L. H. Nguyen, « Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique », Cergy-Pontoise, 2013.

- [24] Y. Ke, « Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers: expérience et modélisation », Cergy-Pontoise, 2008.
- [25] Ferhat. A, « Caractérisation physicomécanique à court terme d'un béton léger élaboré à partir d'agrégat pouzzolanique », Université d'Oran, Algérie, 2002.
- [26] M. Arnoud et M. Virlogeux, « Granulats et bétons légers, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées », 1986.
- [27] J. P Yvrard, Doctorat, L'université de Lille, Lille, France, 1998.
- [28] R. Cabrillac, W. luhowiak, et R. Duval, « Etude expérimentale de mise au point de matériaux porteurs légers à partir de laitier de magnésium, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux public, N°471 », 1989.
- [29] Ü. der Programmleiter, « Recherche énergétique Energie-Forschung 2006 ».
- [30] « Matériaux de construction ». [En ligne]. Disponible sur: <http://iusti.univ-mrs.fr>.
- [31] « F.A.Q, isolation thermique ». [En ligne]. Disponible sur: <http://users-skynet.be>.
- [32] « Le béton léger, Séance du comité technique », 1975.
- [33] M. Virlogeux, « Généralités sur les caractères des bétons légers », Arnould and M. Virlogeux, editors, Granulats et bétons légers, p. 111-246, 1986.
- [34] M. Shink, « Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers », 2003.
- [35] G. Dreux et J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants. Eyrolles, 1995.
- [36] O. Herihiri, « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. », Université Mohamed Khider-Biskra, 2010.
- [37] Guergab. Z et Abdelali. H, « Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre léger à base de granulats de polystyrène expansé. », Master.
- [38] B. O. Habiba, « Performance d'un composite sable de dune-ciment et granulats de polystyrène expansé », Thèse de Magistère, Université de Laghouat-Amar Telidji, 2012.
- [39] N. Chafi, « Matrice cimentaire renforcée de fibres. Valorisation des sous produits (Polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois) », 2005.
- [40] Soraya Mahiout, « Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.) », 2014.
- [41] K. Miled, « Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé », Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, spécialité : mécanique, structure et matériaux, 2005.
- [42] P. Heim, O. de Linares, et L. Hym, « Technique de l'ingénieur, « Traité plastiques et composites : Polystyrène et copolymères de styrène ». AM 3340, 2002 », K. BOUMERDASSI Références Bibliographiques, p. 1-8.
- [43] P. Soroushian, S. Marikunte, et J.-P. Won, « Wood fiber reinforced cement composites under wetting-drying and freezing-thawing cycles », Journal of materials in civil engineering, vol. 6, no 4, p. 595-611, 1994.
- [44] S. Benimam, F. Debieb, M. Bentchikou, et M. Guendouz, « Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton », MATEC Web of Conferences, vol. 11, p. 01033, 2014.
- [45] S. B. Kim, N. H. Yi, H. Y. Kim, J.-H. J. Kim, et Y.-C. Song, « Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete », Cement and concrete composites, vol. 32, no 3, p. 232-240, 2010.
- [46] M. Guendouz, F. Debieb, et E. H. Kadri, « Formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques », p. 10.
- [47] B. S. Agani et A. D. Tchelhuali, « Perméabilité et caractéristiques physiques et mécaniques du béton contenant des granulats enrobés du fondu de sachets plastiques », EPAC/UAC, 2014.
- [48] Y. Ghernouti, B. Rabehi, B. Safi, et R. Chaid, « Use of recycled plastic bag waste in the concrete », p. 9.

- [49] N. P 94-056, Sols : Reconnaissances et essais, analyse granulométrique, méthode de tamisage à sec après lavage. Association Française de Normalisation France.
- [50] N. N. AFNOR, EN 933-2-Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie 2 : détermination de la granularité-Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures. AFNOR, 1996.
- [51] « NF P 18-360 Détermination du module de finesse de sable ».
- [52] N. EN, « 933-8 », IN1 (Juillet 2015) : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie, vol. 8, 2015.
- [53] « EN 933-8 », IN1 (Juillet 2015) : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie
- [54] « NF P 18-598 Equivalent de sable », nov-1979.
- [55] R. Dupain, R. Lanchon, J.-C. Saint-Arroman, et A. Capliez, Granulats, sols, ciments et bétons: caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. Casteilla, 2000.
- [56] « NF P 18-555 Mesure de la masse volumique, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux. », déc-1980.
- [57] S. Etienne, L. David, E. Gaudry, P. Lagrange, J. Ledieu, et J. Steinmetz, Les Matériaux de A à Z, 300 entrées et des exemples pour comprendre. Dunod, Paris, 2008.
- [58] N. EN, « 933-1., 2006 », Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- Partie 1: détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, vol. 1.
- [59] « NF EN 933-2 Détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 », 02-mai-1996.
- [60] A. El Bouardi, H. Ezbakhe, T. Ajzoul, et V. Wittwer, « Propriétés thermo-physiques lors de changement de structure granulaire-compact. Mesures et identifications ; application aux matériaux à matrice déformable et expansés a l'air : cas de la vermiculites et polystyrène », Air: Cas de la Vermiculites et Polystyrène, p. 311-314.
- [61] D. WYART, « Les polymères biodégradables », Techniques de l'ingénieur. Plastiques et composites, no AM3579, 2007.
- [62] R. Kettab, « Contribution à la valorisation du sable de dunes », Thèse de Doctorat d'état Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2007.
- [63] G. DREUX, J. FESTA, Nouveau guide du béton et e ses constituants, Eyrolles. Paris, France, 1989.
- [64] J. BARON, Les bétons-bases et données pour leur formulation. 1996.
- [65] « EN 196-1 Déterminer la contrainte de flexion, de traction et de compression d'un mortier ».
- [66] B. EN, « 12350-2, "Testing fresh concrete-Part 2 : Slump test" », European Committee for Standardization, 2009.
- [67] « NF P 18-452 Bétons - Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers au maniabilimètre ».
- [68] J.-P. Laurent, « Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d'outils de mesure" in-situ" des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre », Grenoble INPG, 1986.
- [69] « NF P. 18-407 Bétons - Essai de flexion ».
- [70] « NFP 18-406 Bétons - Essai de compression ».
- [71] Assié Stéphan, « Durabilité des bétons autoplaçant », INSA, Toulouse, France, 2004.
- [72] « NF EN 13057 Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de l'absorption capillaire », 2002.
- [73] Goual M. S, « Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation d'un co-produit argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : caractérisation et comportement thermique », Doctorat d'état, ENSP, Alger, Algérie, 2001.

- [74] Bessenouci M. Z, « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolanique dans l'habitat », Magistère, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2009.
- [75] « American Concrete Institute. Guide pour le béton de structure à base de granulats légers, SDT BTP. », Traduction du CATED, 1970.
- [76] Belmecherie O.H, « performance d'un composite sable de dune-ciment et granulats de polystyrène expansé », Magistère, Université Amar Telidji, Laghouat, Algérie, 2012.
- [77] Goual M. S, « Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation d'un co-produit argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : caractérisation et comportement thermique », Doctorat d'état, ENSP, Alger, Algérie, 2001.
- [78] M. Bentchikou, S. Hanini, K. Silhadi, et A. Guidoum, « Elaboration et etude d'un mortier composite a matrice minerale et fibres cellulosiques : application a l'isolation thermique en batiment », Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 34, no 1, p. 37-45, 2007.
- [79] Ismail, Z et A Al-Hashmi, E, « Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement ».
- [80] N. Saikia et J. de Brito, « Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation : A review », Construction and Building Materials, vol. 34, p. 385-401, sept. 2012.
- [81] Y. W. Choi, D. J. Moon, Y. J. Kim, et M. Lachemi, « Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles », Construction and Building Materials, vol. 23, no 8, p. 2829-2835, 2009.
- [82] Nabajyoti Saikia et Jorgede Britoa, « Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate », p. 236-244, févr. 2014.
- [83] O. Y. Marzouk, R. M. Dheilly, et M. Queneudec, « Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites », Waste management, vol. 27, no 2, p. 310-318, 2007.
- [84] A. Ziregue, « Valorisation de coproduits industriels influence de differents facteurs d'allegement sur les caracteristiques physico-mecaniques et thermiques d'un beton a matrice calcaire-ciment », Thèse de Magistère, Université de Laghouat-Amar Telidji, 2005.
- [85] S. Akçaözöglü, C. D. Atiş, et K. Akçaözöglü, « An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete », Waste Management, vol. 30, no 2, p. 285-290, févr. 2010.
- [86] P. Heim, O. Linarès, et L. Hym, Polystyrène et copolymère de styrène, Technique de l'Ingénieur. 2002.
- [87] Belmechrie O.H, « Performance d'un composite sable de dune-ciment et granulats de polystyrène expansé », Magistère, Université Amar Telidji, Laghouat, Algérie, 2012.
- [88] Y. Xu, L. Jiang, J. Xu, et Y. Li, « Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick », Construction and Building Materials, vol. 27, no 1, p. 32-38, févr. 2012.
- [89] Christopher H, « Water sorptivity of mortars and concrete : a review », p. 51-61, 1989.
- [90] J. R. Philip, « The theory of infiltration : 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations », Soil science, vol. 84, no 3, p. 257-264, 1957.
- [91] Christopher H, « Water movement in porous building materials-I. Unsaturated flow theory and its applications », p. 117-125, 1977.
- [92] Christopher H, « Water movement in porous building materials-IV. The initial surface absorption and the sorptivity. Build. », p. 201-207, 1981.
- [93] M. Bederina, « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois », 2007.
- [94] « Rilem Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13.PP 60-69 », 1970.
- [95] « Le développement durable ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.momes.net/Apprendre/Societe-culture-generale/Le-developpement-durable/L-ecologie-expliquee-aux-enfants>.

- [96] « Recyclage du plastique ». [En ligne]. Disponible sur : http://www.cndp.fr/crdp-toulouse/IMG/pdf/50Investigation_35_cycle_du_recyclage_des_bouteilles_et_flacons_plastiques.pdf.
- [97] « Recyclage du polystyrène ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.pinterest.co.kr/pin/511932682618963892/?autologin=true>.
- [98] « Déperditions d'une maison ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.gfcc83.com/page42.html>.
- [99] « Isolation thermique des bâtiments ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.alec37.org/sites/default/files/ged/Isolation%20thermique%20des%20batiments.pdf>.
- [100] « Béton cellulaire ». [En ligne]. Disponible sur : <https://ostroymaterialah.ru/bloki/penoblok-i-gazoblok-raznica.html>.
- [101] « Béton de granulats légers ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.constructioncayola.com/batiment/article/2015/04/02/99721/l-ere-des-blocs-beton-granulats-legers>.
- [102] « Béton caverneux ». [En ligne]. Disponible sur : <https://appi-2015.wixsite.com/archi/betoncaverneux>.
- [103] « Système de recyclage du plastique ». [En ligne]. Disponible sur : <https://slideplayer.com/slide/10650750/>.
- [104] « Fiche Technique ciment LAFARGE Réf DCFT MT v03.pdf ».
- [105] « Essais sur mortier normal ». [En ligne]. Disponible sur : <http://archisouf.yoo7.com/t116-topic>.
- [106] « Etude des transferts thermiques dans les matériaux poreux.pdf ».