



République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaia

Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Spécialité : structure

Mémoire présenté par :

AIT SAHEL Lynda

AYADI Manissa

En vue d'obtention du Diplôme de Master en Génie Civil

Thème :

***Elaboration et Caractérisation d'un
mortier allégé à base de polystyrène***

Encadré par :

Mr. MEZIANI Belkacem

Co-encadré par :

Mr. SI AHMED Chabane

Président de jury : BOUROUBA.A

Examineur : ATTAL.R

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Suite à l'élaboration de ce travail, et avant toute chose, nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la santé, et la patience pour mener à bout ce travail humble.

Le présent travail n'est pas seulement le fruit de nos efforts, mais également celui des personnes à qui nous devons l'expression de nos vifs remerciements.

Nous adressons notre profonde reconnaissance et nos vifs remerciements à notre encadrant

***M^r MEZIANI Belkacem** et notre **Co-encadrant M^r SI AHMED Chabane** pour leurs confiances qu'ils nous ont témoignés en acceptant la direction de notre travail. Nous leurs sommes reconnaissantes de nous avoir fait bénéficier tout au long de ce travail, de leurs grandes compétences, de leurs rigueurs intellectuelles, pour leurs conseils et leurs suivis durant notre travail.*

*Nous tenant ainsi à exprimer nos remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de notre travail à l'ensemble de personnel du **Laboratoire des Travaux Publics de Bejaia (LTPE)** pour leur accueil chaleureux et de nous avoir permis de se sentir à l'aise au sein de leur organisme.*

*Nous remercions notre maître de stage, Mme **Kahina Oussalah**, qui nous a conseillé, aidé et guidé pendant le stage, et qui nous a accordé sa confiance en nous attribuant des missions valorisantes tout au long de notre stage pratique au **LTPE de Bejaia**.*

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous voudrions aussi exprimer notre reconnaissance envers nos familles, amis/es et collègues qui nous ont apporté leurs soutiens moral et intellectuel durant notre cursus.

A. Manissa & A. Lynda

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leurs exprimer mon amour sincère.

Aux êtres les plus chers à mon cœur ; mes très *chers parents*, qui ont attendu avec impatience les fruits de leur bonne éducation et de leur dévouement, leur soutien indéfectible a été la clé de ma réussite je leurs en suis éternellement reconnaissante,

A l'hommage de ma grand-mère *Salih*, que je garderai toujours dans mon cœur, à mes chers *grands-parents*, dieu leur donne une longue vie, que je remercie du fond du cœur pour leur soutien inconditionnel et leur sagesse qui ont illuminé mon chemin, particulièrement ma grand-mère *Zahra* qui ne m'a pas oublié dans ses prières et Douaa,

A mes très chères sœurs ; *Leila, Sihem* et *Céline* qui n'ont pas cessé de me conseiller et soutenir tout au long de mes études, ainsi qu'à mon futur neveu,

Mes adorables cousines ; *Sonia, Lynda* et *Kenza* qui m'ont toujours soutenues et encouragés durant ces années d'études,

A mes meilleures amies et âmes sœurs ; *Katia, Wissam* et *Aida* qui m'ont été une source inestimable d'inspiration et de motivation,

A mes copines adorées ; *Wissam, Naima* et *Mouna* avec qui j'ai partagés les meilleurs et les pires moments durant mon cursus,

Sans oublier ma chère binôme et copine *Lynda*, pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Manissa

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents, pour leurs amours inconditionnels, leur soutien indéfectible et leurs patiences infinies. Leurs impacts positifs et leurs encouragements quotidiens m'ont permis de surmonter les défis et d'atteindre mes objectifs académiques. Merci pour vos sacrifices et votre présence constante. Que ALLAH vous bénisse et vous protège.

À mon grand-père, pour sa sagesse et ses précieux conseils qui m'ont toujours inspiré.

*À la mémoire de **ma grand-mère**, dont l'amour et les encouragements vivent encore en moi. Sa générosité et bienveillance restent une source d'inspiration et de force.*

*À mes adorables **sœurs**, pour leur soutien constant, leur joie et réconfort, ainsi qu'à mes **chères tantes**, pour leurs conseils avisés et leur bienveillance tout au long de ce parcours.*

*À mon **cher oncle (Lyazid)** pour ses précieux conseils et son soutien, et à la mémoire de mon très **cher oncle (Nabil)**, dont l'influence et les encouragements résonnent toujours dans mon cœur. Votre sagesse et générosité m'ont profondément manqué.*

*À mes meilleures amies et âmes sœurs ; **Meriem, et Kenza** qui m'ont été une source inestimable d'inspiration et de motivation,*

*À mes copines adorées ; **Wissam, Naima et Mouna** avec qui j'ai partagés les meilleurs et les pires moments durant mon cursus,*

*Sans oublier ma chère binôme et copine **Manissa**, pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension essentielles tout au long du projet. Ton amitié précieuse et ton soutien constant sont vraiment appréciés.*

Enfin, Je suis profondément reconnaissant envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, que ce soit par leurs encouragements, conseils ou soutien. Merci à tous pour votre aide inestimable.

Lynda

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 Ciment.	4
Figure I.2 Hydratation de la pâte de ciment.	6
Figure I.3 Le sable.....	7
Figure I.4 Adjuvant plastifiant	10
Figure I.5 Pose de mortier de hourdage	14
Figure I.6 Enduits isolants.....	15
Figure I.7 chape.....	15
Figure I.8 Polystyrène	16
Figure I.9 Structure chimique du polystyrène.....	17
Figure I.10 Structure alvéolaire du polystyrène.....	18
Figure I.11 Polystyrène cristal	18
Figure I.12 Polystyrène à choc.....	19
Figure I.13 Polystyrène expansé.	20
Figure I.14 Entraîneur d'air.	23
Figure I.15 Les résistances mécaniques en flexion et compression.....	26
Figure I.16 Mousse de polyuréthane extrudé rigide et de polystyrène expansé utilisées.	26
Figure I.17 Propriétés mécaniques (R_c résistance à la compression ; E_{dyn} : module d'Young dynamique) des mortiers à 28 j.	27

Chapitre II :

Figure II.1 Quartage.....	30
Figure II.2 Echantillonneur.....	31
Figure II.3 Sable oued Zhor identification 0/1.....	31
Figure II.4 Les tamis.	32
Figure II.5 Résultat de la courbe granulométrique.	34
Figure II.6 Essai Equivalent de Sable	36
Figure II.7 Essai ES.	37
Figure II.8 Essai ES (sable + kaolinite).	38
Figure II.9 Valeur de bleu.....	38
Figure II.10 Le teste à la tâche.....	39
Figure II.11 Essai du pycnomètre	40
Figure II.12 Pycnomètre.	41
Figure II.13 Réalisation de l'essai au pycnomètre.	41
Figure II.14 Ciment.....	42
Figure II.15 Chatelier masse M1.	43
Figure II.16 Chatelier masse M2.	43
Figure II.17 Entonnoir.	44
Figure II.18 Appareil Vicat.....	45
Figure II.19 Graphique du d par rapport à E/C	46
Figure II.20 Appareil de vicat muni de l'aiguille.....	47
Figure II.21 Le temps de prise.	49
Figure II.22 Polystyrène de diamètre 6mm.....	50
Figure II.23 Polystyrène de diamètre 4mm.....	50

Figure II.24 Polystyrène de diamètre 2mm.....	51
Figure II.25 Les étapes de malaxage.....	54
Figure II.26 Coulage du mortier.	54
Figure II.27 Conservation des prismes	54
Figure II.28 Couverture des moules avec du film plastique.	55
Figure II.29 Conservation des éprouvettes dans l'eau après démoulage.....	55
Figure II.30 La pesé hydrostatique sature et sous l'eau.	57
Figure II.31 Appareils CT-mètre utilisé.....	58
Figure II.32 Machine de teste de flexion.	59
Figure II.33 Epreuve de mortier avant et après le teste de flexion.	60
Figure II.34 Machine de teste à la compression.....	60
Figure II.35 Epreuve de mortier soumis aux tests de compression.	61

Chapitre III :

Figure III.1 Le retrait en fonction du dosage de ciment.	62
Figure III.2 Évolution de la Masse volumique, porosité et absorption en fonction du dosage.	63
Figure III.3 La conductivité thermique en fonction du dosage.	64
Figure III.4 La résistance en fonction du dosage de ciment.	65
Figure III.5 La masse volumique en fonction de pourcentage Ps.....	66
Figure III.6 Absorption en fonction de pourcentage de PS.	67
Figure III.7 Evolution de la porosité en fonction de pourcentage de PS.....	67
Figure III.8 Essai de porosité.....	68
Figure III.9 Evolution de la conductivité en fonction du % PS.....	68
Figure III.10 Essai de conductivité thermique.....	69
Figure III.11 Evolution de la résistance en flexion en fonction de % Ps.....	70
Figure III.12 Essai de flexion.	70
Figure III.13 Evolution de la résistance en compression en fonction de % Ps.....	71
Figure III.14 Essai de compression.	71
Figure III.15 Evolution de la porosité en fonction du diamètre.	72
Figure III.16 Evolution de l'absorption en fonction du diamètre.....	73
Figure III.17 Evolution de la Mv en fonction de diamètre.	74
Figure III.18 La conductivité thermique en fonction du diamètre (mm).....	74
Figure III.19 Evolution de la flexion en fonction du diamètre (mm).	75
Figure III.20 Evolution de la compression en fonction de diamètre (mm).	76
Figure III.21 L'ajout de Polystyrène avec différents diamètres.	77

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau I.1 : Les masses volumiques des bétons avec le polystyrène.....	25
Tableau I.2 : La composition des mortiers	27

Chapitre II :

Tableau II.1 : Résultats de l'analyse granulométrique de sable 0/1	33
Tableau II.2 : Mode opératoire de l'essai de consistance et de prise.....	48
Tableau II.3 : Début et fin de prise de ciment	49
Tableau II.4 : Masse volumique apparente de polystyrène utilisé.	51
Tableau II.5 : Dosage et pesée des constituants	52

Table de matière

Remerciements	
Dédicace	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux :	
Résumé :	
Abstract :	
<i>Introduction générale</i>	1

Chapitre I : Etude Bibliographique

Introduction :	3
I.1 Les mortiers	3
I.1.1 Définitions :	3
I.1.2 Les Constituants des mortiers :	3
I.1.2.1 Le ciment :	4
I.1.2.1.1 Histoire de ciment :	4
I.1.2.1.2 Caractéristiques de Ciments :	5
I.1.2.1.3 Différents types de ciments :	5
I.1.2.1.4 L'hydratation de la pâte de ciment :	5
I.1.2.2 Le sable :	7
I.1.2.2.1 Définition :	7
I.1.2.2.2 Classification de sable :	7
I.1.2.2.3 Les types de sable :	8
I.1.2.2.4 le rôle de sable :	8
I.1.2.3 L'eau gâchage :	8
I.1.2.4 Ajout :	8
I.1.2.5 Adjuvant :	9
I.1.3 Différents types des mortiers :	10
I.1.4 Caractéristiques des mortiers	11
I.1.4.1 Ouvrabilité : (ou maniabilité) :	11
I.1.4.2 Prise :	12
I.1.4.3 Résistance mécanique	12
I.1.4.3.1 Flexion :	12
I.1.4.3.2 Compression :	13

I.1.4.4 Retrait et gonflement :	13
I.1.4.4.1 Le retrait :	13
I.1.4.4.2 Le gonflement :	13
I.1.4.5 Masse volumique apparente :	13
I.1.4.6 masse volumique absolue :	14
I.1.4.7 Porosité et compacité :	14
I.1.4.7.1 La porosité :	14
I.1.4.7.2 La compacité :	14
I.1.5 Domaine d'utilisation des mortiers :	14
I.2 Le polystyrène.....	16
I.2.1 Historique de polystyrène :	16
I.2.2 Composition chimique :	17
I.2.3 Les types de polystyrènes :	18
I.2.4 Polystyrène expansé :	20
I.2.4.1 Définition :	20
I.2.4.2 Fabrication de PSE :	21
I.2.4.3 Les avantages du PSE :	21
I.3.1 Définition :	22
I.3.2 Les avantages des mortiers alléger par rapport aux mortiers traditionnels :	22
I.3.3 Les techniques utiliser pour alléger mortier :	22
I.3.4 Mortier allégée dans la littérature :	23
I.3.5 Mortier allégée avec polystyrène :	25
Conclusion :	28

Chapitre II : Matériaux et Essais

Introduction :	29
II.1 Les essais de laboratoire :	29
II.2 Échantillonnage :	29
II.2.1 But et principe de l'échantillonnage :	29
II.2.2 Prélèvement sur le tas :	30
II.2.3 Échantillonnage en laboratoire :	30
II.2.3.1 Méthode de Quartage :	30
II.2.3.2 Echantillonneur :	31
II.2.4 Choix du procédé :	31
II.3 Caractérisation des matériaux :	31
II.3.1 Sable :	31

II.3.1.1 Analyse granulométrique	32
II.3.1.1.1 Définition :	32
II.3.1.1.2 But d'essai :	32
II.3.1.1.3 Principe d'essai :	32
II.3.1.1.4 Matériels nécessaires :	32
II.3.1.1.5 Mode opératoire :	32
II.3.1.1.6 Les résultat de l'Analyses granulométrique de sable 0/1:	33
II.3.1.2 La teneur en eau :	35
II.3.1.2.1 But d'essai :	35
II.3.1.2.2 Principe d'essai :	35
II.3.1.2.3 Mode opératoire :	35
II 3.1.3 Détermination de la propreté de sable (équivalent de sable)	35
II.3.1.3.1 But de l'essai :	35
II.3.1.3.2 Domaine d'application :	36
II.3.1.3.3 Principe de l'essai :	36
II.3.1.3.4 Matériels utilisés :	36
II 3.1.4 Essai Bleu de Méthylène	37
II 3.1.4.1 But d'essai :	37
II 3.1.4.2 Matériels nécessaires :	38
II 3.1.4.3 Produits utilisés :	38
II 3.1.4.4 Principe de l'essai :	38
II 3.1.4.5 Mode opératoire d'essai :	39
II 3.1.5 Méthode de pycnomètre (masse volumique):	40
II 3.1.5.1 But d'essai :	40
II 3.1.5.2 Principe d'essai :	40
II 3.1.5.3 Matériels nécessaires :	40
II 3.1.5.4 Mode opératoire d'essai :	40
II 3.2 Ciment :	42
II 3.2.1 Caractéristique du ciment :	42
II 3.2.2 Détermination de la masse volumique absolue du ciment :	43
II 3.2.3 Détermination de la masse volumique apparente du ciment :	44
II 3.2.3.1 Matériels utilisés :	44
II 3.2.3.2 Mode opératoire :	44
II 3.2.4 Essai de consistance :	45
II 3.2.4.1 Définition :	45
II 3.2.4.2 But de l'essai :	45

II 3.2.4.3 Principe de l'essai :	45
II 3.2.4.5 Mode opératoire :	45
II 3.2.5 Essai de prise :	47
II 3.2.5.1 Définition :	47
II 3.2.5.2 But d'essai :	47
II 3.2.5.3 Principe d'essai :	47
II 3.2.5.4 matériels nécessaires :	48
II 3.2.5.5 Mode opératoire :	48
II.3.3 Polystyrène :	49
II.3.3.1 Détermination de la masse volumique apparente du polystyrène :	50
II.3.3.2 Détermination de la masse volumique absolu du polystyrène :	51
II.3.4 Confection des mortiers allégée :	52
II.3.4.1 formulations des mortiers :	52
II.3.4.2 Préparation des moules :	53
II.3.4.3 Préparation des éprouvettes :	53
II.3.4.4 Malaxage :	53
II.3.5 Caractérisation physique des mortiers :	55
II.3.5.1 Masse volumique : (densité apparente) :	55
II.3.5.2 Absorption d'eau :	56
II.3.5.3 La porosité :	56
II.3.5.3.1 Mode opératoire :	56
II.3.5.4 Le retrait :	57
II.3.6 Caractérisation thermique des mortiers :	58
II.3.6.1 Conduite d'essai :	58
II.3.6.2 Résistance thermique :	58
II.3.7 Caractérisation mécanique des mortiers :	58
II.3.7.1 L'essai de flexion :	59
II.3.7.2 L'essai de compression :	60
Conclusion :	61

Chapitre III : Résultats et Discussion

Introduction :	62
III.1 Etude de l'influence du dosage de ciment : (témoin 0%)	62
III.1.1 Le Retrait :	62
III.1.2 La masse volumique la porosité et l'absorption :	63
III.1.3 La conductivité thermique :	64

III.1.4 La résistance mécanique :.....	65
III.2 Influence de l'ajout de pourcentage du PS :.....	66
III.2.1 La masse volumique :.....	66
III.2.2 Absorption :.....	67
III.2.3 Porosité :.....	67
III.2.4 La conductivité thermique :.....	68
III.2.5 La résistance mécanique en fonction dosage de Ps :.....	70
III.3 Influence de diamètre de l'ajout du PS :	72
III.3.1 La porosité :.....	72
III.3.2 Absorption :.....	73
III.3.3 Masse volumique :	74
III.3.4 Conductivité thermique :.....	74
III.3.4 La flexion :	75
III.3.5 La compression :	75
Conclusion :	77
<i>Conclusion générale</i>	78
<i>Les références</i>	
Annexe :	

Résumé :

Le mortier est un matériau largement utilisé dans le domaine de la construction. La tendance actuelle consiste à alléger davantage les matériaux, notamment avec l'introduction de composants légers comme le polystyrène. Ce dernier confère au mortier une densité réduite, ainsi qu'une meilleure isolation thermique et acoustique, tout en préservant les propriétés mécaniques du matériau.

Ce travail, présenté dans ce mémoire, a pour principal objectif d'étudier l'effet de l'introduction de billes de polystyrène dans les mortiers à différents pourcentages (0%, 0.5%, 1%), en variant différents diamètres (2mm, 4mm, 6mm). Plusieurs variantes d'éprouvettes prismatiques ont été élaborées. Une série de tests physiques, thermiques et mécaniques, comprenant des essais de détermination des masses volumiques, des essais de flexion trois points et de compression, a été réalisée pour estimer l'impact de cette addition sur les propriétés essentielles des mortiers légers par rapport aux échantillons témoins.

Les résultats obtenus confirment la diminution de la masse volumique et l'amélioration du comportement thermique des mortiers tout en conservant des résistances mécaniques acceptables, dans les limites préconisées par les règlements en vigueur.

Mots clés : Mortier, polystyrène, allégement, propriétés physico-mécaniques, isolation thermique.

Abstract :

Mortar is a widely used material in the construction field. The current trend is to make materials lighter, by introducing lightweight components such as polystyrene. These components give the mortar a reduced density, as well as better thermal and acoustic insulation, while preserving the mechanical properties of the material.

The main objective of this work is to study the effect of the introduction of polystyrene balls into mortars at different percentages (0%, 0.5%, 1%) and by varying the diameter (2mm, 4mm, 6mm). Several variants of prism tests have been developed. A series of physical, thermal and mechanical tests, including volume mass determination tests, three-point bending and compression tests, were carried out to estimate the impact of this addition on the essential properties of light mortars compared to control samples.

The results confirm the improvement in mortar lightness and thermal behaviour, while maintaining acceptable mechanical resistance in the regulation limits.

Keywords: Mortar, polystyrene, lightweight, physico mechanics properties, thermal insulation.

Introduction générale

Introduction générale

La recherche et le développement de nouveaux matériaux de construction répondent à des besoins croissants en matière d'efficacité énergétique, de durabilité et de réduction des coûts. Parmi ces matériaux, le mortier joue un rôle central dans de nombreuses applications de construction. Traditionnellement, les mortiers utilisés dans le secteur de la construction sont reconnus pour leur robustesse et leur capacité à former des structures solides et durables [1].

Les mortiers peuvent être :

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, y compris les adjuvants ;
- Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs pré-dosés, nécessitant simplement l'ajout de la quantité d'eau appropriée avant utilisation ;
- Livrés par une centrale, prêts à l'emploi.

Dans notre étude, le matériau étudié est un mortier allégé au polystyrène, réputé pour sa faible densité ainsi sa résistance.

Ainsi, cette recherche vise à répondre à la problématique suivante : comment élaborer un mortier allégé à base de polystyrène tout en maintenant ou améliorant ses propriétés physico-mécaniques et thermiques ? Les résultats attendus de cette étude pourraient ouvrir la voie à de nouvelles applications dans le secteur de la construction, favorisant des bâtiments plus durables et énergétiquement efficaces

L'objectif de cette étude est de formuler des mortiers allégés en intégrant divers pourcentages de polystyrène (0,5 %, 1 %) et en utilisant des billes de polystyrène de différents diamètres (2mm, 4mm, 6mm). Pour pallier les faiblesses structurelles potentielles, nous avons élaboré plusieurs variantes d'éprouvettes prismatiques. La variation du mortier est obtenue en modifiant le dosage et le diamètre des billes de polystyrène, tout en maintenant un rapport E/C (eau/ciment) constant.

Le mémoire est divisé en trois chapitres ; le chapitre I fait l'objet d'une étude bibliographique (La partie théorique), qui comporte une synthèse bibliographique sur les mortiers, le polystyrène et le mortier allégé avec des travaux de recherche (définitions, types, classifications et propriétés ...etc. et une revue sur les mortier léger). Le deuxième chapitre présente la caractérisation et les méthodes expérimentales, ainsi que les différents essais expérimentaux réalisés pour caractériser notre mortier. Dans le troisième Chapitre les Résultats et discussion sont

présente cette partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus après les caractérisations physiques, mécaniques et thermique des différents mortiers étudiés nous détaillerons les mesures de la masse volumique, l'absorption d'eau, ainsi que les performances mécaniques, incluant les résistances en compression et en flexion et la résistance thermique. Ensuite, nous présenterons une discussion approfondie des résultats obtenus. Pour terminer, une conclusion générale qui synthétise les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Etude Bibliographique

Introduction :

Le développement durable est devenu l'un des thèmes majeurs guidant le développement de nouveaux matériaux de construction. Ainsi, des synergies sont de plus en plus recherchées entre matériaux, surtout lorsque l'un d'entre eux est issu d'une filière de recyclage. L'utilisation de matériaux polymères recyclés dans les mortiers et bétons permet d'améliorer les propriétés finales, notamment en termes de légèreté, de propriétés thermiques et acoustiques.

I.1 Les mortiers :

I.1.1 Définitions :

Le mortier est un matériau de construction utilisé pour lier solidement les éléments entre eux, garantir la stabilité des ouvrages et remplir les interstices entre les blocs de construction. En général, le mortier résulte du mélange de sable, d'un liant (comme le ciment ou la chaux), et d'eau dans des proportions spécifiques, qui varient selon les applications, ainsi que d'éventuels adjuvants. [2]

I.1.2 Les Constituants des mortiers :

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- **Liant** (ciment ou chaux).
- **Sable**.
- **Eau** (pour obtenir la consistance souhaitée).
- **Ajout** : Les ajouts que l'on utilise dans les mortiers sont :
 - Poudres fines pouzzolaniques (cendres volante, fumée de silice...).
 - Fibres de différentes natures.
 - Colorants (naturels ou synthétiques).
 - Polymères
- **Adjuvant** : Les adjuvants qu'on peut utiliser dans le mortier sont :
 - Les plastifiants (réducteurs d'eau).
 - Les entraîneurs d'air.
 - Les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs).
 - Les hydrofuges etc.

I.1.2.1 Le ciment :

Le ciment est un matériau inorganique finement broyé qui, lorsqu'il est mélangé avec de l'eau, forme une pâte. Cette pâte subit un processus d'hydratation qui lui permet de durcir et de maintenir sa résistance et sa stabilité, même en immersion dans l'eau. Le ciment est un liant hydraulique obtenu à partir d'un ou de plusieurs composants, et il joue un rôle essentiel dans la formation du béton en agissant comme une colle pour lier les granulats et créer une masse solide similaire à de la pierre. [3]



Figure I.1 Ciment.

I.1.2.1.1 Histoire de ciment :

Bien que l'utilisation de matériaux cimentaires remonte à l'Antiquité, la compréhension scientifique et les progrès dans la fabrication du ciment sont plus récents. Voici un résumé des principales étapes de développement :

- En 1817, le français Louis Vicat a étudié et découvert scientifiquement les principes chimiques des ciments, définissant ainsi les règles de fabrication. Il est donc considéré comme l'inventeur du ciment moderne.
- En 1824, l'anglais Joseph Aspdin a pris un brevet pour la fabrication d'un ciment de Portland, mais sa méthode comportait encore des zones d'ombre.
- En 1845, l'anglais Isaac Charles Johnson a précisé de façon détaillée les règles de fabrication du ciment de Portland.
- À la fin du 19^{ème} siècle, le français Henri Le Chatelier a étudié la composition chimique des différents constituants des ciments. Ses travaux ont été perfectionnés et complétés par l'américain Robert Hanson Bogue au 20^{ème} siècle.

- En 1890, on a compris l'intérêt d'ajouter du laitier granulé au ciment. Après 1945, l'ajout de cendres volantes s'est également développé.

- Le ciment alumineux, un type de ciment spécial, a été découvert par l'ingénieur français Jules Bied en 1908.

En résumé, bien que l'utilisation de liants cimentaires soit très ancienne, les progrès scientifiques et techniques majeurs dans la compréhension et la fabrication du ciment moderne se sont produits entre le 19ème et le 20ème siècle, avec les contributions de scientifiques et ingénieurs français, anglais et américains. [4]

I.1.2.1.2 Caractéristiques de Ciments :

- Le ciment Portland est un liant hydraulique composé principalement de silicates de calcium hydrauliques qui durcissent par hydratation à l'eau.

- La composition du clinker du ciment Portland est normalisée, avec au moins deux tiers de silicates de calcium et une faible teneur en MgO.

- Le ciment CEM II 42,5 R est un ciment portland avec une teneur en clinker 80% à 94%.

- Les ciments courants comprennent le CEM I (Ciment Portland), le CEM II A-L, le CEM III, le CEM IV, et le CEM V/A, chacun ayant des caractéristiques spécifiques de composition et d'utilisation [3]

I.1.2.1.3 Différents types de ciments :

- Ciment Portland (CEM I).

- Ciment Portland composé (CEM II/A ou B).

- Ciment de haut fourneau (CEM III/A ou B).

- Ciment de haut fourneau (CEM III/C).

- Ciment au laitier et aux cendres (CEM V/A ou B).

- Ciments pouzzolaniques (noté CEM IV). [3]

I.1.2.1.4 L'hydratation de la pâte de ciment :

L'hydratation de la pâte de ciment implique plusieurs types de réactions :

- Des réactions chimiques exothermiques entre les constituants du ciment et de l'eau.

- Des réactions physiques associées au développement de la microstructure du béton.

- Des réactions mécaniques, résultant des variations cinétiques et des performances modulées par les réactions chimiques et physiques.

Ce processus complexe repose sur plusieurs mécanismes agissant simultanément :

La dissolution du ciment anhydre, la précipitation des hydrates et la formation d'une solution sursaturée. Lorsque les concentrations ioniques atteignent les seuils de solubilité des hydrates, un processus de germination commence. La précipitation des hydrates consomme les ions en solution, ce qui accélère la dissolution du ciment. Cette précipitation utilise de l'eau, et progressivement, les hydrates remplacent le volume occupé par l'eau et les grains de ciment anhydre. L'eau diminue au profit du solide, entraînant ainsi une réduction de la porosité.

L'hydratation du ciment comprend plusieurs étapes distinctes, chacune impliquant des réactions chimiques spécifiques entre les constituants du ciment et de l'eau. Ce processus se déroule en quatre phases :

a) La période de gâchage : Dès le début du gâchage, les différents composés du ciment commencent à se dissoudre pour former :

- Le silicate de calcium hydraté (C-S-H), un composé mal cristallisé ayant une structure intermédiaire entre celle des gels et des cristaux.

- La chaux hydratée, ou portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, notée CH en terminologie cimentaire). bien cristallisée sous forme de feuillets hexagonaux.

b) La période dormante :

Pendant quelques heures, les réactions chimiques se poursuivent lentement. Durant cette période, la formation des hydrates et la consommation d'eau sont faibles, permettant au béton de rester maniable. La fin de cette phase est caractérisée par une augmentation du flux thermique.

c) La période de prise :

Les cristaux de portlandite et le C-S-H commencent à s'entrelacer et à remplir progressivement les pores du matériau, conférant à la pâte une consistance accrue. C'est le début de la prise, où le matériau devient de plus en plus dense et solide.

d) La période de durcissement : Après plusieurs heures, la couche d'hydrates entourant les grains de silicates devient suffisamment épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau. Bien que l'hydratation se ralentisse, elle continue tant qu'il reste de l'eau dans les pores capillaires, contribuant à la solidification continue du ciment. [5]

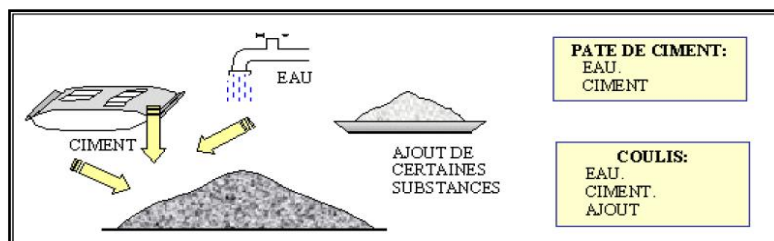


Figure I.2 Hydratation de la pâte de ciment.

I.1.2.2 Le sable :



Figure I.3 Le sable

I.1.2.2.1 Définition :

Le sable est un matériau granulaire meuble, composé de petits grains minéraux désintégration de tailles et de couleurs variables, principalement du quartz. Le sable est largement utilisé dans la construction (béton, mortier), la verrerie..., etc. [6]

I.1.2.2.2 Classification de sable :

- Selon la granulométrie [6]

Les classes de sable sont :

- Sable fin inférieur à 0.5mm.
- Sable moyenne 0.2 à 2mm
- Sable grossier 2 à 5 mm

- Selon la propreté [6]

La propreté d'un sable est essentielle, elle peut être réalisée à travers deux méthodes : soit en utilisant l'essai d'équivalent de sable, soit en recourant à l'essai de bleu méthylène.

On peut également classer les sables selon d'autre critère

La teneur en fines.

- La nature minéralogique (sable calcaire, siliceux, ...)
- La teneur en matière organique et sa nature.

I.1.2.2.3 Les types de sable :

Les sables se différencient par de nombreux paramètres. On peut les classer en deux grandes catégories :

- Les sables naturels.
- Les sables artificiels.

Les sables naturels :

Le sable naturel a une composition minérale et chimique plus complexe, car il provient de la désagrégation de différents types de roches. Il peut contenir des impuretés organiques Les plus rencontrés et les plus connus sont : les sables marins, les sables fluviatiles, les sables éoliens et les sables du Sahara [6]

Les sables artificiels :

Le sable artificiel sont des types obtenus de manière artificielle, souvent par le concassage ou le broyage mécanique de roches. Ces sables artificiels sont utilisés dans divers domaines tels que la construction de plages artificielles. [6]

I.1.2.2.4 le rôle de sable :

Le sable joue un rôle essentiel dans la construction en raison de ses propriétés qui le rendent indispensable pour diverses tâches de construction. L'introduction de sables dans un mortier vise à réduire le retrait du liant et à renforcer les propriétés mécaniques. Pour garantir une bonne qualité, les sables doivent avoir une granulométrie variée avec des grains fins, moyens et gros. Les grains fins sont positionnés entre les gros grains pour remplir les espaces vides, ce qui est essentiel pour réduire les variations de volume, les dégagements de chaleur. Il est recommandé de doser les sables par poids plutôt que par volume pour éviter les erreurs de dosage dues à l'expansion du sable humide. [7]

I.1.2.3 L'eau gâchage :

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis) et ne doit pas être ajoutée en excès. [8]

I.1.2.4 Ajout :

Les ajouts dans un mortier léger comprennent divers matériaux et additifs visant à réduire le poids et améliorer les propriétés spécifiques du mortier. Voici quelques exemples détaillés :

1. **Perlite** : Un matériau volcanique expansé, léger et isolant, qui améliore les performances thermiques du mortier.
2. **Vermiculite** : Un minéral expansé qui crée des granulats légers, offrant des propriétés isolantes et ignifuges.
3. **Billes de polystyrène expansé (EPS)** : Des petites sphères de polystyrène qui réduisent la densité du mortier, améliorant sa légèreté et son isolation thermique.
4. **Granulats de pierre ponce** : Roches volcaniques légères qui contribuent à la réduction du poids et à l'amélioration de la résistance thermique.
5. **Fibres** : Ajout de fibres synthétiques (comme le polypropylène) ou naturelles (comme les fibres de coco) pour améliorer la résistance à la traction et la durabilité.
6. **Additifs aéroenglobants** : Produisent de petites bulles d'air dans le mortier, augmentant sa légèreté et sa maniabilité.
7. **Cendres volantes** : Résidu de combustion du charbon, utilisé pour réduire la densité et améliorer la consistance et la maniabilité du mortier.
8. **Silice fumée** : Un sous-produit de la production de silicium et de ferrosilicium, qui améliore la résistance et la durabilité du mortier tout en réduisant son poids.
9. **Pouzzolane** : Une roche volcanique qui améliore la durabilité et la résistance chimique du mortier.
10. **Billes de verre expansé** : Matériau léger et isolant, utilisé pour réduire la densité et améliorer les propriétés thermiques et acoustiques du mortier.

Ces ajouts permettent de créer des mortiers légers adaptés à diverses applications, offrant des avantages en termes de réduction de poids, d'amélioration de l'isolation thermique et acoustique, de maniabilité et de performance globale [9]

I.1.2.5 Adjuvant :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui modifient les propriétés des bétons et des mortiers lorsqu'ils sont ajoutés en faible proportion, généralement inférieure à 5 % du poids du ciment. Ces produits sont essentiels pour améliorer les caractéristiques des matériaux de construction, en fonction de leur utilisation et des exigences spécifiques. Les adjuvants peuvent être classés en plusieurs catégories, notamment [10]

1. Plastifiants : Ces produits réduisent la quantité d'eau nécessaire pour la préparation du béton, ce qui facilite la mise en œuvre et réduit les coûts.

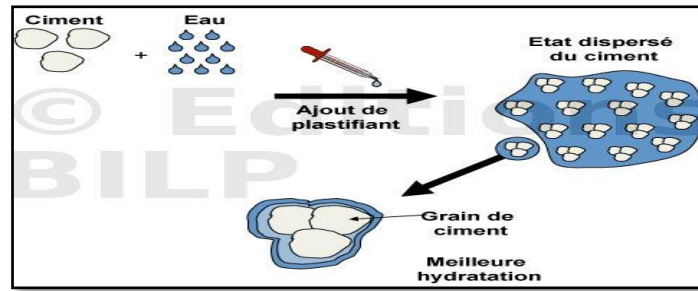


Figure I.4 Adjuvant plastifiant

2. Entraîneurs d'air : Ces adjuvants aident à introduire l'air dans le béton, ce qui améliore sa densité et sa résistance.

3. Modificateurs de prise : Ces produits peuvent être des retardateurs ou des accélérateurs, influençant le temps de prise du béton. Les retardateurs permettent une mise en œuvre plus lente, tandis que les accélérateurs accélèrent le processus de durcissement.

4. Hydrofuges : Ces adjuvants réduisent l'absorption d'eau par le béton, ce qui améliore sa résistance à l'eau et à la chaleur.

I.1.3 Différents types des mortiers :

Il existe une grande diversité de mortiers en fonction du liant utilisé, parmi lesquels :

Les mortiers de ciment :

Fabriqué avec du ciment Portland, offre une importante résistance à la traction et à la compression.

Les mortiers de chaux :

Produit avec de la chaux hydraulique, s'il offre moins de résistance que le mortier de ciment, il laisse respirer les murs car il est perméable à la vapeur.

Les mortiers bâtards :

Un mortier à base de ciment et de chaux, permet d'allier l'élasticité et la résistance.

Les mortiers rapides

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements.

Les mortiers réfractaires :

Le mortier-colle : Utilisé pour fixer des carreaux et autres revêtements, ce mortier offre une Meilleure adhérence et flexibilité.

Le mortier réfractaire est un type de mortier conçu pour résister à des températures élevées, généralement jusqu'à 900°C ou moins selon les formulations. Par conséquent, il est spécifiquement utilisé dans les constructions exposées à de telles conditions thermiques.

Les mortiers industriels :

Sont fabriqués à partir de composants secs soigneusement sélectionnés, emballés dans des sacs et contrôlés avec précision dans l'usine. Pour les utiliser, il suffit d'ajouter l'eau appropriée et de malaxer le mélange avant de le mettre en œuvre. Les fabricants offrent une large gamme de produits qui répondent à tous les besoins spécifiques des utilisateurs. [2]

I.1.4 Caractéristiques des mortiers

I.1.4.1 Ouvrabilité : (ou maniabilité) :

C'est un des facteurs qui gouverne la formulation d'un matériau cimentaire. Celle-ci, de son tour, dépend principalement des propriétés rhéologiques de ces matériaux à l'état frais. La rhéologie des mélanges cimentaires est un domaine relativement complexe à cause de leurs constitutions multi-composants : granulats, ciment, ajouts minéraux, eau, adjuvants. Ces matériaux, de nature différente en morphologie et granulométrie, présentent des divers comportements rhéologiques variés sous forme de mélange. D'après [Bombed, 1964], les gros granulats dans la composition d'un matériau cimentaire n'ont qu'un effet de masse, et le rôle le plus important dans la rhéologie de ces mélanges frais est joué par les éléments fins. En ajoutant des billes de verre dans le mélange, nous avons modifié la nature des particules fines. L'objectif de cette partie est d'examiner l'évolution du comportement rhéologique des suspensions cimentaires à deux échelles : pâte de ciment et mortier, en fonction de la concentration de MV. Ces résultats peuvent conduire ensuite à qualifier le dosage idéal des ajouts minéraux tels que les MV pour optimiser la rhéologie de ce matériau. Les suspensions de pâte de ciment et de mortier sont considérées comme des fluides de Bingham qui ne s'écoulent qu'au-delà d'une certaine contrainte seuil. Une série d'essais a été réalisée afin d'étudier l'influence de différentes concentrations de MV sur deux paramètres qui décrivent le comportement d'une suspension cimentaire : la consistance et la cohésion. Le premier est un indice de la mobilité (capacité de s'écouler) de la suspension à l'état frais, le second est un indice de sa stabilité (capacité d'empêcher la ségrégation). Plus précisément, ce sont deux grandeurs apparentées aux paramètres de Bingham: le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. [11]

I.1.4.2 Prise :

Le temps de prise est généralement mesuré sur une pâte pure de ciment ayant une consistance normale (24 à 30 % d'eau), conformément à la norme applicable, en utilisant l'appareil de Vicat. Il est possible de mesurer (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareil, mais en ajoutant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. L'aiguille pénétrant dans le mortier a un poids total de 1000 grammes. Le début de prise est défini comme le moment où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (correspondant à la taille des plus gros grains de sables), et la fin de prise est déterminée lorsque l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur. [2]

I.1.4.3 Résistance mécanique

Les essais de résistance mécanique des mortiers sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques normalisées de dimensions 4x4x16 cm. Ces éprouvettes sont conservées dans l'eau à une température de 20°C jusqu'au moment de l'essai. Les éprouvettes sont d'abord rompues en traction par flexion, puis chaque moitié est testée en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, augmentent de façon logarithmique avec le temps entre 1 et 28 jours. Les résistances mécaniques des mortiers dépendent de nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment
- Rapport eau/ciment (E/C)
- Granulométrie et nature du sable
- Énergie de malaxage et mise en œuvre
- Conditions de cure les premiers jours

La norme NF EN 196-1 décrit en détail la méthode permettant de déterminer la résistance à la compression et à la flexion d'un mortier de ciment. Cette méthode s'applique aux ciments courants et autres liants hydrauliques. Les résultats obtenus permettent de vérifier la conformité d'un ciment à sa spécification, mais aussi de valider l'utilisation d'un sable normalisé ou d'un équipement de malaxage. Les essais au jeune âge (24h, 48h, 72h) permettent de distinguer les ciments à hydratation rapide.

I.1.4.3.1 Flexion :

L'essai de flexion permet d'éviter les difficultés liées au comportement de rupture de l'éprouvette dans l'essai de traction. Cet essai est principalement utilisé pour évaluer les matériaux fragiles, en mettant en évidence leur comportement particulier à proximité de la surface testée [12]

I.1.4.3.2 Compression :

La résistance mécanique en compression d'un béton ou d'un mortier correspond à la charge de rupture pendant l'essai de l'encrassement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette prismatique de dimensions 4×4×16cm. La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton ou mortier [12]

I.1.4.4 Retraits et gonflements :

I.1.4.4.1 Le retrait :

Lorsque l'élément du béton ou mortier se trouvera dans une atmosphère ayant une humidité relative inférieure à celle d'équilibre de l'élément, les dimensions de ce dernier diminuent : C'est le retrait. On mesure le retrait sur des éprouvettes prismatiques de mortier de 16 cm de longueur et d'une section carré de (4x4) cm, conservées dans l'air à une température de 20°C et une hygrométrie de 50%.

Les principaux paramètres agissant sur le retrait sont :

- La nature du ciment
- La finesse de mouture
- Le dosage en ciment, dans le béton
- Le dosage en eau
- La propreté et nature des granulats [13]

I.1.4.4.2 Le gonflement :

Le gonflement observé après la prise est dû à la constitution d'hydrates massifs comme la portlandite, Ca(OH) dont la croissance fait pression sur l'ensemble de la structure et en provoque la dilatation. Ce gonflement s'oppose en partie au retrait et est lié à la quantité de chaux libre non hydratée restant après le début de la prise. Si cette quantité est faible, le gonflement pourra être négligeable. [13]

I.1.4.5 Masse volumique apparente :

La masse volumique d'un corps est la quantité de masse qu'il contient par unité de volume apparent en état naturel, incluant les vides et les capillaires. Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³ ou t/m³). [14]

I.1.4.6 masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine, c'est-à-dire le volume constitué uniquement par la matière du corps, excluant les vides et les pores. Elle est exprimée en g/m^3 kg/m^3 ou t/m^3 . [14]

I.1.4.7 Porosité et compacité

I.1.4.7.1 La porosité :

La porosité est un indicateur clé de la qualité globale d'un matériau. Elle est étroitement liée à la résistance à la compression ; une diminution de la porosité (due à une réduction du rapport Eau/Ciment) entraîne une augmentation de la résistance et de la durabilité du matériau. Les caractéristiques du réseau poreux jouent un rôle crucial dans la durabilité du béton. [15]

I.1.4.7.2 La compacité :

La compacité granulaire améliore la maniabilité du mortier et permet de réduire la quantité de pâte de ciment nécessaire. Une plus grande compacité rend le mortier plus plastique à quantité de pâte égale. Les plastifiants, ou réducteurs d'eau, réduisent la quantité d'eau, augmentent la compacité pour renforcer les résistances, facilitent la mise en place, améliorent la maniabilité en réduisant la ségrégation. La compacité est définie comme le rapport du volume des pleins sur le volume total. [16]

I.1.5 Domaine d'utilisation des mortiers :

Hourdage de maçonnerie :

La construction en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques) nécessite l'assemblage de ces éléments avec un mortier possédant des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité adéquate pour garantir l'étanchéité.



Figure I.5 Pose de mortier de hourdage

Enduits :

Ce domaine d'application représente l'un des principaux débouchés des mortiers. En plus des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201-1 et 2 (DTU 26.1), des enduits monocouches épais et des enduits isolants sont également en développement.



Figure I.6 Enduits isolants

Chapes :

Les chapes ont pour rôle de niveler le dallage et d'assurer la régularité de sa surface. Elles peuvent constituer la finition, souvent avec l'incorporation de produits spécifiques, ou servir de support à un revêtement de sol. Les chapes doivent être suffisamment résistantes pour transmettre les charges au support et, parfois, résister à l'abrasion ou au poinçonnement (notamment dans les sols industriels). Qu'elles soient adhérentes ou flottantes, les chapes peuvent également remplir une fonction thermique ou acoustique.



Figure I.7 chape

Les scellements et les calages :

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, et de regards de visite.

[17]

I.2 Polystyrène :

Le polystyrène est, avec le polyéthylène, l'un des plastiques industriels les plus courants dans la vie quotidienne. Ce matériau aux multiples applications est notamment utilisé sous forme expansée pour l'emballage et l'isolation.

Le polystyrène est le polymère obtenu par polymérisation des monomères de styrène.

C'est un matériau solide à 20°C et pâteux à 120°C, qui fond entre 150°C et 170°C il est inflammable et combustible, avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C.

Il est également soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques. Ce matériau dur, cassant et transparent se décline en différents types de polystyrène aux applications multiples. On utilise notamment ce polymère très courant pour réaliser des emballages, des jouets et des maquettes. [18]



Figure I.8 Polystyrène

I.2.1 Historique de polystyrène :

Le polystyrène ou PS fut découvert en 1839 mais son exploitation à grande échelle en Allemagne et aux États-Unis date des années 30 et la première fabrication industrielle en 1933. Le premier procédé utilisé dès lors était la suspension aqueuse. La polymérisation en masse n'apparait que vers les années 40, Le procédé « masse » triomphe dans les années 60, grâce aux progrès technologiques permettant d'évacuer la chaleur produite par la polymérisation (environ 710 kJ/kg). Vient ensuite l'invention du polystyrène expansé symbolisé PSE en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) alors qu'il travaillait pour Dow Chemical sur les caoutchoucs flexibles. Cette découverte fût le fruit du hasard : l'idée de départ était de copolymériser du styrène et de l'isobutène sous pression. Le styrène fut le seul à se polymériser mais l'isobutène se vaporise. Commercialisé sous le nom de styrofoam, ce matériau rigide de faible densité a été d'abord utilisé comme isolant thermique pour le bâtiment, avant d'être utilisé comme emballage des matériaux fragiles. Le polystyrène ne présente pas de danger chimique, mais elle met 1000 ans à se dégrader. Ce qui présente un grand problème si on ne

les recycle pas. Comme c'est un dérivé du pétrole, sa production pollue l'environnement du au dégagement de gaz polluant crée lors de sa synthèse. Au cours du temps, le polystyrène se décompose en styrène, et c'est ce produit décomposé qui est le plus dangereux. Car c'est un agent cancérigène et mutagène qui nuit à la santé.

Le polystyrène, découvert dès 1839, n'a été exploité à grande échelle en Allemagne et aux États-Unis qu'à partir des années 1930. Sa production industrielle débuta en 1933 et le procédé de fabrication fut perfectionné au fil des décennies suivantes. En 1944, Ray Mc Intire (1919-1996), un chimiste de Dow Chemical, découvrit par hasard le polystyrène expansé. Commercialisé sous le nom de Styrofoam, ce matériau fut initialement très utilisé dans de nombreux domaines, notamment dans la fabrication de produits emballés, de matériaux isolants, de pièces de plastique et de produits de consommation. Il est également utilisé dans la production de réservoirs, de systèmes de façade ventilée et de produits géosynthétiques. [18]

I.2.2 Composition chimique :

Le polystyrène est un polymère linéaire thermoplastique à squelette aliphatique qui est produit par polymérisation du motif homopolymère de styrène. De manière structurale, il s'agit d'une longue chaîne d'hydrocarbonés, avec un groupe phényle attaché à certains atomes de carbone [19].

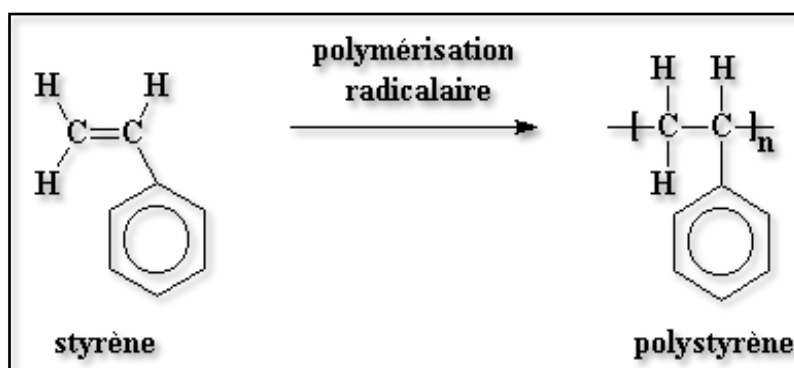


Figure I.9 Structure chimique du polystyrène

Le polystyrène expansé est fabriqué à partir de petites perles blanches, qui sont chimiquement très stables et possèdent des propriétés thermoplastiques. Selon les applications, on distingue trois types différents par leur granulométrie et leurs propriétés :

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un « porogène » (ou agent gonflant) : le pentane
- Ceux destinés à la fabrication de produits « difficilement inflammables » ou autoextinguibles, cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane,

- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistants aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques. La structure du polystyrène expansé (PSE) comporte des soudures interperles, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200 μm .

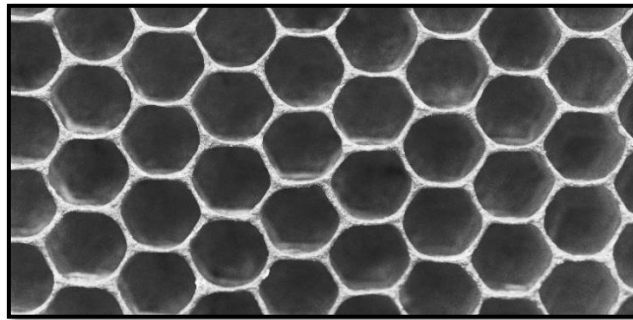


Figure I.10 Structure alvéolaire du polystyrène

I.2.3 Les types de polystyrènes :

Il existe trois types de polystyrènes :

- 1- Le polystyrène "cristal", nommé ainsi pour son aspect transparent.
- 2- Le polystyrène "choc", caractérisé par l'ajout de plastifiants ou de caoutchouc (butadiène).
- 3- Le polystyrène expansé, également connu sous le nom de PSE.

I.2.3.1 Le polystyrène cristal ou dense :

On le nomme ainsi en raison de sa transparence. Le polystyrène « cristal », bien qu'il ne soit pas cristallin, est appelé ainsi en raison de sa transparence. À haute température, il se polymérise sans perles en présence d'un adjuvant plastifiant. C'est un matériau en plastique. Utilisé pour de nombreux types de boîtes, il est dur et cassant [20] [21]



Figure I.11 Polystyrène cristal

I.2.3.2 Le polystyrène choc ou haut impact :

Un produit transparent qui renferme de 3 à 10% de butadiène et est employé dans le domaine de l'ameublement, de la contreporte de réfrigérateur ou du congélateur [22]. C'est l'un des plastiques styréniques les plus courants car il est solide, capable de résister à des impacts plus intenses que le polystyrène ordinaire; une excellente résistance aux chocs mais il n'est pas transparent [23]



Figure I.12 Polystyrène à choc.

I.2.3.3 Le polystyrène expansé ou PSE :

Il est également connu sous le nom de styromousse. Il s'agit de polystyrène à l'intérieur duquel a été incorporé un agent de dilatation lors de sa production. Le polystyrène expansé, également connu sous le nom de "frigolite", est principalement utilisé dans l'emballage des produits.

Appareils ménagers ou audiovisuels qui sont vulnérables aux chocs. Toutefois, il peut également prendre la forme d'un plastique transparent et résistant utilisé dans les boîtes et les boîtiers : le PS "cloison" [22].

Le PSE, obtenu par voie chimique (l'agent pyrogène libère un gaz inerte dans la matière : le bicarbonate de sodium) ou par voie physique (l'azote sous pression), sera employé dans des applications telles que l'emballage sur mesure, la boîte à œufs, l'emballage d'objets fragiles et le panneau isolant pour bâtiments [23].

Le PSE, une mousse blanche et rigide, est largement utilisé pour isoler les émissions de chaleur dans les constructions et les emballages, ainsi que pour prévenir les chocs. On l'emploie également dans la création des décors de cinéma et de télévision. C'est une substance légère composée de plus de 80 % d'air. La cafétéria de l'école Polytechnique est très fréquentée par le PSE [24] [25].

I.2.4 Polystyrène expansé :

I.2.4.1 Définition :

Le polystyrène expansé est un polymère thermoplastique ayant une structure cellulaire, rigide, fermée et remplie d'air donnant normalement un matériau de masse volumique apparente faible (de l'ordre de 20 kg/m³). Bien qu'il existe de nombreux polymères expansés sur le marché, le plus commun reste le polystyrène expansé, aussi appelé liège artificiel, et connu internationalement par l'acronyme EPS (**Expanded PolyStyrene**).

Les premières études scientifiques publiées sur l'introduction d'EPS dans les mortiers et bétons datent de 1980. Une solution d'imprégnation à base de styrène était alors incorporée dans la formulation de béton. Le polystyrène (PS) se polymérisait alors lors du malaxage, donnant lieu à un effet hydrofuge particulier, ce qui transformait le béton en un matériau plus résistant. Les travaux sur les matériaux de construction composites fabriqués en utilisant des résidus de polystyrène expansé comme granulats légers datent des 10 dernières années. Le comportement du béton frais, en ajoutant des fumées de silice comme charge supplémentaire, ainsi que les propriétés d'isolation thermique et acoustique ont été analysées. Une contribution plus récente a concerné la fabrication d'un matériau résistant vis-à-vis des attaques par des produits chimiques courants, tels que des solutions salines, acides dilués et biologiques. [26]



Figure I.13 Polystyrène expansé.

I.2.4.2 Fabrication de PSE :

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

-Pré- expansion :

Le produit de base subit une phase de pré- expansion. Cette procédure est réalisée dans un prémousseur équipé d'une entrée de vapeur, d'une entrée d'air et d'un système d'introduction des perles brutes. La manipulation est effectuée en permanence à une vitesse de 250Kg/heure et à une température de 97 °C. La densité du produit obtenu varie entre 17 et 18 Kg/m³.

-Stockage intermédiaire :

Les perles sont ensuite pré-expansées et conservées dans des silos afin de subir un processus de "mûrissement" qui permet de réguler les pressions entre les cellules, où le porogène a en grande partie disparu sous l'influence de la température et du milieu extérieur.

- Seconde expansion :

Elle est faite selon la même méthode que précédemment mais dans des appareils de volume plus important. C'est au cours de cette opération que les perles sont façonnées suivant le produit que l'on désire obtenir [27]

I.2.4.3 Les avantages du PSE :

- **Légèreté** : le polystyrène expansé possède des propriétés thermiques et mécaniques remarquables avec des densités très faibles, qui vous permettent d'alléger vos pièces techniques ou vos emballages.
- **Protection** : Il se comporte comme un coussin d'air et absorbe les chocs.
- **Isolation thermique** : le PSE protège des changements brutaux des températures. Il est particulièrement utilisé pour cela dans l'emballage isotherme et alimentaire et dans l'isolation thermique des bâtiments. Le polystyrène expansé graphité permet d'atteindre une conductivité thermique (λ) de 29 mW/ (m. K).
- **Acoustique** : le PSE comprime l'effet sonore, il est utilisé dans l'isolation des murs et des sols des maisons.
- **Recyclable** : Certaines références de polystyrène expansé peuvent garantir une recyclable, et peuvent être réutilisée plusieurs fois (Euroclasse E). [28]

I.3 Les Mortiers alléger :

I.3.1 Définition :

Un mortier léger est un mélange de liants, d'eau et de sable pour réduire le poids par rapport aux mortiers traditionnels. Ce type de mortier est utilisé pour ses propriétés isolantes et sa légèreté, ce qui en fait un choix idéal pour les applications nécessitant une réduction de la charge sur les structures, une isolation thermique et une manipulation plus facile. [29]

I.3.2 Les avantages des mortiers allégés par rapport aux mortiers traditionnels :

- Facilité de Transport et de Mise en Œuvre.
- Amélioration du Comportement Thermique.
- Résistance Mécanique Suffisante.
- Réduction des Coûts. [30]

I.3.3 Les techniques utiliser pour alléger le mortier :

1- Introduction d'air à l'intérieur de la matrice cimentaire :

L'incorporation d'air dans un mortier peut être réalisée en ajoutant des composés qui exploitent l'entraînement d'air ou des propriétés moussantes pour générer et piéger des gaz. Ces agents entraîneurs d'air produisent des bulles d'air fines (10 à 500 μm de diamètre) avec une distribution continue de tailles, séparées et réparties uniformément. Ce système de microbulles persiste pendant et après le durcissement, interrompant le réseau capillaire du matériau. Ces bulles agissent comme un lubrifiant à l'état frais, améliorant la mise en œuvre et réduisant la tendance à la ségrégation et à l'exsudation. Elles permettent également de maintenir une consistance plastique et fluide au mélange, diminuant ainsi le rapport eau/ciment et augmentant la compacité et la cohésion interne du matériau final. Cependant, ce groupe d'additifs peut également entraîner une diminution de la résistance mécanique, qui varie en fonction de la teneur en air. [14]

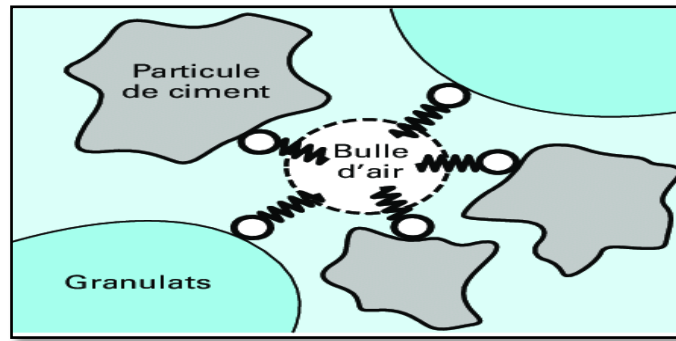


Figure I.14 Entraîneur d'air.

2- Mortier alléger par des granulats :

Pour alléger le béton, on utilise des granulats légers qui ont une densité plus faible que les granulats traditionnels comme le sable, le gravier ou la pierre concassée. Voici quelques granulats légers couramment utilisés pour alléger le béton : Argile expansée, Perlite Vermiculite, Ponce, Polystyrène expansé, Schiste expansé, Cendres volantes.

Ces granulats légers sont choisis en fonction des propriétés souhaitées pour le béton, telles que la densité, la résistance, l'isolation thermique et acoustique, ainsi que la durabilité.

3- Mortier alléger par ajouts :

Pour alléger le béton, en plus des granulats légers, divers ajouts peuvent être utilisés pour modifier la composition et les propriétés du béton. Voici quelques-uns des ajouts couramment utilisés pour alléger le béton : Adjuvants plastifiants et superplastifiants, microsphères de verre, fibres de polypropylène ou verre, mousse d'air, cendres volantes, silicium fumée, béton cellulaire, et liants alternatifs.

Ces ajouts sont sélectionnés en fonction des propriétés mécaniques, de la durabilité, de l'isolation thermique et acoustique souhaitées, ainsi que de la facilité de mise en œuvre du béton allégé [31]

I.3.4 Mortier allégée dans la littérature :

- Les travaux de recherche :

Afin de rendre notre environnement plus écologique en exploitant les déchets comme ressources renouvelables, divers ajouts minéraux et végétaux sont actuellement utilisés pour améliorer certaines caractéristiques du mortier confectionné avec des ajouts naturels. Ces matériaux sont intégrés en complément ou en substitution partielle des granulats traditionnels. Voici quelques études déjà réalisées à ce sujet :

Les travaux réalisés par **MOUGARI Brahim [32]** sur l'étude expérimentale d'un mortier renforcé par des fibres végétales, étudie les propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques du béton à base végétale, notamment avec de la sciure de bois et du liège, en mélangeant un liant à base de ciment, des particules végétales et de l'eau. Le béton de sciure de bois montre une résistance en compression et un module d'élasticité modestes, mais peut supporter de grandes déformations. La modélisation par homogénéisation des panneaux composites est réalisée pour une utilisation en construction. Les études montrent un ralentissement des ondes ultrasonores et des niveaux élevés d'absorption acoustique, ainsi qu'une réduction de la masse et du coût du béton.

D'autre part **Veronica Calderon [14]**, a mené une campagne expérimentale sur l'utilisation de polymères recyclés dans les mortiers et bétons « Use of recycled polymers in mortars and concretes ». Différentes méthodes peuvent être utilisées pour annexer un mortier ou un béton, des méthodes plus anciennes comme l'admission d'air dans une matrice cimentaire ou des granulats naturels légers aux plus récentes comme le recyclage de divers matériaux comme le verre, le papier ou les polymères. L'introduction de particules de sable recyclables à base de polyuréthane peut remplacer partiellement le sable dans les mortiers de ciment, donnant ainsi lieu à des mélanges homogènes et utiles. Ces mortiers ont également une densité apparente plus faible, une perméabilité à l'eau plus élevée, de meilleures propriétés mécaniques et des avantages environnementaux.

D'après l'étude réalisée par **Amar Benazzouk et al. [33]** sur l'effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment, le potentiel de l'utilisation de particules de caoutchouc (moins de 1 mm) dans une matrice de ciment pour des applications en béton léger est examiné. Le matériau étudié est un mortier où le sable est remplacé par des particules de caoutchouc à des tensions volumétriques de 0, 25, 50, 75 et 100 %. L'étude évalue l'effet des particules de caoutchouc sur les propriétés physico-mécaniques du composite et les dimensions du matériau lorsqu'il est exposé à un contact accidentel avec de l'eau liquide. Les résultats montrent que malgré une diminution significative de la résistance mécanique, le composite est compatible avec les matériaux de construction légers de « classe II », suivant les recommandations du RILEM1. L'analyse VDE révèle l'effet des particules de caoutchouc sur la réduction de la sensibilité à l'eau du matériau.

I.3.5 Mortier allégée avec polystyrène :

Plusieurs recherches sur les mortiers alléger par polystyrène ont été menée pour mettre en valeur la possibilité d'intègre ce dernier avec des taux et des diamètres différents. Dans ce que suit, une synthèse de ces travaux sont présenté.

Dans les recherches menées par **Costin Andrei Cadere et al.** (2017) [34], il a été examiné l'impact du remplacement des granulats de dimension (4-8) mm par des pourcentages différents de polystyrène sur les caractéristiques physicomécaniques des bétons. Les résultats de cette étude ont révélé une réduction des masses volumiques des différentes variantes de bétons étudiées par rapport au béton témoin. Le tableau ci-dessous illustre l'impact du remplacement des granulats par le polystyrène.

Tableau I.1 : Les masses volumiques des bétons avec le polystyrène.

Mélange de béton	Densité [kg/m ³]
CC1	2250
FACC1	2134
FACC2	2076
FACC3	1997
FACC4	1942
FACC5	1880

CC1 : Témoins

FACC1 : 20 % de remplacement des granulats (4-8) mm par le polystyrène.

FACC2 : 40 % de remplacement des granulats (4-8) mm par le polystyrène.

FACC3 : 60 % de remplacement des granulats (4-8) mm par le polystyrène.

FACC4 : 80 % de remplacement des granulats (4-8) mm par le polystyrène.

FACC5 : 100 % de remplacement des granulats (4-8) mm par le polystyrène.

Les résultats de l'étude ont également démontré l'impact du remplacement des granulats par le polystyrène sur les résistances mécaniques à la compression et à la flexion. Les histogrammes ci-dessous illustrent les résultats obtenus.

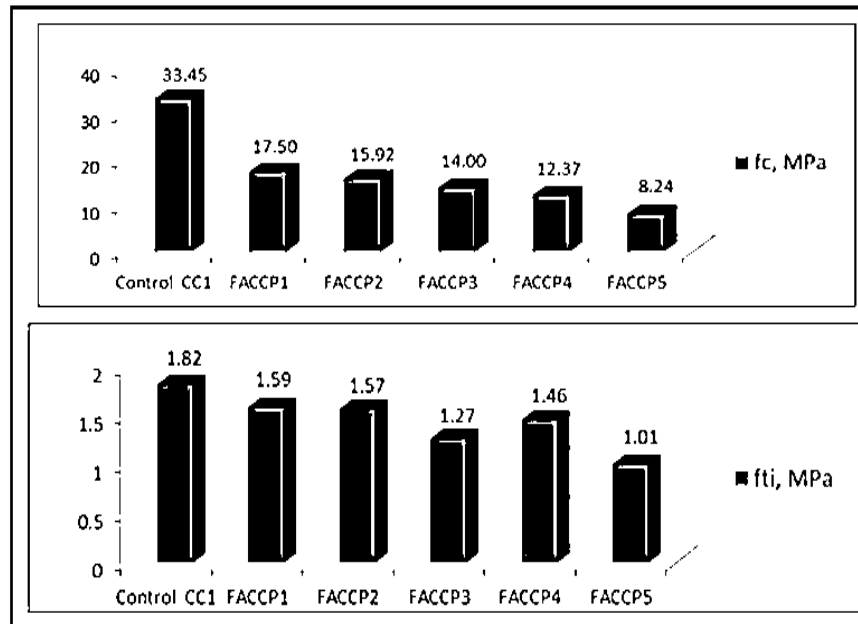


Figure I.15 Les résistances mécaniques en flexion et compression

Dans les recherches menées par **M. Kismi** et **P. Mounanga** [35] (2012), on a examiné la valorisation des déchets de mousse de polyuréthane rigide (PUR) et de billes de polystyrène expansé (PSE) de diamètres allant de 1,5 à 2,5 mm. Les taux de remplacement volumique sont estimés à 25 et 50 % dans le but de produire des matériaux cimentaires légers. Afin d'analyser l'impact du remplacement sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression et module d'Young dynamique) par rapport au mortier de référence (Réf).



Figure I.16 Mousse de polyuréthane extrudé rigide et de polystyrène expansé utilisées.

Cinq mortiers ont été formulés avec différents teneurs en mousse PUR et en billes PSE. La composition des mortiers est détaillée dans le Tableau suivant :

Tableau I.2 : La composition des mortiers

Nomenclature des mortiers	Réf		PUR - 25		PUR-50		PSE-25		PSE-50	
	MASS	VOL	Mass	Vol	Mass	Vol	Mass	Vol	Mass	Vol
Ciment	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Eau	0.50	0.58	0.50	0.58	0.50	0.58	0.50	0.58	0.50	0.58
Sable	2.20	2.69	1.65	2.02	1.10	1.35	1.65	2.02	1.10	1.35
Mousse PUR	0	0	0.01	0.67	0.02	1.34	0	0	0	0
Billes PSE	0	0	0	0	0	0	0.01	0.67	0.02	1.34
Densité fraîche (-)	2.308		2.162		2.050		1.634		1.190	
Densité après 90j de séchage (-)	2.219		2.077		1.915		1.551		1.141	

Réf : Mortier de référence.

PUR - 25 : Mousse de polyuréthane rigide au taux de remplacement volumique 25%.

PUR-50 : Mousse de polyuréthane rigide au taux de remplacement volumique 50%.

PSE-25 : Billes de polystyrène au taux de remplacement volumique 25%.

PSE-50 : Billes de polystyrène au taux de remplacement volumique 50%.

L'étude a également démontré l'impact du remplacement du sable par des granulats plastiques légers sur les performances mécaniques des mortiers, comme illustré à la Figure (I.16). Ce remplacement entraîne une diminution attendue de la résistance à la compression (R_c) et du module d'Young dynamique (E_{dyn}), en raison de l'augmentation de la porosité des mortiers. L'incorporation de billes de polystyrène expansé (PSE) provoque la réduction la plus significative des propriétés mécaniques, ainsi qu'une diminution notable de la densité (Tableau I.2). Les histogrammes ci-après présentent les résultats obtenus.

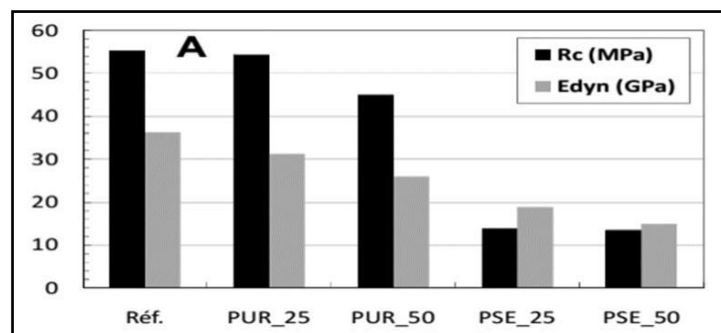


Figure I.17 Propriétés mécaniques (R_c résistance à la compression ; E_{dyn} : module d'Young dynamique) des mortiers à 28 j.

En conclusion, il est suggéré qu'une optimisation de la formulation des mortiers à base de mousse PUR pourrait permettre de minimiser leur densité tout en maintenant des performances mécaniques acceptables. L'utilisation de billes de polystyrène expansé (PSE) permet d'obtenir des densités plus faibles que celles des mortiers à base de mousse PUR. Cependant, cette réduction de la masse volumique s'accompagne d'une diminution significative des propriétés mécaniques.

D'après **ZANE Messaouda** et **DJEMAA Nabila [36]** sur : « Elaboration et caractérisation d'un mortier léger par introduction de billes de polystyrène » Cette étude met l'accent sur la formulation et la caractérisation de mortiers légers à l'aide de billes de polystyrène. Ces mortiers légers se caractérisent par leur faible volume, leur poids adaptable et une réduction de la densité obtenue par l'augmentation des volumes d'air dans le PSE. La recherche comprend un examen bibliographique et une étude expérimentale sur les matériaux légers. L'étude utilise du sable, du ciment de portland, de l'eau de laboratoire, du polystyrène et divers paramètres de composition. Les résultats montrent que l'allégation du matériau conduit à une perte de résistance mécanique, mais qu'il peut atteindre des résistances mécaniques acceptables avec de petites doses en PSE. Le matériau développé peut être ultra léger, jouant un rôle important dans la rénovation et les nouvelles constructions en raison de sa légèreté.

Conclusion :

Cette étude bibliographique examine l'élaboration et les caractéristiques d'un mortier allégé à base de polystyrène. Elle commence par une vue d'ensemble des mortiers, suivie d'une analyse des propriétés du polystyrène, en particulier du polystyrène expansé. La dernière partie se concentre sur les mortiers allégés grâce à l'incorporation de polystyrène. Le polystyrène expansé, reconnu pour sa légèreté et ses propriétés isolantes, permet de réduire la densité des mortiers tout en préservant des performances mécaniques convenables. Son incorporation améliore également l'isolation thermique et acoustique des structures et favorise une gestion durable des déchets plastiques.

Chapitre II

Matériaux et Essai

Introduction :

Ce chapitre présente une étude expérimentale détaillée sur l'utilisation de différents matériaux dans la formulation de mortiers innovants. Les essais physiques ont été réalisés au Laboratoire des travaux publics-Est (LTP-E) de la région de Bejaïa et au département de génie civil de l'Université de Bejaïa. Les matériaux utilisés comprennent le sable d'OUED ZHOUR local (Jijel), l'eau du robinet, le ciment Portland composé CPJ-CEMII/A42,5N et le polystyrène expansé. Dans cette étude, différentes variantes de mortiers ont été élaborées en ajoutant du polystyrène à des proportions variantes de 0.5 % et 1% ainsi que de différents diamètres de 2mm, 4mm, 6mm. Ces variantes ont été comparées aux échantillons de mortier de référence sans ajout de polystyrène (mortier témoin). La caractérisation des matériaux et les résultats des essais physiques et mécaniques sur les mortiers, incluant la masse volumique, l'absorption, la porosité, la consistance, et la prise, ainsi que la résistance mécanique en flexion et en compression et la conductivité thermique, ont été obtenus après les tests sur les différentes formulations étudiées.

II. Matériaux :

II.1 Les essais de laboratoire :

Chaque essai fera l'objet de :

- Description d'une situation : un chantier à surveiller et l'endroit où les matériaux seront prélevés.
- La sélection et la justification des essais à réaliser.
- La recherche de mesures, de qualités, de valeurs.
- L'analyse des résultats obtenus.
- L'argumentation.

II.2 Échantillonnage :

II.2.1 But et principe de l'échantillonnage :

Les tests réalisés en laboratoire sont généralement basés sur des quantités limitées de matériaux. Ces quantités doivent être suffisantes pour permettre la mesure des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau à partir duquel l'échantillon a été prélevé. Il est essentiel que l'échantillon utilisé en laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Résoudre ce problème est complexe, mais il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenus lors des tests en laboratoire.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

II.2.2 Prélèvement sur le tas :

Lors du stockage d'un matériau granulaire, les éléments les plus gros ont tendance à rouler vers le bas du tas, tandis que les particules plus petites dominent le haut. Pour obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble du matériau, il convient de prélever des échantillons en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulés, qui seront soigneusement mélangés.

Dans le cas des matériaux de carrière, il est également nécessaire de tenir compte de l'hétérogénéité des différentes formations rocheuses exploitées.

II.2.3 Échantillonnage en laboratoire :

II.2.3.1 Méthode de Quartage :

- Pour prélever un échantillon représentatif de 10 kg, il faut manipuler environ 80 à 100 kg de matériau.
- On homogénéise le matériau extrait à la pelle.
- On le répand en forme de galette circulaire dont on extrait un quart.
- Ce quart est ensuite brassé et répandu de même manière, puis un quart est nouveau.
- Prélevé jusqu'à obtenir la quantité désirée.
- On procède ensuite à l'emballage.

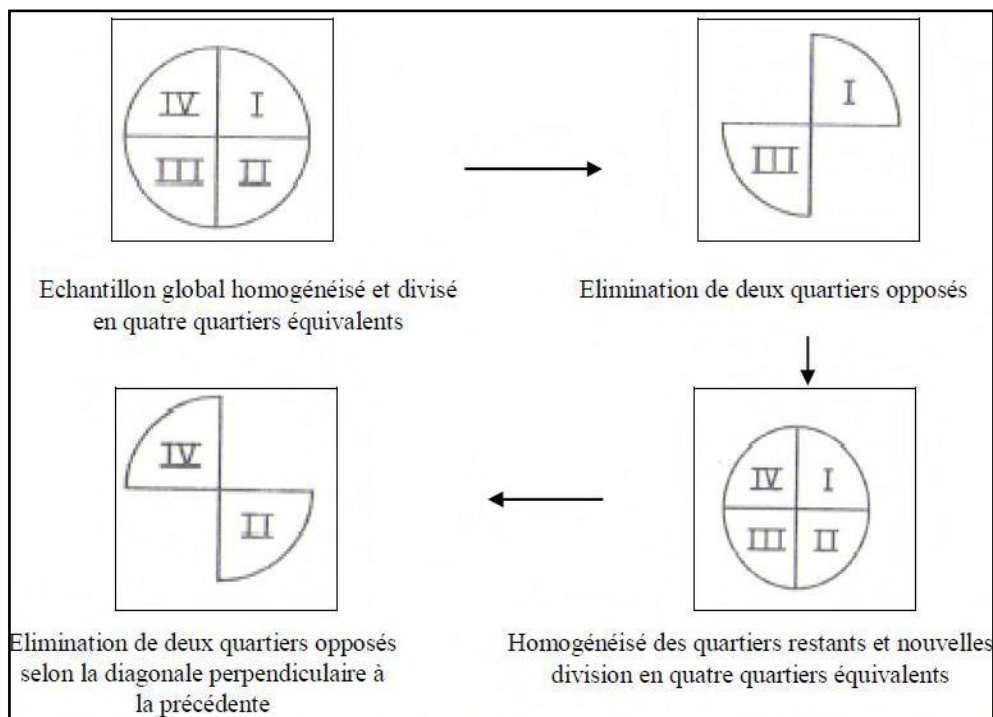


Figure II.1 Quartage.

II.2.3.2 Echantillonneur :

Cet appareil de laboratoire permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée. La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois ou quatre opérations identiques la quantité de matériau représentative et nécessaire à l'essai envisagé.



Figure II.2 Echantillonneur.

II.2.4 Choix du procédé :

Ces deux procédés peuvent être utilisés séparément ou conjointement, en fonction de la quantité nécessaire à l'essai et de la grosseur maximale des grains. Si l'échantillon de départ est d'un volume très important, une ou deux opérations de quartage permettent de diminuer rapidement le volume des matériaux traités ensuite à l'aide de l'échantillonneur. Celui-ci sera choisi de telle manière que son ouverture soit de dimension compatible avec celles des plus gros grains du matériau traité.

II.3 Caractérisation des matériaux :

II.3.1 Sable :



Figure II.3 Sable oued Zhor identification 0/1.

II.3.1.1 Analyse granulométrique « NF EN 933-1 » [37]:

II.3.1.1.1 Définition :

L'analyse granulométrique est une méthode utilisée pour déterminer la répartition des tailles des particules dans un matériau en fonction de leur poids.

II.3.1.1.2 But d'essai :

L'analyse granulométrique nous permet de connaître le pourcentage de particules fines dans un matériau, et déterminer les pourcentages des différentes fractions granulaires qui constituent l'échantillon.

II.3.1.1.3 Principe d'essai :

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau selon leur taille. Pour cela, on utilise un ensemble de tamis de différentes mailles. Les particules sont placées sur le tamis plus gros et agitées. Les plus petites passent à travers les mailles des tamis successifs, tandis que les plus grosses restent sur les tamis supérieurs. En pesant les particules retenues sur chaque tamis on obtient la répartition en poids des tailles de particules dans le matériau.



Figure II.4 Les tamis.

II.3.1.1.4 Matériels nécessaires :

- Une série de tamis de différentes mailles.
- Une balance précise.
- Un fond pour recueillir le dernier tamis.

II.3.1.1.5 Mode opératoire :

- Laver par un tamisage 0,063mm pour éliminer les grains fins.
- Sécher la prise d'essai à une température de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à obtenir la masse M1.
- Laisser refroidir, puis peser jusqu'à masse M2.
- Le matériau séché est versé sur une série de tamis de différents diamètres choisis (6.3 ; 4 ; 2 ; 1 ; 0.5 ; 0.315 ; 0.25 ; 0.125 ; 0.063).
- Peser le refus cumulé jusqu'au dernier tamis.
- Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé, soit R1 la masse de ce refus
- Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé, soit R2.
- La somme R1+R2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.

- Cette opération est poursuivie pour tous les tamis, ceci permet de connaître la masse des refus cumulé R_n .
- La somme des refus cumulés mesuré sur les différents tamis et de tamisât sur le fond doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne la perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 1% du poids total de l'échantillon.

II.3.1.1.6 Les résultat de l'Analyses granulométrique de sable 0/1:

Les résultats des analyses granulométrique pour le sable 0/1 sont résumé dans ce tableaux ci- dessous :

Tableau II.1 : Résultats de l'analyse granulométrique de sable 0/1

Masse sèche M1 :2883g		Masse sèche après lavage M2 :2820.64g	
Masse séché des fines retirées par lavage M1-M2 = 62.36g			
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus cumulés R_n (kg)	Pourcentage des refus cumulés %	Pourcentage cumulé de tamisât %
6,3	7	0.24	100
4	15	0.52	99
2	49	1.70	98
1	170	5.9	94
0,5	774	26.85	73
0.315	1739	60,32	39
0.25	2150	74.58	25
0.125	2747	95.28	4
0.063	2806	97.33	2
Matériaux dans le réceptacle p= 1 g		$\sum R_i = 362.72$	

La Courbe granulométrique :

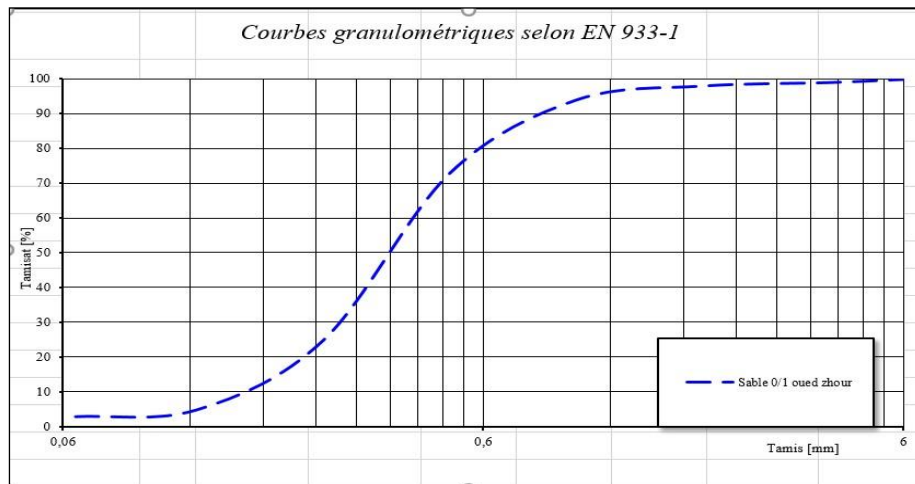


Figure II.5 Résultat de la courbe granulométrique.

Module de finesse « NF P18-540 » : [38]

Le module de finesse est un coefficient qui caractérise la finesse d'un granulat. Il est obtenu en divisant par 100 la somme des pourcentages de refus cumulés sur une série de tamis spécifiés. (0,063-0,125 -0,25 -0,315 -0,5-1-2-4-6,3mm). Obtenu avec cette formule :

$$MF = \frac{\sum \text{Refus cumulés \%}}{100}$$

- **1,8 et 2,2** : le sable est en majorité de grains fins qui confèrent au mortier une bonne maniabilité au détriment de la résistance.
- **2,2 et 2,8** : on est en présence d'un sable préférentiel qui confère au béton une meilleure résistance et une bonne maniabilité avec des risques de ségrégation limité.
- **2,8 et 3,3** : le sable est un peu grossier. Il donnera des mortier résistants mais moins maniables (difficultés de mise en œuvre) qui peuvent provoquer des chutes de résistance, par apparition de ségrégations profondes.

Expression des résultats :

$$MF = \frac{0.52+1.7+5.9+26.85+74.58+95.28}{100} = 2.7$$

D'après le résultat donner par la formulation du module de finesse 2.7, on le classifie comme un sable moyen

II.3.1.2 La teneur en eau «NF P 94-050 » : [39]

II.3.1.2.1 But d'essai :

Détermination de la teneur en eau d'un granulat, qui se définit par poids de l'eau contenu dans le poids des vides étant négligeable.

II.3.1.2.2 Principe d'essai :

Pour avoir une masse du matériau sec, on pèse un échantillon de matériaux humide et on le place dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante sec. L'essai de teneur en eau permet de déterminer quel est le pourcentage massique (W%) d'eau dans le sable étudié.

II.3.1.2.3 Mode opératoire :

- Peser deux tares vide soit leurs masses M1
- Peser les deux tares en contenant la masse de (échantillon humide +tare) soit M2
- Sans lavage préalable, sécher l'échantillon à l'étuve à 105°C jusqu'à une masse constante.
- Après séchage repeser les deux tares avec l'échantillon sec soit leur masse M3.
- La formule de la teneur en eau w est :

$$W = \frac{M2 - M3}{M3 - M1} \times 100$$

Le résultat donner est :

$$W = 34 \%$$

Soit :

M1: Masse tare vide.

M2 : Echantillon humide + tare.

M3 : Echantillon sec + tare.

II 3.1.3 Détermination de la propreté de sable (équivalent de sable)

II.3.1.3.1 But de l'essai : « NF EN 933-8 » [40]

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables utilisés dans la composition des mortiers. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de sable.



Figure II.6 Essai Equivalent de Sable.

II.3.1.3.2 Domaine d'application :

- Choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique.
- Contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique.
- Choix et contrôle des sables à mortier.
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés.

II.3.1.3.3 Principe de l'essai :

Cet essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté.

II.3.1.3.4 Matériels utilisés :

- Un tamis de 2mm.
- Une balance électrique.
- Deux tares.
- Deux éprouvettes en plastique avec deux bouchons en caoutchouc.
- Un entonnoir en plastique.
- Flacon de Solution ES.
- Un chronomètre.
- Une règle métallique graduée en mm.
- Un agitateur mécanique ou électrique.



Figure II.7 Essai ES.

Expression des résultats :

La formule donner :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Avec :

h_1 : Hauteur du floculat (mm)

h_2 : Hauteur du sédiment (mm)

Donc la valeur de l'équivalent de sable est :

ES = 81.7% \geq 80% donc sable très propre. L'absence presque totale de fines.

II 3.1.4 Essai Bleu de Méthylène « NF EN 933-9 » [41]

II 3.1.4.1 But d'essai :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène. Il est fréquemment employé pour évaluer l'activité des sables présentes dans les sols, ainsi que pour évaluer l'impact des fines d'argile présentes dans les sables et les graviers d'origine naturelle ou artificielle. Il s'avère être un test efficace pour mesurer de manière fiable et facilitée la pureté des granulats.



Figure II.8 Essai ES (sable + kaolinite).

II 3.1.4.2 Matériels nécessaires :

- Agitateur à ailette.
- Burette de 50ml graduée à 1ml.
- Papier filtre.
- Chronomètre.
- Une baguette en verre.
- Un Bêcher.
- Balance.
- Deux coupelles.

II 3.1.4.3 Produits utilisés :

- Solution du bleu de méthylène.
- L'eau distillé.
- Kaolinite.
- Sable.



Figure II.9 Valeur de bleu.

II 3.1.4.4 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai au bleu de méthylène consiste à déterminer la proportion d'un matériau granulaire, tel que le sable ou les gravillons, en mesurant la quantité d'argile présente dans l'échantillon. En résumé l'essai au bleu de méthylène vise à évaluer la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon granulaire.

II 3.1.4.5 Mode opératoire d'essai :

- Calcul la teneur en eau.
 - Séché le sous échantillon à 105 °C.
 - Pesé une masse M0 du sous échantillon de 200gr.
 - Pesé de 30gr de kaolinite pour la fraction 0/0,125.
 - Un bécher contenant 500 ml d'eau distillée.
 - Après 5 minutes d'agitation (eau+ kaolinite.) à 600tr/min, injecter 30 ml de solution de bleu dans le récipient à l'aide de la burette et agiter à 400 tr/min. Après 2 min, on effectue un test à la tache.
 - Si l'auréole n'apparaît pas, ajouter une dose de 5 ml de solution de bleu, cette addition est suivie du test de la tache sur le papier filtre après une minute d'agitation à 400 tr/min toujours.
 - On procède ainsi jusqu'à ce que le test devient positif. A ce moment, sans rien ajouter, on laisse s'opérer l'adsorption du bleu, qui n'est pas instantanée, tout en effectuant des tests de minute en minute (5 taches).
 - Si l'auréole bleu clair disparaît à la cinquième tache on procède à de nouvelles additions.
- Chaque addition est suivie de tests effectués toujours 5 taches de minute en minute.
- Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives, le dosage est alors considéré comme terminé.
 - Enregistrer le volume total de la solution de colorant V ajouté pour obtenir l'auréole.

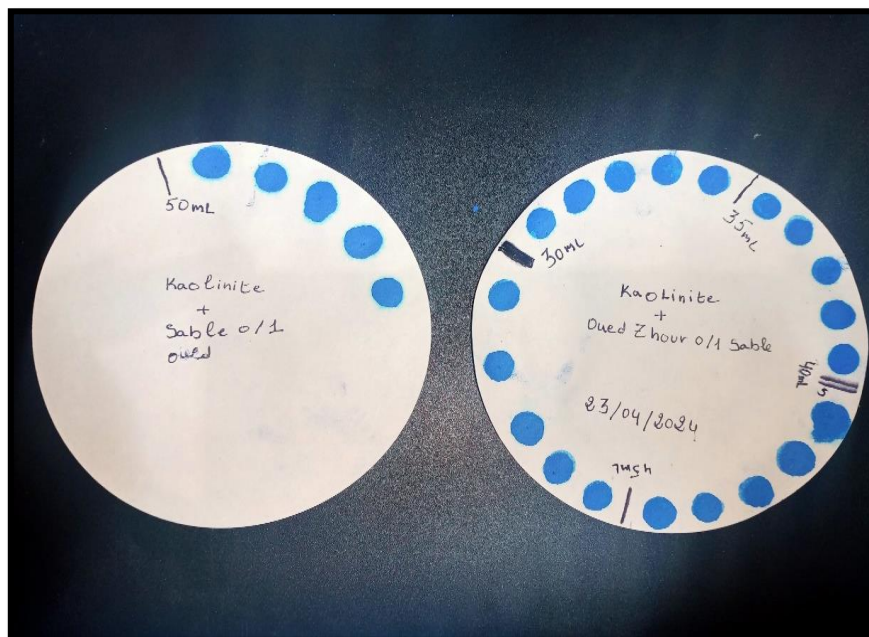


Figure II.10 Le teste à la tache.

Expression des résultats :

Donner par la formule :

$$M_B = \frac{V_1 - v'}{M_1} \times 10 = 0.50 \text{ g/kg}$$

V1 : volume du bleu introduit en cm³.

v' : Volume du bleu adsorbé par la kaolinite.

M1 : Masse sèche de la prise de l'essai.

II 3.1.5 Méthode de pycnomètre (masse volumique): « NF EN 1097-6 » [42]

II 3.1.5.1 But d'essai :

C'est de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition du mortier.

II 3.1.5.2 Principe d'essai :

Le pycnomètre est un récipient calibré utilisé pour mesurer la masse volumique des solides d'un sol. Il est rempli d'un liquide, généralement de l'eau distillée.

II 3.1.5.3 Matériels nécessaires :

- Une balance.
- Eau.
- Un pycnomètre avec bouchon.
- Un bain d'eau.



Figure II.11 Essai du pycnomètre

II 3.1.5.4 Mode opératoire d'essai :

- Laver la prise d'essai sur un tamis de 4 mm et de 0,063 mm, afin d'éliminer les grains les plus fins.
- Rejeter les grains refusés dans tamis de 4mm.
- peser avec précision la masse M3 d'un pycnomètre rempli d'eau.
- Remplir le pycnomètre contenant l'échantillon d'eau et fermer le bouchon, après la vérification qu'il n'y a aucune bulle d'air dans ce pycnomètre. Peser et noter masse M2.
- Mettre le pycnomètre dans l'eau.
- Après 24 heures, nous musurons la température de l'eau et noter la masse volumique de l'eau ρ_w .
- Verser le contenu du pycnomètre sur un plateau.
- Sécher l'échantillon dans l'étuve superficiellement, note la masse M1.

- Sécher l'échantillon à l'étuve à une température de 105 °C. laisser refroidir à température ambiante. Peser et noter la masse séché M4.



Figure II.12 Pycnomètre.



Figure II.13 Réalisation de l'essai au pycnomètre.

Expression de résultat :

Masse volumique absolue :

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} = 2.47 \text{ T/m}^3$$

II 3.2 Ciment :

Le ciment est un matériau de construction crucial qui sert à lier d'autres matériaux. Principalement composé de calcaire, d'argile et de gypse, il subit un processus de durcissement chimique appelé hydratation lorsqu'il est mélangé à de l'eau. Cette réaction lui permet de devenir solide et de maintenir ensemble les autres matériaux.



Figure II.14 Ciment.

II 3.2.1 Caractéristique du ciment :

Le ciment utilisé dans tous les essais est un ciment Portland Composé CPJ-CEM II /A 42.5R AIN K'BIRA. Wilaya de Sétif. Obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts. Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II/A 42.5R est constitué de:

- 80 à 94% de clinker Portland.
- 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur).
- Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

II 3.2.2 Détermination de la masse volumique absolue du ciment : « NF P 15-435 » [43]

Voluménomètre le Chatelier est pour la détermination de la masse volumique absolue des ciments en contenant une double graduation de 0 à 1ml et de 18 à 24 ml par pas de 0.1ml et d'un orifice de remplissage évasé avec bouchon en verre rodé.

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Nous avons :

$$M_1 = 362 \text{ g}$$

$$V_1 = 0 \text{ ml}$$

$$M_2 = 428.8$$

$$V_2 = 20.4$$

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} = 3.27 \text{ g/cm}^3$$



Figure II.15 Chatelier masse M1.

M_1 : Masse de Chatelier + essence.

M_2 : Masse de Chatelier + ciment.

V_1 : Volume initiale.

V_2 : Volume final.



Figure II.16 Chatelier masse M2.

II 3.2.3 Détermination de la masse volumique apparente du ciment : [43]

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide du corps et les vides contenus dans les grains (volume apparente).

II 3.2.3.1 Matériels utilisés :

- Une balance.
- Un récipient de 1L.
- Un entonnoir.
- Une petite règle à raser.
- Un tamis de 0.08 mm pour le ciment.
- Entonnoir spécial.

II 3.2.3.2 Mode opératoire :

- peser le récipient vide, et noter ça masse M1.
- prendre une quantité de ciment et la verser dans le récipient et raser la surface à l'aide d'une règle.
- peser le récipient rempli, et noter la masse M2 de l'ensemble.



Figure II.17 Entonnoir.

Nous avons :

$$V = 1L$$

$$M_1 = 486.3$$

$$M_2 = 1598.26 \text{ g.}$$

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_2 - M_1}{V} = 1.112 \text{ g/cm}^3.$$

M₁: Masse du récipient vide.

M₂: Masse du récipient plein.

II 3.2.4 Essai de consistance « EN 196-3 » [44] :

II 3.2.4.1 Définition :

La consistance de ciment est une caractéristique qui évolue au cours de temps, elle caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Selon la norme 196-3.

II 3.2.4.2 But de l'essai :

Le but de cet essai est de déterminer la consistance du ciment qui donne la quantité optimale.



Figure II.18 Appareil Vicat.

II 3.2.4.3 Principe de l'essai :

L'essai est réalisé pour trouver la quantité d'eau qui doit être mélangé toujours suivant le même processus avec une masse de ciment, dans laquelle la sonde de l'appareil de Vicat ne s'enfonce que de (6 mm) du fond du moule.

- Si $d > 7$ mm : il n'y a pas assez d'eau.
- Si $d < 5$ mm : il y a trop d'eau.

Dans les deux cas il faut jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel et recommencer avec une nouvelle pâte.

II 3.2.4.4 Matériels nécessaires :

- Appareil de Vicat.
- Un malaxeur normalisé.
- Un chronomètre.
- Une sonde normalisée de diamètre de $\varnothing=10$ mm.
- Une balance.
- Une spatule.
- Salle climatisée de température de $20^{\circ} \pm 1^{\circ}$ C.

II 3.2.4.5 Mode opératoire :

- 1- Peser 500g de ciment et on le verse dans la cuve du malaxeur.
- 2- Ajouter la quantité d'eau calculée dans la cuve du malaxeur (On commence avec un rapport de masse E/C=0.31).
- 3- Régler la vitesse 140 tr/min avec une vitesse lente.
- 4- Mettre le malaxeur en marche.

5- Mélanger la pâte pendant 90s à la vitesse lente.

6- Arrêter pendant 15 secondes, et remettre avec une spatule toute la pâte adhérente à la cuve au-delà de la zone de malaxage.

7- Remonter le godet et malaxer durant 90 secondes à vitesse rapide.

Tableau II.3 : Formulation des pâtes de ciment

E/C	Ciment (g)	Eau	d (mm)
0.25	500	125	35
0.30	500	150	30
0.31	500	155	6
0.32	500	160	2
0.35	500	175	1

Graphique :

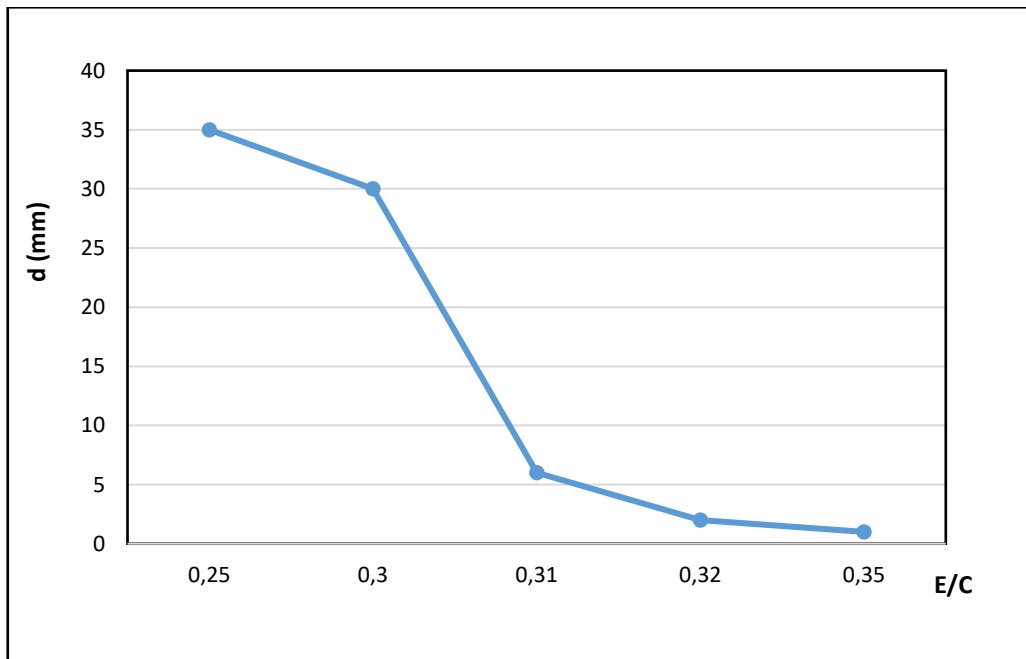


Figure II.19 Graphique du d par rapport à E/C.

Commentaire :

Le graphique représente :

Selon X : indique le rapport eau/ciment

Selon Y : indique la distance « **d** » séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de base.

L'objectif était de déterminer la quantité optimale d'eau à mélanger pour atteindre une consistance précise.

D'après plusieurs essais, nous avons trouvé par interpolation une consistance de **0.31**. Cette valeur signifie que le rapport eau/ciment optimal pour atteindre la déformation souhaitée est de **0.31** (**d=6mm**).

II 3.2.5 Essai de prise : « 196 -3 » [44]

II 3.2.5.1 Définition :

L'essai de prise du ciment est une procédure de laboratoire visant à mesurer le temps de prise d'un ciment, c'est-à-dire le délai entre le moment où le ciment est mélangé à l'eau et le début et la fin de sa prise

II 3.2.5.2 But d'essai :

L'essai de prise permet de déterminer le temps de prise, ce qui correspond au temps écoulé du moment de gâchage du ciment jusqu'au début de prise.



Figure II.20 Appareil de Vicat muni de l'aiguille

II 3.2.5.3 Principe d'essai :

- La pâte de ciment de consistance normalisée est placée dans un moule tronconique sur une plaque de verre.
- L'appareil Vicat, équipé d'une aiguille de 1,13 mm de diamètre, mesure la pénétration de l'aiguille dans la pâte à intervalles réguliers (environ 10-15 minutes).

- Le temps où l'aiguille pénètre de 4 ± 1 mm dans la pâte est enregistré comme le temps de début de prise et a 38mm est le temps de fin de prise du ciment.

II 3.2.5.4 matériels nécessaires :

« Un malaxeur avec récipient en acier inoxydable (cuve), batteur. Le malaxeur est pourvu de plusieurs vitesses : lente, moyenne, et rapide.

- un appareil de Vicat .
- Un moule de Vicat de forme tronconique.
- une plaque de verre a base plane.
- Une aiguille normalisée de diamètre 1,13 mm et de longueur 50 mm.
- Un accessoire annulaire adaptable sur l'aiguille normalisée.
- Des éprouvettes graduées en plastique.
- Une spatule.
- Un chronomètre.

II 3.2.5.5 Mode opératoire :

Le même essai que celui de consistance.

1. Peser 500g de ciment et on le verse dans la cuve du malaxeur.
2. Ajouter la quantité d'eau calculée dans la cuve du malaxeur (On commence avec un rapport de masse E/C=0.31).
3. Régler la vitesse 140 tr/min avec une vitesse lente.
4. Mettre le malaxeur en marche.
5. Mélanger la pâte pendant 90s à la vitesse lente.
6. Arrêter pendant 15s, et remettre avec une spatule toute la pâte adhérente à la cuve au-delà de la zone de malaxage.
7. Remonter le godet et malaxer durant 90s à vitesse rapides.

Tableau II.2 : Mode opératoire de l'essai de consistance et de prise

Opération	Introduction du ciment	Introduction de l'eau	Introduction de l'eau	Recalage de la cuve	Mettre enroule
Duré des opérations	/	5 à 10 s	90s	15s	90s
Etat du malaxeur	Arrête		Vitesse lente	Arrête	Vitesse lente

Graphique :

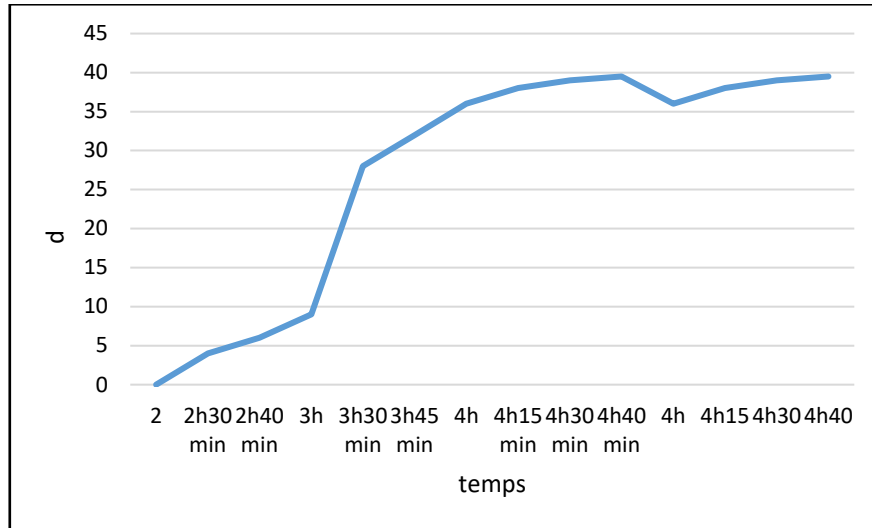


Figure II.21 Le temps de prise.

Commentaire :

Pour l'essai de prise du ciment, la quantité d'eau utilisée est celle déterminée lors de l'essai de consistance normale du ciment. Cette consistance est établie en fonction de l'évolution de la consistance de la pâte de ciment en relation avec le rapport eau/ciment (E/C). En suivant ce protocole, nous nous assurons que les conditions de prise du ciment sont conformes aux standards de consistance optimaux déterminés préalablement.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.3 : Début et fin de prise de ciment

Essai	Valeur	
La consistance	0.31	
La Prise	Début de prise 150 min (2h30min)	Fin de prise 280min (4h40min)

II.3.3 Polystyrène :

Nous avons utilisé le polystyrène de différents diamètres (2 ;4 ;6) mm et de pourcentages (0.5 ;1) %. C'est un matériau de construction ultraléger qui est capable de concevoir un mortier léger. La valorisation du Ps est intéressante dans le secteur de construction telles que les panneaux de revêtement, pente, terrasse, panneaux légers, remplissage.

II.3.3.1 Détermination de la masse volumique apparente de polystyrène :

-Pour le diamètre 6mm :

Nous avons :

$$M_1 = 101,2 \text{ g.}$$

$$M_2 = 102,4 \text{ g.}$$

$$V = 150 \text{ ml.}$$



Figure II.22 Polystyrène de diamètre 6mm.

Pour le diamètre de 4mm :

$$M_1 = 101.2$$

$$M_2 = 102.9 \text{ g.}$$

$$V = 150 \text{ ml.}$$



Figure II.23 Polystyrène de diamètre 4mm.

-Pour le diamètre de 2 mm :

$$M_1 = 101.2$$

$$M_2 = 103.5 \text{ g.}$$

$$V = 150 \text{ ml.}$$

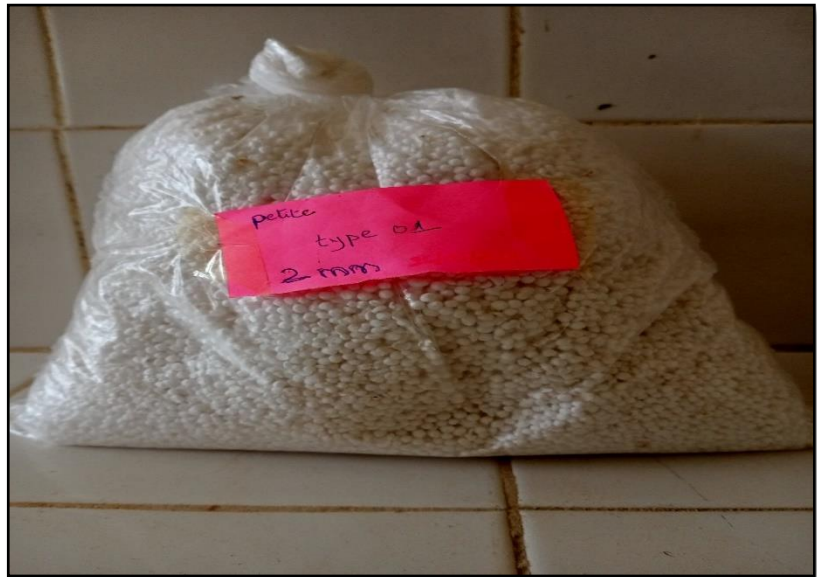


Figure II.24 Polystyrène de diamètre 2mm.

Sa masse volumique apparente est donnée par cette formule :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Tableau II.4 : Masse volumique apparente de polystyrène utilisé.

Diamètre (mm)	2	4	6
Masse volumique (g/cm ³)	0.0153	0.0113	0.008

II.3.3.2 Détermination de la masse volumique absolue de polystyrène :

D'après la formule :

$$\rho_{Abs} = \frac{M_{Ps}}{V_{Ps}}$$

Nous avons :

$$M_{Ps} = 0.3393 \text{ g}$$

$$V_{Ps} = 11.25 \text{ cm}^3$$

Donc la masse absolue de polystyrène est :

$$\rho_{Abs} = 0.03016 \text{ g/cm}^3$$

II.3.4 Confection des mortiers allégées :

II.3.4.1 formulations des mortiers :

La masse des constituants nécessaires aux essais est déterminée en fonction des éprouvettes à préparer. Dans le cas de la préparation de 3 éprouvettes (4×4×16) cm³, les quantités sont respectivement les suivantes :

-Mortier sans ajouts (témoin) :

- Sable1350 g.
- Liant350g ;400g ;450 g.
- Eau175g ; 200g ; 225 g (E/C=0,50).

- Mortier avec ajouts (polystyrène)

- Polystyrène $\left\{ \begin{array}{l} 0,5\% \rightarrow 6.75g \\ 1\% \rightarrow 13.50g \end{array} \right.$

Tableau II.5 : Dosage et pesée des constituants

	Pourcentage (%)	Diamètre (mm)	Dosage ciment g	Sable (g)	E/C	Eau (g)
Les différentes combinaisons de confection.	0%	/	350	1350	0.5	175
		400	200			
		450	225			
	0.5%	2mm	350			175
		4mm	400			200
		6mm	450			225
	1%	2mm	350			175
		4mm	400			200
		6mm	450			225

II.3.4.2 Préparation des moules :

Pour la préparation des moules, nous avons procédé de la façon suivante :

1. Préparer une série des moules des dimensions (4×4×16) cm³ convenables avec la quantité du mortier.
2. Huiler les moules et vérifier leurs serrages.

II.3.4.3 Préparation des éprouvettes :

Des essais sont effectués au niveau de laboratoire pour optimiser la composition préliminaire, en fixant la quantité de sable 1350g et faire varier la quantité de ciment et d'eau en gardant le rapport E/C. Les mélanges sont préparés avec des fractions volumiques de 0% ; 0.5% et 1% d'ajout de PS, afin d'assurer la répartition homogène d'ajout durant le malaxage du mélange.

II.3.4.4 Malaxage :

Le malaxage est effectué au moyen d'un malaxeur spécifié, le malaxeur étant en position de fonctionnement :

- Introduire la quantité d'eau en premier dans la cuve du malaxeur verser ensuite le ciment.
- Malaxer pendant 30s à vitesse lente.
- Introduire le polystyrène et le sable d'une manière aléatoire.
- Malaxer pendant 30s à vitesse rapide.
- Arrêter le malaxeur, démonter le batteur, puis racler les parois et le fond du récipient de façon qu'aucune partie de mortier n'échappe au malaxage.
- Après remontage du batteur reprendre le malaxage pendant 1mn à vitesse rapide.
- Après le malaxage couler le mortier dans les moules normalisés (4x4x16) cm³, qui doivent être graissés au préalable.
- Remplir la moitié du moule qui doit être placé sur la table à choc avec un nombre de coups égal à 60coup/mn.
- Retirer le moule après la vibration et le remplir de nouveau jusqu'au débordement.
- Araser l'excès puis remettre sur la table à choc pour compléter l'homogénéisation



Figure II.25 Les étapes de malaxage.

Après le coulage du mortier :

Une fois le mortier coulé dans les moules, il est important d'assurer le surfacage des faces supérieures des moules. Cela permet d'obtenir une surface plane et lisse pour les éprouvettes



Figure II.26 Coulage du mortier.

Entreposage des éprouvettes : « NF P 18-404 » [45]

Les éprouvettes sont ensuite entreposées pendant 24 h dans la salle du laboratoire.



Figure II.27 Conservation des prismes

Couverture des moules :

Afin d'éviter toute évaporation d'eau, les moules sont recouverts d'un sac plastique pendant cette période d'entreposage.



Figure II.28 Couverture des moules avec du film Plastique.

Conservation des éprouvettes :

Après la confection des éprouvettes et après démoulage les éprouvettes qui seront conservées dans un bac rempli d'eau pendant 28 jours.



Figure II.29 Conservation des éprouvettes dans l'eau après démoulage.

II.3.5 Caractérisation physique des mortiers :

II.3.5.1 Masse volumique : (densité apparente) NF P 18-459 [46]

Ça formule :

$$M = \frac{M_{Sc}}{M_{st} - M_{hyd}}$$

M_{Sc} : Masse sec.

M_{st} : Masse saturé.

M_{hyd} : masse hydrostatique.

II.3.5.2 Absorption d'eau : NF EN 1015-18 [47]

C'est le rapport entre la masse d'eau absorbée par l'échantillon séché et la masse sèche de l'échantillon exprimé en pourcentage. L'absorption est donnée par la relation :

$$\mathbf{Abs} = \frac{\mathbf{M_{ST}} - \mathbf{M_{Sc}}}{\mathbf{M_{Sc}}} \times \mathbf{100}$$

M_{ST} : la masse saturation (échantillon immergé pendant 24h dans l'eau).

M_{Sc} : la masse de l'échantillon séché.

II.3.5.3 La porosité : NF P 18-459 [46]

La porosité est la mesure des espaces vides, connus sous le nom des pores à l'intérieur d'un matériau, ces pores pouvant être remplis de liquides ou de gaz. Elle est exprimée en pourcentage et représente le rapport entre le volume des vides et le volume total du matériau.

$$\mathbf{Pr (\%)} = \frac{\mathbf{M_{ST}} - \mathbf{M_S}}{\mathbf{M_{ST}} - \mathbf{M_{PH}}} \times \mathbf{100}$$

M_{st} : Masse saturé.

M_s : Masse sèche.

M_{ph} : Masse hydrostatique.

II.3.5.3.1 Mode opératoire :

- Les échantillons ont été retirés de l'eau, ils doivent être soigneusement essuyés avec un papier ou un chiffon propre et les pesés, noter ça masse sature.
- Déterminer la masse des éprouvettes en le plaçant dans un récipient rempli d'eau et nous repesons ça masse, noter sa masse hydrostatique.
- Mettre les éprouvettes dans l'étuve à la température 40 C°, pendant 24h et repeser, noter ça masse sèche.



Figure II.30 La pesé hydrostatique sature et sous l'eau.

II.3.5.4 Le retrait : « NF P 15-433 » [48]

Selon la norme NF P 15-433, la mesure du retrait a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 en mortier âpre leur démoulage sur une période donnée à l'aide d'un pied à coulisse au cours du temps qui permet le suivi de la variation de longueur de l'échantillon. Le retrait de chaque composites sont mesurés au 1j et 28j.

$$\Delta l = l(t) - l(t_0)$$

Avec :

$l(t_0)$: La longueur de l'éprouvette au temps t_0 , après 24h de démoulage.

$l(t)$: La valeur lue après 28jours.

Compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette 4 x 4 x 16 cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

II.3.6 Caractérisation thermique des mortiers [49]:

Pour nos essais thermiques, nous avons utilisé le CT Mètre.

La conductivité thermique est un coefficient qui qualifie la réaction d'un matériau face au transfert thermique. Il définit donc la quantité de chaleur en W transmise par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1°C/m ou 1 kelvin. Ce coefficient est noté λ Exprimes-en (W/m K)

II.3.6.1 Conduite d'essai :

Afin de maintenir la stabilité des échantillons et éviter tout mouvement pouvant fausser l'expérimentation.

- utilisé un dispositif sonde entre deux éprouvette a fin assure un bon surfaçage des défèrent éprouvettes.
- obtient par la suite les valeurs de la conductivité thermique des échantillons enregistrées à chaque 120 seconde.



Figure II.31 Appareils CT-mètre utilisé.

II.3.6.2 Résistance thermique :

Le calcul de la résistance thermique vise à évaluer la capacité de chaque échantillon à ralentir le transfert de chaleur. Par définition, la résistance thermique mesure l'aptitude d'un matériau à freiner le passage de la chaleur. Elle s'exprime en mètres carrés-kelvins par watt ($m^2 \cdot K/W$). La formule utilisée pour déterminer cette résistance est :

$$R = h/\lambda \text{ (m}^2 \text{ K/W).}$$

Avec :

R : La résistance thermique (en $m^2 \cdot K/W$).

h : l'épaisseur du matériau (en mètres),

λ : La conductivité thermique d'échantillon (en $W/(m \cdot K)$).

II.3.7 Caractérisation mécanique des mortiers :

Les résistances mécaniques en compression et en flexion sont déterminées suivant la norme EN 196-1, à l'aide d'appareil de type CONTROLS équipé d'un système d'une capacité sous force de 200 KN pendant l'essai et une vitesse de chargement.

-Après 28jours, il faut passer par les l'essais de flexion et de compression.

II.3.7.1 L'essai de flexion : « NF P18-407 » [50]

Il consiste à rompre en flexion par trois points une éprouvette prismatique de dimension (4*4*16). Les échantillons de test doivent être des prismes. Pour évaluer leur résistance à la flexion, ces échantillons sont soumis à une contrainte de flexion jusqu'au moment de rupture, et la charge maximale appliquée pendant le test est enregistrée.



Figure II.32 Machine de teste de flexion.

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

$$R_F = \frac{1.5FL}{b^3}$$

R_F : résistance à la flexion en (MPa)

F : la charge appliquée à la rupture en [N]

L : la distance entre les appuis ($L = 100$ mm)

B : le coté de la section carrée de l'éprouvette ($B = 40$ mm)

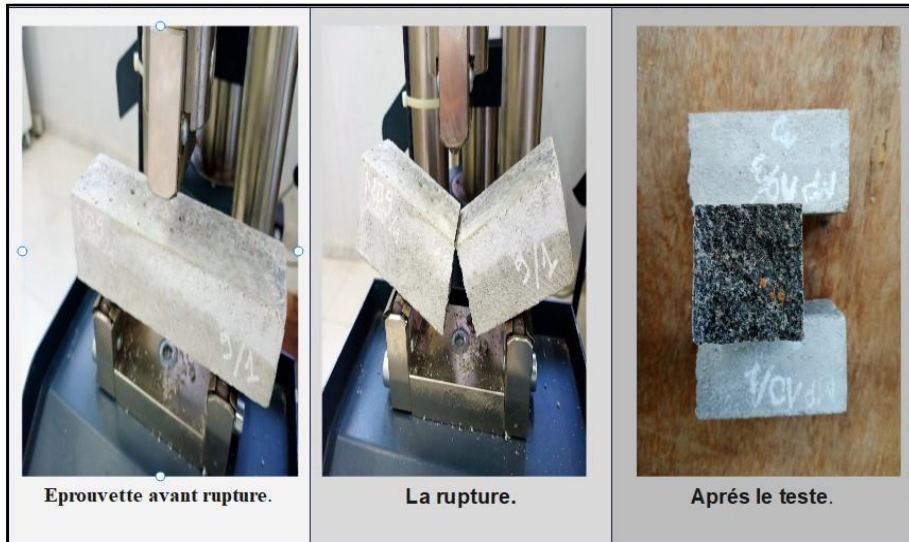


Figure II.33 Eprouvette de mortier avant et après le teste de flexion.

II.3.7.2 L'essai de compression « NF P 18-406 » [51]

L'essai mécanique à la compression a été mesurée selon la norme NF P 18-406 par compression axiale sur des éprouvettes prismatiques de mortier de dimensions (4x4x16) cm³, divisés en deux après l'essai de flexion. Ces demi-prismes de (4x4) de l'éprouvette obtenus après rupture à flexion seront rompus à la compression. La résistance est prise à 28j et, à l'aide d'une presse hydraulique (CONTROLS). La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette correspond à la contrainte moyenne d'écrasement sur trois éprouvettes à chaque âge d'essai. La contrainte de rupture est calculée comme suite :

$$R_c = F_c / b^2$$

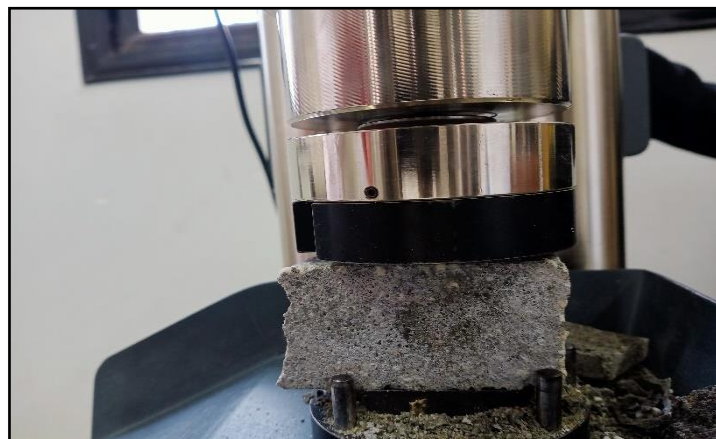


Figure II.34 Machine de teste à la compression.



Figure II.35 Epreuve de mortier soumis aux tests de compression.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par la caractérisation des différents constituants (sable, ciment, polystyrène) ; la formulation des mélanges pour obtenir la formulation optimale (mortier), la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différents essais sont aussi exposés dans ce chapitre. Les différents résultats obtenus seront présentés et illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Résultats et Discussion

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons et discuterons les résultats expérimentaux obtenus au cours de ce projet de fin d'études. Les essais ont été réalisés dans les laboratoires de génie civil (MDC) et au laboratoire de recherche de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia le campus Targa Ouzemmour. Pour répondre aux problématiques posées, un programme expérimental a été élaboré.

Mortier Témoin : Un mortier de référence sans ajout de polystyrène a été préparé pour servir de base de comparaison.

Mortiers allégé : D'autres mortiers ont été préparés en variant les dosages de ciment et en incorporant du polystyrène à des proportions de 0.5% et 1%.

Cette étude permet de mieux comprendre l'impact de l'incorporation de polymère, sous forme de polystyrène, sur les propriétés des mortiers. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des applications plus durables dans le domaine de la construction, en démontrant les compromis entre l'utilisation de matériaux recyclés et la performance mécanique des mortiers. Les conclusions tirées de cette étude permettront de mieux guider l'utilisation de polystyrène dans le développement de matériaux de construction.

III.1 Etude de l'influence du dosage de ciment : (témoin 0%)

III.1.1 Le Retrait :

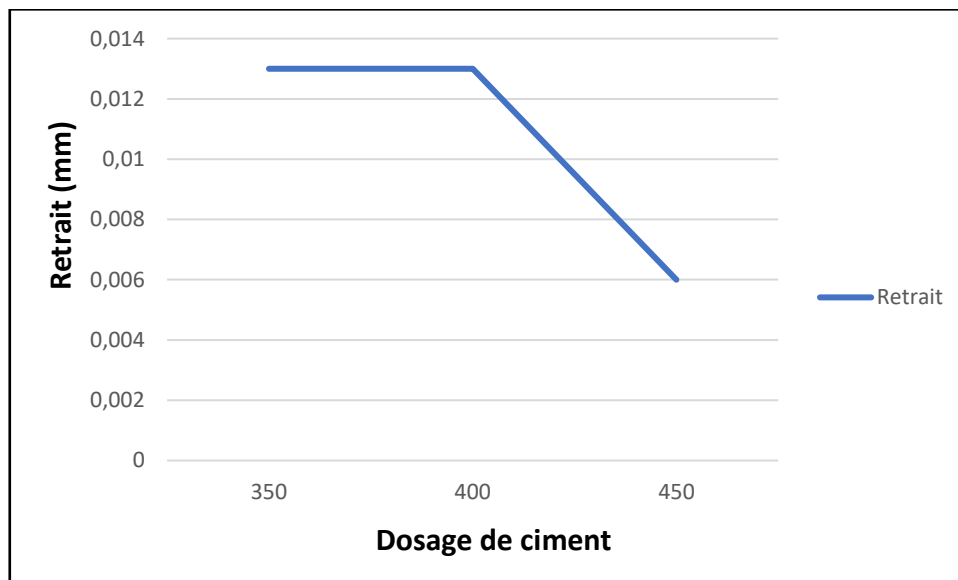


Figure III.1 Le retrait en fonction du dosage de ciment.

Interprétation et analyse :

Le retrait diminue de manière significative lorsque le dosage de ciment passe de 350g à 450g. Cette diminution se stabilise de valeur de 0.013 pour les dosages de ciment de 350 et 400. Le retrait

peut varier en fonction de nombreux facteurs tels que le dosage de ciment, Type de Ciment, Température et Humidité.

Cela pourrait être dû à une meilleure composition optimisé à ces dosages plus élevés.

III.1.2 La masse volumique la porosité et l'absorption :

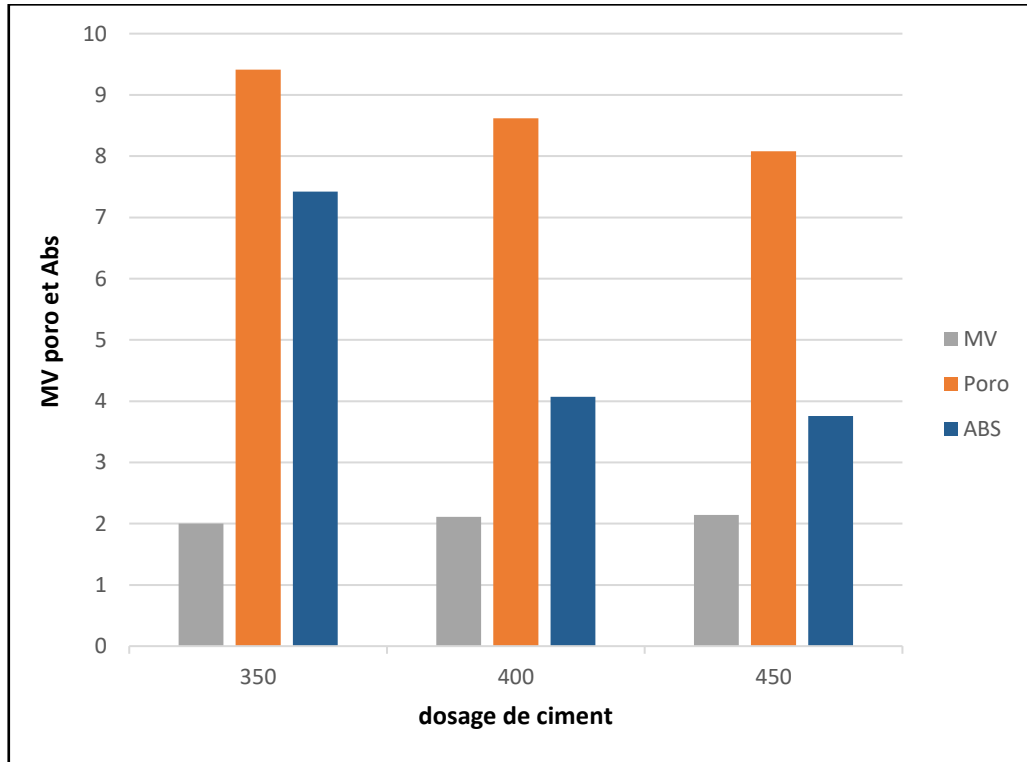


Figure III.2 Évolution de la Masse volumique, porosité et absorption en fonction du dosage.

Interprétation et analyse :

- La porosité est maximale à 350 kg/m³ et minimale à 450 kg/m³

La valeur de MV augmente de manière faible de 2.00 à 2.14 en fonction de l'augmentation de dosage (350 à 450) indique que le matériau est plus dense, La porosité diminue de 9.41 à 8.08 avec l'augmentation de dosage indique la diminution du vide, et pour La valeur d'absorption diminue de 7.42 à 3.76 avec l'augmentation de dosage de ciment indique que le matériau absorbe moins d'eau par rapport au augmentation de dosage, probablement en raison de la diminution de la porosité.

Nous constatons que l'augmentation du dosage de ciment dans un matériau augmente sa masse volumique, réduit sa porosité et son absorption d'eau.

Nous remarquons que les valeurs des trois paramètres précédents restent considérablement faibles.

III.1.3 La conductivité thermique :

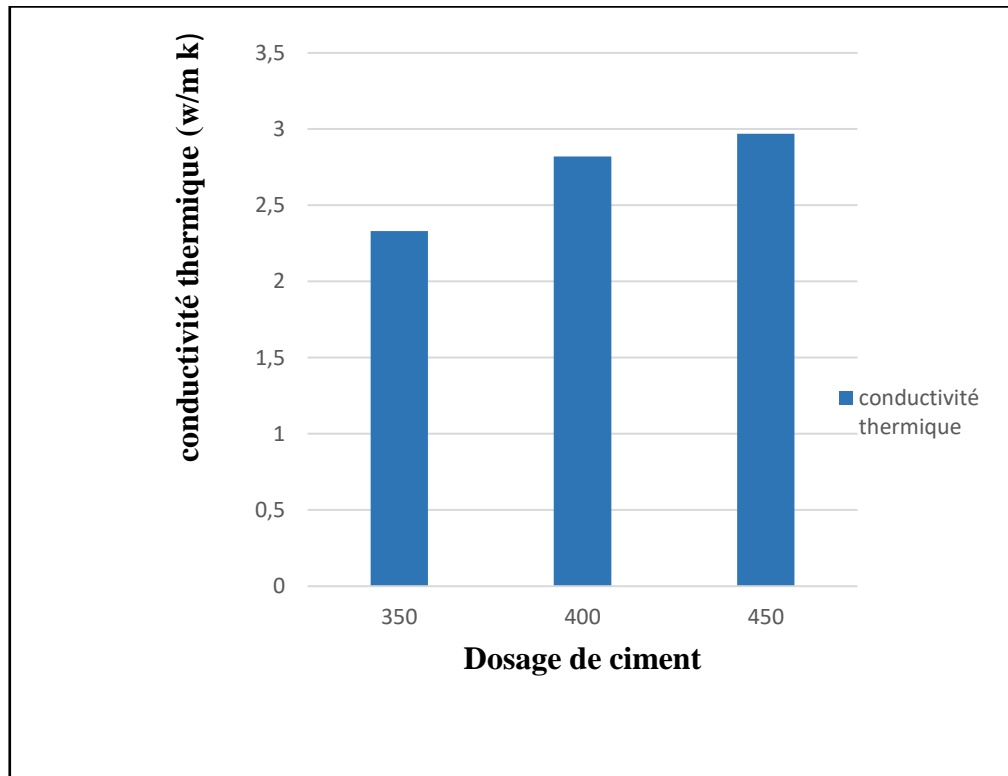


Figure III.3 La conductivité thermique en fonction du dosage.

Interprétation et analyse :

Selon la figure III.3 et le tableau III.2 nous remarquons qu'à 350g de ciment nous avons obtenu une valeur de 2.33 (w/m K) et pour 400g sa conductivité thermique est 2.82 (w/m K) Nous avons remarqué d'après la figure III.3 que la conductivité thermique a augmenté avec le dosage de ciment. D'après le tableau III.2 plus la conductivité thermique augmente sa résistance thermique diminue avec augmentation du dosage de ciment cela indique que plus il est faible le matériau est moins efficace pour isoler la chaleur. La diminution de la conductivité thermique est due à la présence des pores dans le mortier avec un dosage plus élevé en ciment, le mortier devient plus dense car le ciment comble les pores. Cela entraîne une augmentation de la conductivité thermique car il y a moins des pores.

III.1.4 La résistance mécanique :

La figure suivante représente les résultats de corrélation entre la résistance en Compression et la résistance en flexion en fonction de dosage :

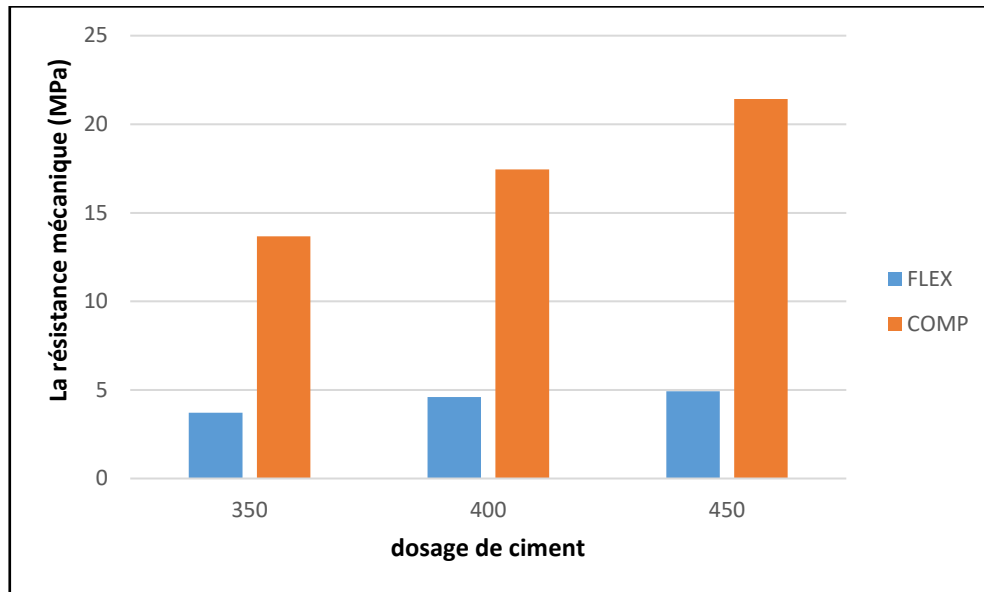


Figure III.4 La résistance en fonction du dosage de ciment.

Interprétation et analyse :

D'après la figure III.4 on remarque que la Flexion : [Pour 350 g : 3.72 MPa ; Pour 400 g : 4.6 MPa Pour 450 g : 4,93 (MPa), Compression : Pour 350 g : 13.68 MPa Pour 400 g : 17.45 MPa Pour 450 g : 21.42 (MPa). Ces valeurs en flexion montrent une certaine variabilité, mais globalement, elles sont relativement proches les unes des autres, ce qui indique une consistance raisonnable dans la résistance en flexion du mortier témoin. De même en compression il y a une certaine variabilité, mais les valeurs montrent que le mortier a une résistance en compression significativement plus élevée que sa résistance en flexion, ce qui est attendu pour la plupart des matériaux de construction. Les résultats montrent que le mortier témoin a une résistance en compression supérieure à sa résistance en flexion, ce qui est typique des matériaux de construction comme le mortier. La variabilité des résultats est présente mais reste dans des limites raisonnables.

Les valeurs obtenues peuvent être utilisées pour comparer ce mortier témoin avec d'autres formulations de mortier ou pour évaluer la qualité du mortier par rapport aux spécifications standardisées.

En conclusion nous avons observé que le dosage de ciment n'est pas un paramètre très influent.

III.2 Influence du pourcentage de l'ajout de PS :

III.2.1 Masse volumique :

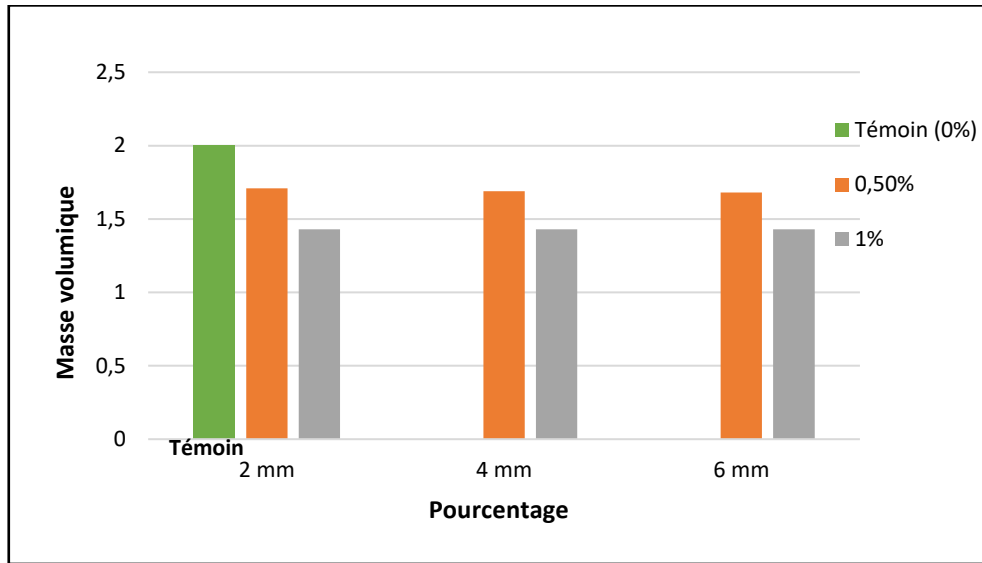


Figure III.5 La masse volumique en fonction de pourcentage Ps.

Interprétation des Résultats :

Pour chaque diamètre, la masse volumique diminue à mesure que le dosage de Ps augmente pour les tous les diamètres (2 ;4 ;6).

À 0% de pourcentage, sa masse volumique la plus élevée par rapport à d'autre pourcentage.

Pour aux autres pourcentages (0.5% et 1%), la masse volumique devient presque identique pour les trois diamètres, tendant autour de 1.7 pour 0.5% du PS et 1.4 pour 1% du PS.

La diminution de la masse volumique avec l'augmentation du dosage de pourcentage pourrait indiquer une augmentation du volume ou une diminution de la masse des particules avec le dosage de pourcentage ajouté, probablement lié à un traitement ou une modification des matériaux.

On remarque que la masse volumique du mortier avec l'ajout de polystyrène est décroissante en fonction du dosage en PSE. Les billes de polystyrène sont des billes légères l'augmentation de la quantité ajoutée en billes favorise la diminution de la masse volumique du mortier.

On conclut que l'ajout de polystyrène au mortier réduit la masse volumique globale du matériau, le rendant plus léger que le mortier sans ajout de polystyrène 0% (témoin).

Mortier témoin (sans PS) était de 2 et après l'ajout des billes de Ps elle à diminuée à 1.43 en ajoutant 1% de PS.

III.2.2 Absorption :

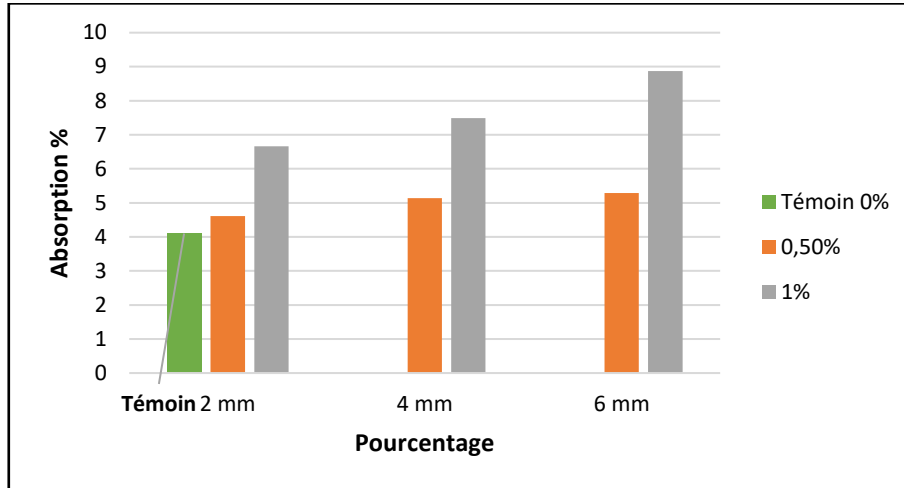


Figure III.6 Absorption en fonction de pourcentage de PS.

Interprétation et analyse :

D'après les résultats on trouve que à 0% du PS l'absorption diminue par rapport aux autre pourcentage, mais reste presque stable de 2 à 6 mm, pour 0.5% du PS l'absorption augmente légèrement avec l'augmentation de diamètre pour 1% l'absorption augmente significativement avec diamètre.

On remarque que l'effet de % du PS à 2mm, l'absorption est maximale pour 1% PS et minimale pour 0.50% du PS.

- L'absorption est la plus faible pour 0% du PS et augmente avec le l'ajout de pourcentage du PS.

III.2.3 Porosité :

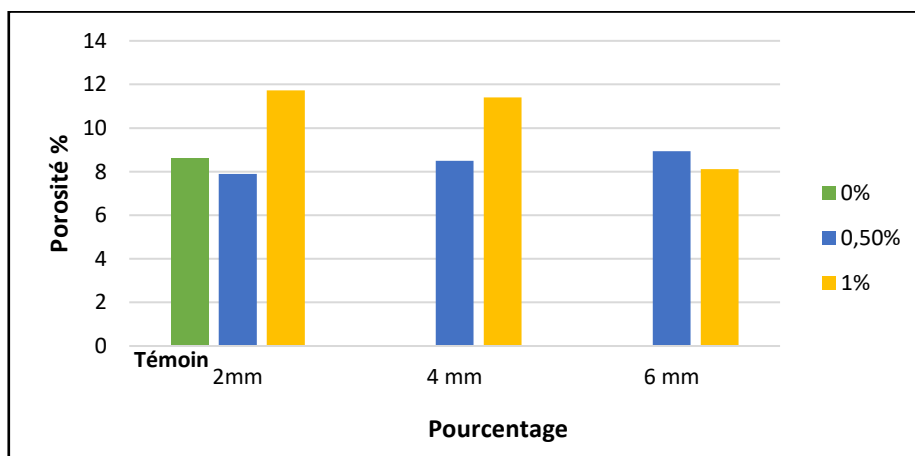


Figure III.7 Evolution de la porosité en fonction de pourcentage de PS.

Interprétation et analyse :

À 2 mm de diamètre, l'ajout de bille du PS augmente significativement la porosité, passant de 7.9% pour 0.5 % de PS à 11.72% avec 1% de PS. Cela suggère qu'à ce diamètre, l'ajout de PS favorise une plus grande porosité. À 4mm de diamètre, la tendance est différente : la porosité est légèrement plus élevée avec 1% de PS par rapport à 0,50% de PS, à 6 mm de diamètre, les résultats révèlent une tendance plus variée : la porosité est maximale à 0.50% de PS, ce qui est inattendu comparé aux autres diamètres où des pourcentages plus élevés de PS ont entraîné une porosité plus élevée. Cela suggère une interaction non linéaire entre le diamètre et l'effet du PS sur la porosité



Figure III.8 Essai de porosité.

III.2.4 La conductivité thermique :

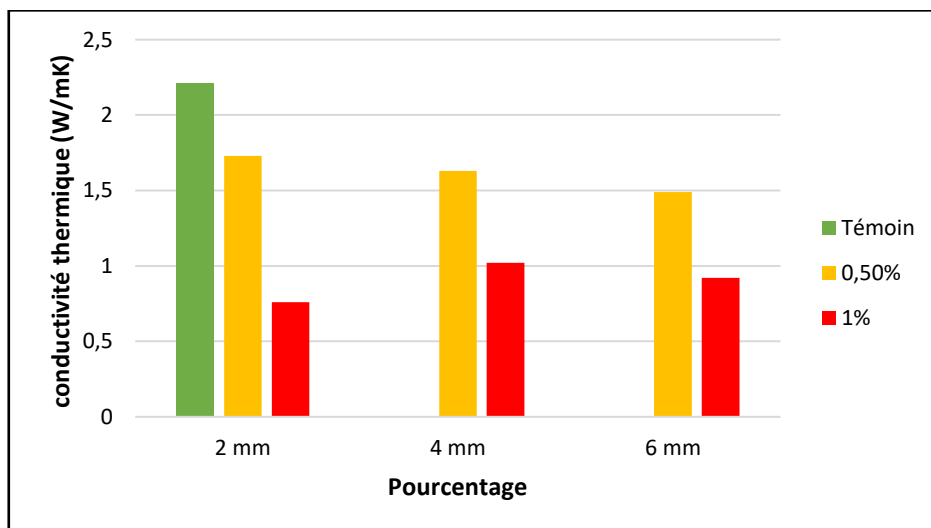


Figure III.9 Evolution de la conductivité en fonction du % PS.

Interprétation et analyse :

Les valeurs de conductivité thermique (en W/m K) pour différents diamètres et pourcentages du polystyrène sont les suivantes :

Pour un diamètre de 2mm, la conductivité thermique diminue de 1.73 W/m.K à 0.5% au 0.76 W/m.K, Pour un diamètre de 4 mm, la conductivité thermique réduite de 1.6 W/m.K à 0% à 1.02 W/m K et pour un diamètre de 6 mm, la conductivité thermique baisse de 1.49 w/m.k à 0.92 w/m.k Cela indique que l'ajout de bille du polystyrène au matériau réduit sa capacité à conduire la chaleur, le rendant efficace comme isolant thermique.



Figure III.10 Essai de conductivité thermique.

On conclut que l'ajout de polystyrène réduit la conductivité thermique du matériau, le rendant plus isolant. De plus, l'augmentation de diamètre du matériau tend également à réduire la conductivité thermique, bien que dans une moindre mesure par rapport à l'effet du pourcentage de polystyrène.

III.2.5 La résistance mécanique en fonction du dosage de Ps :

III.2.5.1 La flexion :

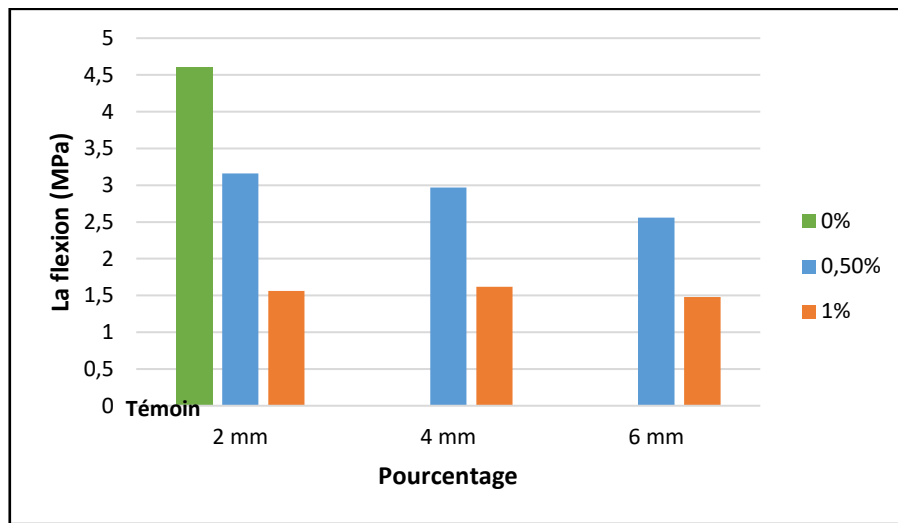


Figure III.11 Evolution de la résistance en flexion en fonction de % Ps.

Interprétation et analyse :

D'après les résultats obtenus on constate que la résistance en flexion (MPa) pour un diamètre de 2 mm nous avons trouvé 3.16 MPa pour 0.5% du PS et 1.56 pour 1% du PS.

Pour un diamètre de 4 mm on a trouvé 2.97 MPa en 0.5% du PS et pour 1% d'ajout du Ps on a trouvé 1.62 MPa et pour un diamètre de 6mm on a trouvé 2.56 MPa en 0.5% et 1.48 MPa en 1% d'ajout du Ps. On remarque que la résistance en flexion (MPa) montre une légère réduction avec l'augmentation de diamètre pour chaque pourcentage de polystyrène.

On conclut clairement que l'ajout de polystyrène diminue la résistance en flexion de matériau dans toutes les diamètres étudiés, montre une légère diminution de la résistance avec un diamètre croissante (2 ;4 ;6) mm pour chaque pourcentage.

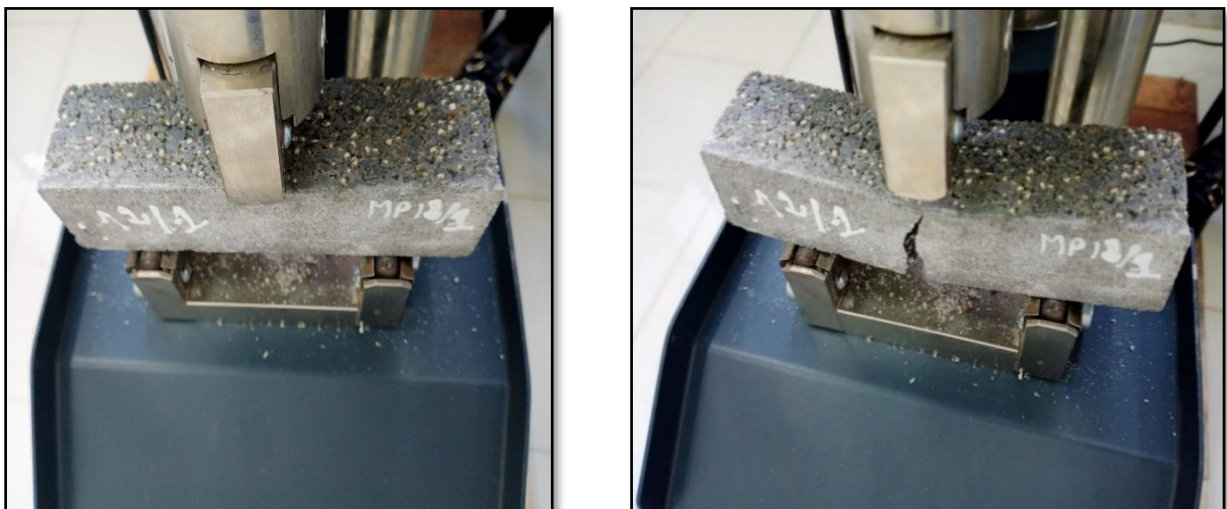


Figure III.12 Essai de flexion.

III.2.5.2 La compression :

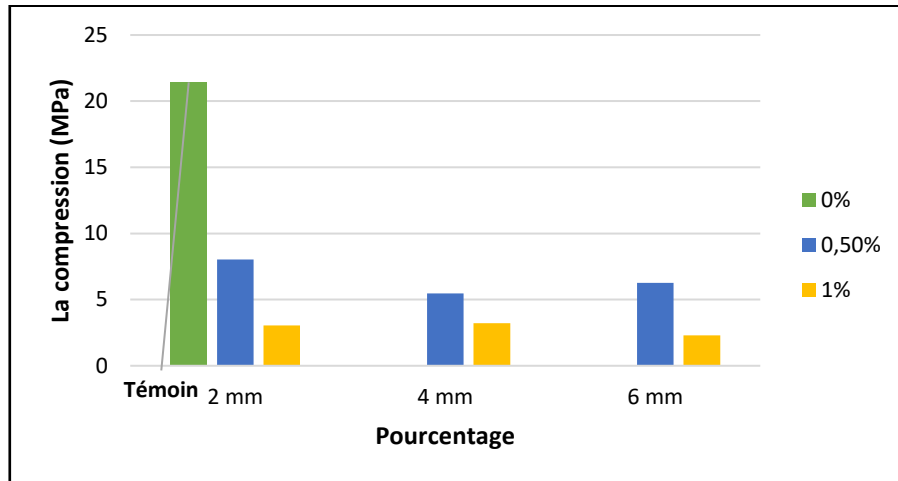


Figure III.13 Evolution de la résistance en compression en fonction de % Ps.

Interprétation et analyse :

D'après la figure III.13 les résultats sont obtenus à 28 jours.

Pour 0 % on a trouvé 21.42 MPa, pour diamètre de 2 mm on a trouvé 8.04 MPa pour 0.5% et 3.05 MPa pour 1% et nous avons remarqué que la résistance en compression (MPa) de 0% est plus élevée par rapport à celle de 1% telle que on a trouvé 21.42 MPa en 0% et 3.05 en 1%, on trouve 8.04 MPa en 0.5% du PS, pour un diamètre de 4 mm en 0.5 % du PS on a trouvé 5.47 MPa et pour 1% on trouve 3.21 MPa. Et pour un diamètre de 6 mm nous avons trouvé 6.27 pour un 0.5% du PS et 2.31 en 1% du PS.

D'après les résultats on constate que la résistance en compression (MPa) diminue en fonction de l'augmentation des pourcentages de polystyrène, notamment en fonction de diamètre. L'ajout de polystyrène joue un rôle important dans la propagation des fissures.



Figure III.14 Essai de compression.

Nous avons conclu que le mortier allégé à base de polystyrène puisse présenter une résistance mécanique inférieure à celle des mortiers témoins 0%, des solutions existent pour améliorer ses Possibilité. L'optimisation de la formulation, l'incorporation de renforts, et l'utilisation d'additifs permettent d'obtenir un matériau adapté à de nombreuses applications de construction, alliant légèreté, isolation.

III.3 Influence de diamètre de l'ajout du PS :

III.3.1 La porosité :

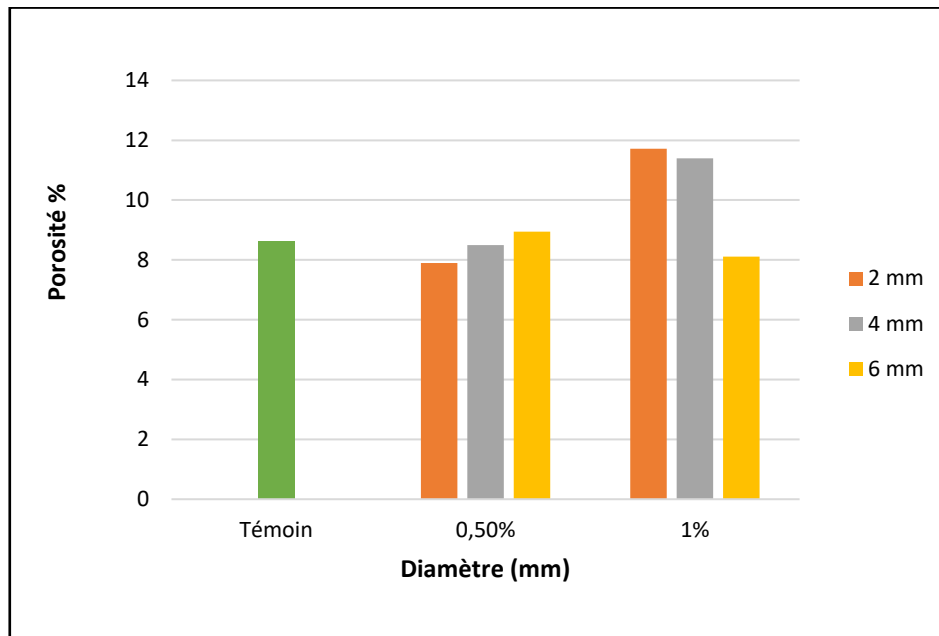


Figure III.15 Evolution de la porosité en fonction du diamètre.

D'après la figure III.15 on remarque pour :

0% la porosité est diminuée par rapport 1%, pour 0.5%, la porosité montre une légère augmentation de 2 mm à 4 mm et 6 mm, et pour 1%, la porosité augmente initialement de 2 mm, puis diminue significativement de 4 mm à 6 mm.

On conclut que La porosité semble être influencée différemment selon le pourcentage.

III.3.2 Absorption :

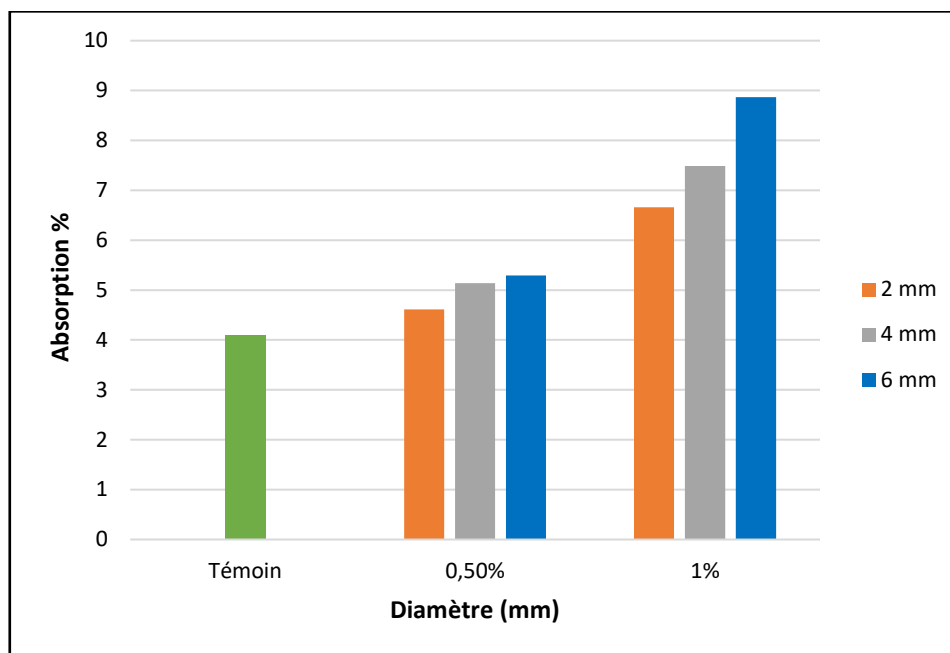


Figure III.16 Evolution de l'absorption en fonction du diamètre.

Nous avons remarqué pour 0 % de Ps, (4.1%) un taux d'absorption.

Pour 0.50 % de l'ajout PS nous avons remarqué que pour le diamètre 2mm (4.61%) à diminué, tandis qu'elle augmente pour les diamètres de 4 mm (5.14%) et 6 mm (5.29%), dépassant ainsi celle du matériau de 2 mm.

Pour 1 % de l'ajout Ps nous avons remarqué que pour le diamètre 2mm (6.66%) à diminué, tandis qu'elle augmente pour les diamètres de 4 mm (7.49%) et 6 mm (8.87%), dépassant ainsi celle du matériau de 2 mm.

Nous avons conclu que l'augmentation de la concentration tend à augmenter l'absorption de plus grand diamètre de manière plus significative cela indique que l'absorption sont influencées à la fois par le diamètre

III.3.3 Masse volumique :

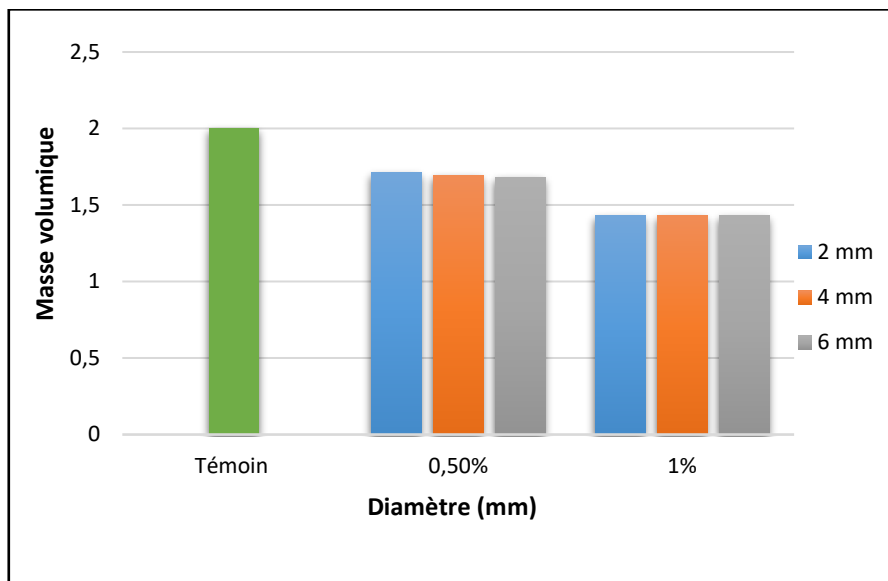


Figure III.17 Evolution de la Mv en fonction de diamètre.

Nous avons remarqué d'après la figure III.17 que pour :

0%, la masse volumique augmente par rapport aux autres pourcentages de 0.50% et 1%, la masse volumique diminue, mais cette diminution est presque uniforme pour tous les diamètres (2, 4 et 6) mm pour les pourcentages de 0.5 % et 1% de l'ajout du PS.

En résumé, la masse volumique diminue avec l'augmentation du pourcentage pour tous les diamètres, et cette diminution est presque uniforme à 0.50% et 1%. À 0%, la densité est légèrement plus élevée par rapport aux autres pourcentages.

III.3.4 Conductivité thermique :

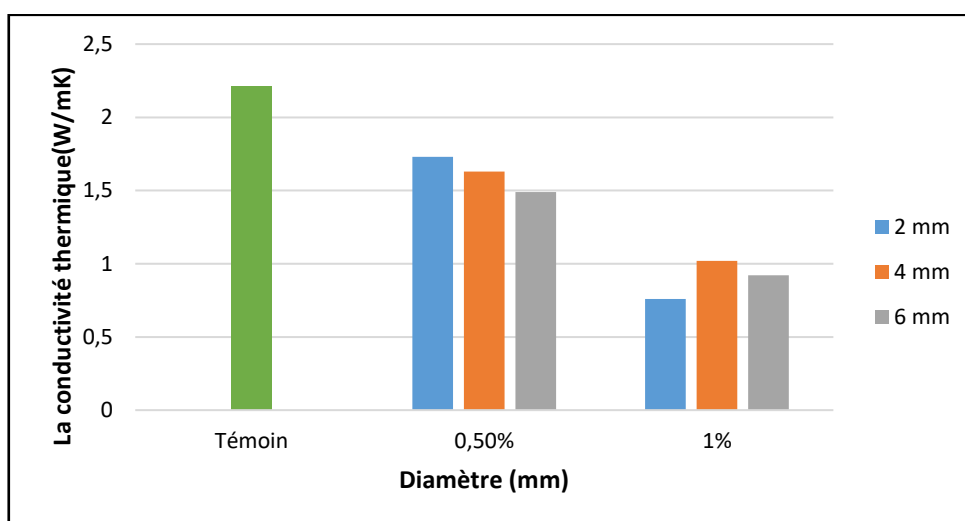


Figure III.18 La conductivité thermique en fonction du diamètre (mm).

Pour chaque diamètre fixe, on mesure que le pourcentage augmente, la conductivité diminue.

À 2 mm : 0.50% (1.73) et 1% (0.76)

À 4 mm : 0.50% (1.63), et 1% (1.02)

À 6 mm : 0.50% (1.49), et 1% (0.92)

Nous avons remarqué d'après la figure III.18 que l'augmentation du diamètre conduit à une diminution de la conductivité pour tous les pourcentages et augmentation du pourcentage entraîne également une diminution de la conductivité pour tous les diamètres.

III.3.4 La flexion :

Les résultats de la résistance à la flexion de mortier ajout de polystyrène sont présentes dans la figure ci-dessous :

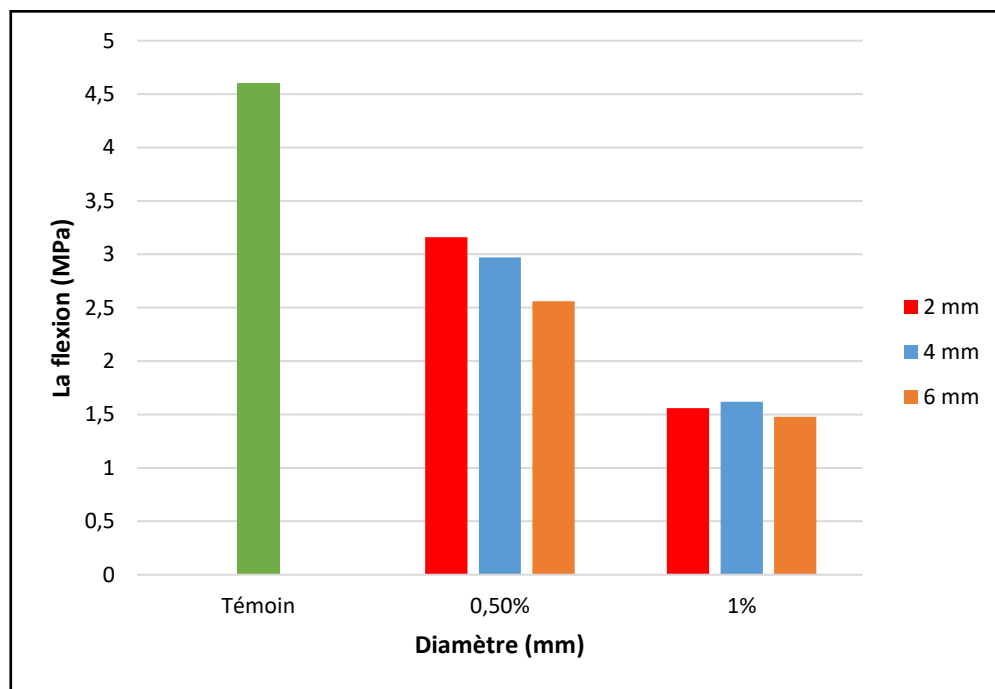


Figure III.19 Evolution de la flexion en fonction du diamètre (mm).

D'après la figure III.19 On remarque pour :

- 0.5% d'ajout du Ps la flexion diminue également : 3.16 (2 mm), 2.97 (4 mm), 2.56 (6 mm), par rapport à le témoin (4.6).
- 1% d'ajout du Ps la flexion montre une tendance non linéaire, augmentant puis diminuant : 1.56 (2 mm), 1.62 (4 mm), 1.48 (6 mm).

On conclut que L'augmentation du diamètre réduit la flexion pour tous les pourcentages de polystyrène, une diminution du diamètre entraîne une augmentation de la flexion. Le diamètre de 2 mm montre toujours la flexion la plus élevée pour chaque pourcentage, tandis que le diamètre de 6 mm d'épaisseur montre la flexion la plus basse.

III.3.5 La compression :

Les résultats de la résistance à la compression de mortier ajout de polystyrène sont présentes dans la figure ci-dessous :

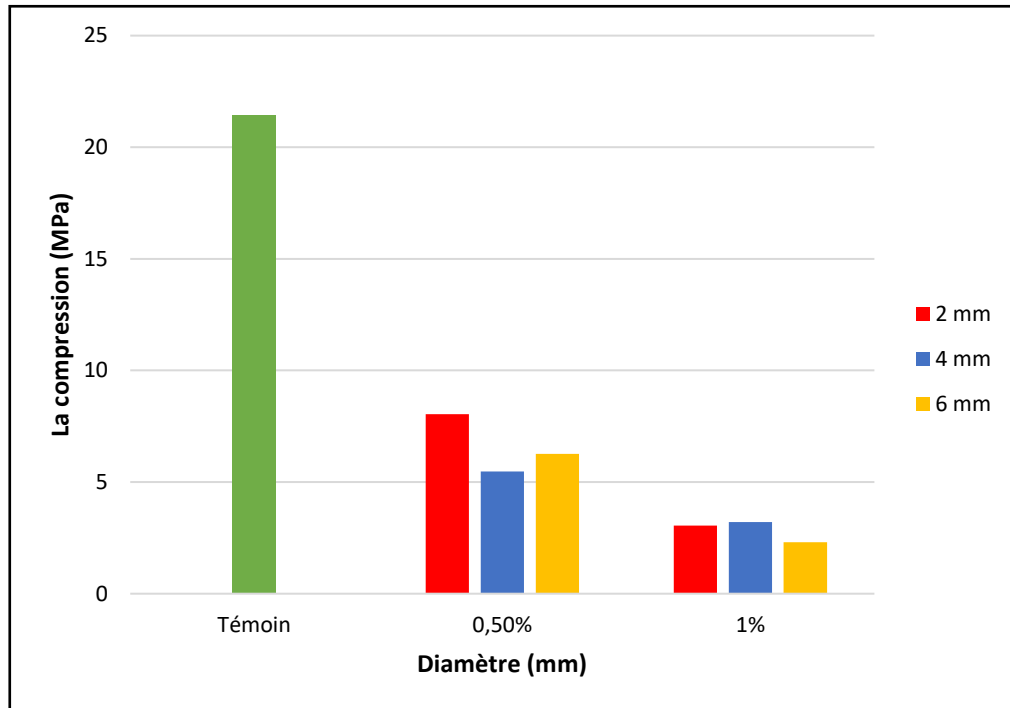


Figure III.20 Evolution de la compression en fonction de diamètre (mm).

D'après la figure III.20 On remarque pour :

- 0.5% d'ajout du Ps la flexion diminue également : 8.04 (2 mm), 5.47 (4 mm), 6.27 (6 mm).
- 1% d'ajout du Ps la flexion montre une tendance non linéaire, augmentant puis diminuant: 3.05 (2 mm), 3.21 (4 mm), 2.31 (6 mm).

On conclut que la compression à diminuer lorsque le diamètre augmente, comparant au témoin.



Figure III.21 L'ajout de Polystyrène avec différents diamètres.

Conclusion :

L'analyse des résultats a démontré de manière claire que l'intégration de billes de polystyrène expansé (PSE) dans la matrice cimentaire entraîne un allègement significatif de cette dernière, mais se traduit également par une diminution notable de la résistance mécanique, tant en compression qu'en traction par flexion. L'incorporation des billes de PSE permet de réduire la densité du mortier, cependant, cette réduction de la masse volumique s'accompagne d'une diminution marquée des propriétés mécaniques.

L'augmentation du volume de billes de polystyrène dans le mélange influence considérablement les caractéristiques du mortier. Elle entraîne principalement la formation de pores, rendant le mortier moins compact et, par conséquent, moins résistant. Toutefois, les performances en termes d'isolation thermique sont nettement améliorées, une réduction thermique 74 % entre le mortier sans ajout et le mortier avec l'ajout de PSE.

Conclusion générale

L'objectif principal de l'étude était de développer un mortier allégé en incorporant des granulats de polystyrène expansé (PSE), afin de réduire la densité du matériau tout en conservant des propriétés mécaniques et physiques adéquates pour des applications de construction. Ainsi, l'utilisation de différents pourcentages de 0%, 0.50% et 1%, avec des granulats de différents diamètres (2mm, 4mm, et 6mm), a permis de mettre en lumière plusieurs conclusions importantes. La méthodologie impliquait une série de tests et d'analyses pour caractériser les propriétés du mortier à base de polystyrène, incluant des essais de densité, de résistance à la compression, de conductivité.

- Tout d'abord, l'introduction progressive du polystyrène dans le mortier a démontré une diminution significative de la masse volumique du matériau final. Ce résultat confirme l'efficacité de l'allègement du mortier grâce à l'incorporation de ce matériau léger. En gardant une porosité contrôlée et une absorption d'eau dans les limites des normes.
- L'étude a permis l'allègement du matériau s'accompagne d'une amélioration du comportement thermique. Ce résultat confirme l'efficacité de l'incorporation de ce matériau pour optimiser les propriétés thermiques du mortier.
- Sur le plan des performances mécaniques, les échantillons avec 0.50% et 1% de polystyrène ont présenté des caractéristiques satisfaisantes en termes de résistance à la compression et de résistance à la flexion. L'allègement du matériau s'accompagne d'une perte de résistance mécanique, bien que des résistances mécaniques acceptables soient possibles avec de faibles dosages en PSE. Ces résultats indiquent que l'ajout de polystyrène n'a pas compromis de manière significative les propriétés mécaniques du mortier.
- Les résultats montrent que le diamètre de PSE n'a pas une influence significative sur les propriétés physiques, thermique et mécaniques, telles que la masse volumique, l'absorption et la résistance (compression, flexion).
- Enfin, du point de vue économique et environnemental, l'utilisation du polystyrène recyclé comme matériau d'allègement offre une solution viable pour réduire la consommation de matériaux traditionnels plus lourds, tout en valorisant des déchets plastiques.

Le mortier allégé présente des avantages significatifs pour la rénovation de structures anciennes grâce à sa légèreté et pour les nouvelles constructions en raison de ses propriétés d'isolation thermique. Ce travail, constituant une étude sur les mortiers légers à base de PSE, ouvre la voie à de nombreuses recherches futures pour confirmer les résultats, optimiser les formulations et étudier l'impact environnemental et la viabilité économique de ces mortiers.

Les références

Chapitre I :

[1] **MEHTA, P. & MONTEIRO, P.**; « Concrete: Microstructure, Properties of Materials. »; IBRACON Edition: Nicole Pagan Hasparyk; ISBN: 978-85-98576-21-3; 2014.

[2] http://mediatheque.accesmad.org/educmad/pluginfile.php/46638/mod_resource/content/0/Les%20mortiers.pdf.

[3] **Joseph ABDO**, « Ciments », Technique de l'ingénieur ; <https://doi.org/10.51257/a-v2-c920>; Paris ; 2020.

[4] **LALDJI S.** ; « Caractéristiques fondamentales du béton. Cours-Béton -ETS S I » ; 2015.

[5] **BENYAHIA N. et BENKHENNOUCHE N.** « Etude de l'influence des fillers calcaires, rapport (Eau/Ciment) et taux d'adjuvant sur la résistance mécanique d'un mortier à base d'un sable de concassage », Mémoire de fin d'étude génie civil, Université de Bejaïa ; 2016.

[6] **GHRIEB A.** ; « Étude de Stabilisation pour la Valorisation des Sables de Dune en Assises de Chaussée – Étude Comparative Entre Trois Sables de la Région de Djelfa (Algérie) » Thèse de doctorat ; 2014.

[7] **BOUALI K.** ; « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires » mémoire de magister BOUALI Khaled Université du BOUMERDES. [2013/2014]

[8] <http://www.guidebeton.com/eau-gachage>.

[9] [https://www.scribd.com/document/512040297/4-Les-mortiers \(matériau\) Chaux](https://www.scribd.com/document/512040297/4-Les-mortiers-(matériau)-Chaux)

[10] **GHOMARI F.**, « Matériaux de construction », Université BOUBAKER BLKAID ; 2012.

[11] **Hau NGUYEN.** ; « Valorisation du verre dans le béton Etude expérimentale du comportement de pâte de ciment et du mortier: rhéologie, mécanique et durabilité », thèse option mécanique des solide, Université D'AIX-MARSEILLE IUSTI UMR CNRS 7343 ; 2013.

[12] **A. GUIDOUM.** ; « Matériaux de Construction POLYMERES ET COMPOSITES, article scientifique » ; 2007.

[13] **Dupain.R, L'Anchor, Saint-Arroman.J.C.** ; « Granulats, Sols, Ciments et Béton », Eddition A. Capliez, Paris 2004"

[14] **CALDERON V., HORGNIES M.** ; « Utilisation de polymères recyclés dans les mortiers et bétons » ; July 2013.

[15] **BAROGHEL-BOUNY V.** ; « Caractérisation de la microstructure des bétons ». Laboratoire central des ponts et chaussés. Paris ; 2008.

[16] https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://betonlab.pro.ifsttar.fr/fileadmin/contributeurs/BetonlabPro/formation/betonlabfree/leconfree_02.pdf&ved=2ahUKEwjxs9KyutGGAxUxTqQEhdQFBgsQFnoECCUQAQ&usg=AOvVaw3u0LTDiGAMCGOAFgI-dHa

[17] **BODROS E., BALEY C.** ; « Étude des propriétés de biopolymère renforcés par des fibres de lin aléatoirement dispersées dans le plan de stratification », propriété aux interfaces et composites, Université de Bretagne-Sud, 2006

[18] <https://www.gralon.net-article/matériels-et-consommables/matériel-industriels/le-polystyrène-caractéristique-et-application-1383>.

[19] **ERNER A., HENRY J.F., BILLON N.** ; « Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as measured by infrared thermography » ESAFORM'2004 Conf. Proc., Trondheim, Norway. 2004.

[20] **FARHI R., MOREL C., CHERON G.** ; « Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité ». INRS, ED638, octobre 2006.

[21] Commission Européenne Direction Générale CCR Centre Commun De Recherche. Institut de Prospective Technologique, « Fabrication des polymères », (2009).

[22] **FOREST J., HUDON F., VILLEMURE-PICOTTE L.** ; « Guide environnemental sur L'industrie des matières plastiques Et ou caoutchouc », 1985.

[23] **ENCYCLOPEDIA, MCGRAW HILL.** ; « Guide to Plastics, by the Editor of Modern Plastics », Inc. New York, (1970).

[24] **MILLETTE L., BELANGER E.** ; « Etude sur les alternatives de valorisation des résidus de polystyrène à l'École Polytechnique de Montréal », Projet de fin d'études ; 2008.

[25] **CARREGA M.** ; « Aide-mémoire Matières plastiques ». 2^{ème} Edition ; 2009.

[26] **MAHIOUT S.** ; « Mettre en valeur ou bannir le polystyrène-approches dans un cadre de développement durable ». Mémoire master, Université de Sherbrooke; 2014.

[27] **SOTEHI N.** ; « Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de l'isolation » thèse Doctorat ; Université du Constantine. 2010.

[28] Société Industrielle de Polystyrène et d'Emballage (SIPA). (2023). Propriétés et avantages du polystyrène expansé(PSE). SIPA. Consulté le 13 juin 2024, à partir de <https://www.sipa-pse.fr/proprietes-avantages-polystyrene-expanse>.

[29] **GROUP EDILTECO** « Mortier léger prêt à l'emploi isolant et fibre 500 kg/m³ catalogue 109 ; 2019 ; pages 1-6.

[30] <https://www.cmesmat.fr/actualites-conseils/mortier-leger-xxl>

[31] **NEVILLE A.M.** ; « Properties of Concrete »; 4th Edition. Addison Wesley Longman Limited; 2015.

[32] MOUGARI.B, « l'étude expérimentale d'un mortier renforcé par des fibres végétales, étude des propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques du béton à base végétale » mémoire de master ; université Tizi Ouzou ;2016.

[33] AMER.B, et al ; « l'effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment » ; laboratoire des technologies innovantes, Université de Picardie Jules Verne.

[34] CADERE C.A., et al « Engineering properties of concrete with polystyrene granules » 2018, Pages 288-293

[35] KISMI M., MOUNANGA.P, ; « Comparaison performantielle à court et à long termes de Mortiers légers à base de déchets de mousse de polyuréthane rigide et de billes de polystyrène expansé » in : matecweb of conférences. Edp sciences, 2012. 8 PAGES.

[36] ZANE.M, DJEMAA.N, « Elaboration et caractérisation d'un mortier léger par introduction de billes de polystyrène » ; mémoire de master ; université de Bouira ; 2019.

Chapitre II :

LES NORMES

[37] NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. AFNOR, 2012.

[38] NF P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications. AFNOR 1995.

[39] NF P94-050 : Sols reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage. AFNOR, 1995.

[40] NF EN 933-8 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : évaluation des fines - Équivalent de sable. AFNOR, 2012

[41] NF EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats : qualification des fines - Essais au bleu de méthylène. AFNOR, 2013.

[42] NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau (la méthode du pycnomètre), AFNOR, 2014

[43] NF P15-435 : Méthodes d'essais des ciments - Détermination de la masse volumique. AFNOR, 2021

[44] NF EN 196-3 : Méthodes d'essai des ciments - partie 3: détermination du temps de prise et de la stabilité. AFNOR, 2017.

[45] NF P 18-404 Bétons - Essais d'étude, de convenance et de contrôle - Confection et conservation des éprouvettes. AFNOR, 1981.

[46] NF P 18-459 : Essai de porosité et de masse volumique. AFNOR, 2010.

[47] NF EN 1015-18 : Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 18 :
détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci. AFNOR, 2003

[48] NF P15-433 : Méthodes d'essais des ciments - Détermination du retrait et du gonflement.
AFNOR, 1994.

[49] ISO 8302 : Isolation thermique Détermination de la résistance thermique et des propriétés
connexes en régime stationnaire. Méthode de la plaque chaude gardée. AFNOR ,1991.



[50] NF P18-407 : Bétons - Essai de flexion. AFNOR, 1981.

[51] NF P18-406 : Bétons - Essai de compression. AFNOR, 1981.

Annexes





Annexe A : La teneur en eau.

 وزارة الأشغال العمومية و الري و المنشآت القاعدية مجمع دراسة المنشآت، الترابية و المساحة مخبر الأشغال العمومية لشرق البلاد Laboratoire des Travaux Publics de l'Est Société par action au capital de 1.800.000.000,00 DA DIRECTION GENERALE		 LTP Est		
F5.doc 1				
Structure :	<i>Feuille D'essai de laboratoire</i>		Document de référence NF P 94-050 ; version septembre 1995	
Dossier N° :	SOL: Détermination De La Teneur En Eau			
Échantillon N° :	Pondérale des matériaux			
Mode de prélèvement : Ech intact Ech Remanié Ech reconstitué			Date de prélèvement:	
Température d'étuvage :		Profondeur :	Date d'essai: 17/04/2024	
Provenance /projet :				
<i>Expression des résultats</i>				
Essai	Prise 01	Prise 02	Prise 03	Prise 04
Numéro de la tare (coupelle et/ou bac)	N	L		
m ₁ =Masse tare (g)	197,40	197,06		
m ₂ =(échantillon humide+tare) (g)	609,59	688,65		
m _h =m ₂ -m ₁ (g)	412,19	491,59		
m ₃ =(échantillon sec+tare) (g)	608,05	687,08		
m _{sec} =m ₃ -m ₁ (g)	410,65	490,02		
m _w =m ₂ -m ₃ (g)	1,54	1,57		
$\frac{m_w}{m_d} \times 100 = 100x \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \rightarrow$ Teneur en eau(W= — x 100 = 100x —) (%) (arrondir à 0.1%)	0,375	0,320		
Moyenne (%)	0,347			



Annexe B : Résultats d'analyse granulométrique.

Structure :		Feuille d'essai de laboratoire		F5.doc 18	
Dossier N°:		Granulats : Analyse Granulométrique par tamisage		Document de référence NF EN 933-1	
Identification Ech. :				Version Mai 2012	
Provenance du matériau:			Date de réception:		Date d'essai: 21/04/2024
Expression des résultats					
Procédé utilisé:			lavage et tamisage		Tamisage par voie sèche
Masse sèche M1: 2883 g			Masse sèche après lavage M2: 2720,64		
Masse sèche des fines retirées par lavage M1 - M2 = 62,36					
Ouverture des tamis (mm)	Masse des refus Ri (kg)	Masse des refus cumulés Rn(kg)	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M1) x 100	Pourcentage cumulé de tamisât 100 - (Rn/M1 x 100)	Observation
40,0					
31,5					
25,0					
20,0					
16,0					
14,0					
10,0					
8,0					
6,3		7	0,24	100	
4,0		15	0,52	99	
2,0		49	1,70	98	
1,0		170	5,9	94	
0,5		774	26,85	73	
0,315		1739	60,32	39	
0,25		2150	74,58	25	
0,125		2747	95,28	4	
0,063		2806	97,33	2	
Matériau dans le réceptacle : P = 1			$\Sigma Ri : 362,72$		
$\frac{M2 - (\sum Ri + P)}{M1} \times 100 = <1\%$ 0,87		$f = \frac{(M1 - M2) + P}{M1} \times 100 = 2,1977$		Tamisage à sec : $f = \frac{100 \times P}{M1} = 0,10346$	

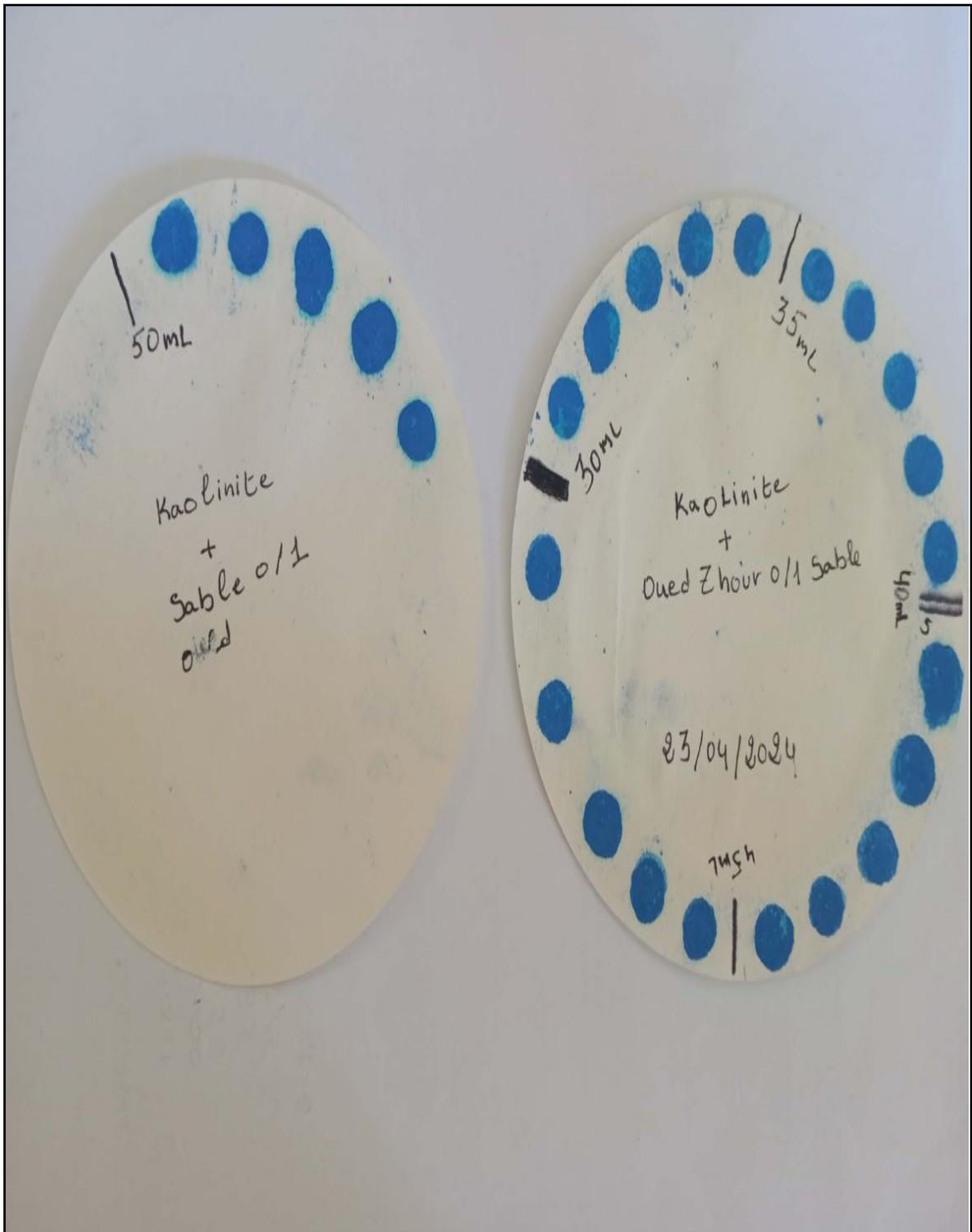
Annexe C : Essai équivalent de sable.

	 وزارة الأشغال العمومية و البر و التشييد القابضة مجمع مؤسسة التشييد البرالية و التسيير مخبر الأشغال العمومية شرق البلاد Laboratoire des Travaux Publics de l'Est Société par action au capital de 1.800.000.000,00 DA DIRECTION GENERALE	 LTP Est
F5.doc 24		
Structure :	Feuille d'essai de laboratoire	Document de référence NF EN 933-8 Version Mars 2012
Dossier N°:	Granulats : Evaluation des fines Equivalent de sable	
Identification Ech. :		
Provenance du matériau:	Date de réception:	Date d'essai: 22/04/2024
Expression des résultats		
Teneur en eau 1 ^{ère} prise d'essai (Sous échantillon N°01) W (%)	0,347	
Masse humide de la 2 ^{ème} prise d'essai M1 (g)		
Masse sèche de la 2 ^{ème} prise d'essai après lavage à 0,063mm M2 (g)		
Teneur en fines $(f = 100 - \frac{M2(100+W)}{M1})$ (%)		
Si $f \leq 10\%$ Masse de chaque éprouvette:	$M_T = \frac{120(100+W)}{100}$	120,41
Si $f > 10\%$ Masse de chaque éprouvette:	$M_T = M_3 + M_4$	
M3 : Masse granulat humide 2 ^{ème} sous échantillon	$M = \frac{1200}{1 + \frac{W}{100}}$	
M4 : Masse du sable correcteur sec	$M_4 = 120 - \frac{1200}{f}$	
	Première éprouvette	Deuxième éprouvette
Masse de l'éprouvette M _T (g)	120,41	120,41
Hauteur du floculat h1 (mm)	10,7	10,7
Hauteur du sédiment h2 (mm)	8,8	8,7
Rapport (h2/h1)*100	82,24	81,30
Equivalent de sable : SE (10) SE ₄	81,7	

Annexe D : Essai au bleu de méthylène.

 وزارة الأشغال العمومية و الري و المنشآت الطاعمية مجمع دراسة المنشآت الترابية و المساعدة مخبر الأشغال العمومية لشرق البلاد Laboratoire des Travaux Publics de l'Est Société par action au capital de 1.800.000.000,00 DA DIRECTION GENERALE		 LTP Est
F5.doc 25		
Structure :	Feuille d'essai de laboratoire	Document de référence NF EN 933-9
Dossier N°:	Granulats : Qualification des fines	Version : Juin 2013
Identification Ech. :	Essai au Bleu de Méthylène	
Provenance du matériau:	Date de réception:	Date d'essai: 23/04/2024
Expression des résultats		
Teneur en eau W (%)		0,347
Masse initiale de la prise d'essai M0 (g)		200
Masse sèche de la prise d'essai M1 = M0/1+(W/100) (g)		199,30
Volume du bleu introduit V1 (cm ³)		50
Volume du bleu adsorbée par la Kaolinite (Si utilisée) V' = 30xMB _K (cm ³)		40
Valeur au Bleu de la fraction 0/2 des sables et des graves $MB = \frac{V1}{M1} \times 10$ (g/Kg)		1
Valeur au Bleu de la fraction 0/2 des sables et des graves Si ajout de Kaolinite $MB = \frac{V1 - V'}{M1} \times 10$ (g/Kg)		0,50
Pourcentage en masse des passant à 2 mm de lafraction0/D (C) (%)		
MB _{0,075} = 0.01 x Cx MB (g/Kg)		
Valeur au Bleu de Méthylène de la fraction0/0,125mm $MB_F = \frac{V1}{M1} \times 10$ (g/Kg)		

Annexe E : Test de bleu.



Annexe F : Essai de méthode au pycnomètre.

		وزارة الأشغال العمومية و الري و المنشآت القاعدية مجمع دراسة المنشآت، المراقبة و المساهمة مخبر الأشغال العمومية لشرق البلاد Laboratoire des Travaux Publics de l'Est Société par action au capital de 1.800.000.000,00 DA DIRECTION GENERALE			
Structure :			Feuille d'essai de laboratoire		Document de référence NF EN 1097-6 Version : Janvier 2014
Dossier N°:			Masse volumique réelle et coefficient d'absorption d'eau des sables		
Échantillon N° :			Méthode au pycnomètre (0.063/4 mm)		
Provenance du matériau:		Date de l'échantillonnage:		Date de réception : 21/04/2024	
Classe granulaire d/D :		Date d'essai:			
Expression des résultats					
Masse volumique de l'eau à la température enregistrée: ρ_w (T/m ³)		15,2		0,99991	
Masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs M_1 (g)		555,16			
Masse du pycnomètre contenant l'échantillon des granulats saturés M_2 (g)		1138,66			
Masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement M_3 (g)		808,92			
Masse dans l'air de la prise d'essai séchée à l'étuve M_4 (g)		553,62			
Masse volumique absolue: $\rho_a = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$ (T/m ³)		2,470			
Masse volumique réelle séchée à l'étuve: $\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$ (T/m ³)		2,453			
Masse volumique réelle saturée surface sèche: $\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$ (T/m ³)		2,460			
Coefficient d'absorption d'eau: $W_A = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$ (%)		0,28			
Vérification: $\rho_{ssd} = \rho_{rd} + \rho_w (1 - \rho_{rd} / \rho_a)$		2,459			