

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2024

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA**



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**KAHLAL Mohamed**

**DJEKBOUB Rebeh El Machi**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

**Thème :**

**Elaboration et caractérisation physico-mécanique et thermique  
d'un mortier léger**

**Devant le jury composé de :**

MOKEDDEM Youssef	MCB	Président
LAOUCHEDI Dalila	MCB	Examinatrice
HAMI Brahim	MCB	Encadrant

**Année Universitaire 2023/2024**

## Remerciements

**Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.**

**En premier lieu, je remercie mon encadreur HAMI BRAHIM, pour sa guidance précieuse, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce projet. Son expertise et sa disponibilité ont été essentielles à l'aboutissement de ce travail.**

**Nous souhaitons également remercier l'ensemble du corps professoral de l'université AKLI MOHAND OULHADJ pour les connaissances et les compétences qu'ils nous ont transmises au cours de ces années d'études.**

**Un grand merci à mes amis et collègues de travail, en particulier mon mari MOHAMED, pour leur soutien moral et leurs encouragements. Leurs discussions et leurs suggestions ont souvent été une source d'inspiration et de motivation.**

**Sans oublier nos familles, qui ont toujours cru en nous et nous ont soutenu sans failles. Leur amour et leur encouragement nous ont donnés la force de persévérer même dans les moments les plus difficiles.**

**Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet et à la réussite de notre parcours académique.**

**Merci à tous.**

**DJEKBOUB Rebh El machi**

## Remerciements

**Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.**

**En premier lieu, je remercie mon encadreur HAMI BRAHIM, pour sa guidance précieuse, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de ce projet. Son expertise et sa disponibilité ont été essentielles à l'aboutissement de ce travail.**

**Nous souhaitons également remercier l'ensemble du corps professoral de l'université AKLI MOHAND OULHADJ pour les connaissances et les compétences qu'ils nous ont transmises au cours de ces années d'études.**

**Un grand merci à mes amis et collègues de travail, en particulier ma femme rebh el machi, pour leur soutien moral et leurs encouragements. Leurs discussions et leurs suggestions ont souvent été une source d'inspiration et de motivation.**

**Sans oublier nos familles, qui ont toujours cru en nous et nous ont soutenu sans failles. Leur amour et leur encouragement nous ont donnés la force de persévérer même dans les moments les plus difficiles.**

**Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet et à la réussite de notre parcours académique.**

**Merci à tous.**

**KAHLAL Mohamed**

## **DEDICACE**

**Nous dédions ce modeste travail à nos chers parents, dont le soutien indéfectible et les encouragements constants ont été une source de motivation inestimable tout au long de notre parcours académique.**

**Et bien sûr à nos chers enfants Amani et Louai  
À mon mari MOHAMED, pour son soutien moral et ses encouragements.**

**Et à toute la famille Kahlal et Djekboub**

**Merci à tous du fond du cœur**

**KAHLAL Mohamed**

**et**

**DJEKBOUB Rebh El Machi**

## Résumé

Le mortier léger est un matériau de construction utilisé pour l'isolation thermique et acoustique, constitué d'un mélange d'eau, de sable, de ciment et de granulats légers. Cette étude expérimentale s'est penchée principalement sur deux types de mortiers légers : le mortier cellulaire et le mortier à base de granulats légers. Pour obtenir des mortiers allégés, le sable a été partiellement remplacé par des granulats de polystyrène à divers pourcentages (10%, 20%, 30% et 40%). De plus, six formulations distinctes ont été développées avec différents pourcentages de poudre d'aluminium (2%, 2.2%, 2.4%, 2.6% et 2.8%) pour produire du mortier cellulaire. Les caractéristiques physico-mécaniques (densité, résistance à la compression et à la flexion) et thermiques de ces mortiers ont été étudiées et comparées à celles d'un mortier de référence. Les résultats ont révélé qu'il est possible d'alléger le mortier en incorporant de la poudre d'aluminium et du polystyrène. Cependant, pour maintenir des résistances acceptables à la flexion et à la compression, il ne faut pas dépasser 20% de substitution du sable par des granulats de polystyrène et 2.2% de poudre d'aluminium.

**Mots Clés :** Mortier léger, Mortier cellulaire, Polystyrène, Poudre d'aluminium, Caractéristiques physico-mécaniques, Isolation thermique.

## ملخص

الملاط الخفيف هو مادة بناء تُستخدم للعزل الحراري والصوتي، تتكون من خليط من الماء والرمل والأسمنت والركام الخفيف. ركزت هذه الدراسة التجريبية بشكل أساسي على نوعين من الملاط الخفيف: الملاط الخلوي المعتمد على الركام الخفيفة الوزن. لإنتاج ملاط خفيف، تم استبدال جزء من الرمل بركام البولسترين بنسب مختلفة (10%، 20%، 30%، و40%). بالإضافة إلى ذلك، تم تطوير ست تركيبات مختلفة بنسب مختلفة من مسحوق الألومنيوم (2%، 2.2%، 2.4%، 2.6%، و2.8%). تمت دراسة الخصائص الفيزيائية الميكانيكية (الكثافة، مقاومة الضغط، ومقاومة الانحناء) والحرارية لهذه الملاط ومقارنتها بملاط مرجعي. أظهرت النتائج أنه يمكن تخفيف الملاط عن طريق إضافة مسحوق الألومنيوم البولسترين. ومع ذلك، للحفاظ على مقاومات مقبولة للانحناء والضغط، يجب ألا يتجاوز استبدال الرمل بحصى البولسترين 20%، وألا يتجاوز مسحوق الألومنيوم 2.2%.

**الكلمات المفتاحية:** الملاط الخفيف، الملاط الخلوي، البولسترين، مسحوق الألومنيوم، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، العزل الحراري.

## Abstract

Lightweight mortar is a construction material used for thermal and acoustic insulation, composed of a mixture of water, sand, cement, and lightweight aggregates. This experimental study focused primarily on two types of lightweight mortars: cellular mortar and lightweight aggregate mortar. To produce lightweight mortars, sand was partially replaced with polystyrene aggregates at various percentages (10%, 20%, 30%, and 40%). Additionally, six distinct formulations were developed with different percentages of aluminum powder (2%, 2.2%, 2.4%, 2.6%, and 2.8%) to produce cellular mortar. The physico-mechanical (density, compressive strength, and flexural strength) and thermal properties of these mortars were studied and compared to those of a reference mortar. The results revealed that it is possible to lighten the mortar by incorporating aluminum powder and polystyrene. However, to maintain acceptable flexural and compressive strengths, the substitution of sand with polystyrene aggregates should not exceed 20%, and the aluminum powder should not exceed 2.2%.

**Keywords:** Lightweight mortar, Cellular mortar, Polystyrene, Aluminum powder, Physico-mechanical properties, Thermal insulation.

**Table des matières**

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I</b>	
I. Généralités sur les mortiers.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition du béton léger .....	3
I.3. Constituants du béton.....	3
I.3.1. Le ciment.....	3
I.3.2. Les granulats .....	4
I.3.3. Le sable .....	4
I.3.4. Les graviers .....	4
I.3.5. L'eau de gâche .....	5
I.3.6. Les adjuvants.....	5
I.3.6.1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité et la rhéologie du béton.....	5
I.3.6.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement.....	5
I.3.6.3. Adjuvants modifiant des propriétés particulières .....	6
I.3.7. Les Agents Moussants.....	6
I.3.8. Renforcement du béton léger par les fibres.....	6
I.4. Les mortiers .....	7
I.4.1. Introduction .....	7
I.4.2. Définition du mortier.....	7
I.4.3. Composants du mortier .....	8
I.4.3.1. Le sable.....	8
I.4.3.2. Le liant.....	8
I.4.3.3 L'eau de gâchage .....	8
I.4.3.4. Les adjuvants .....	9
I.4.4. Les type des mortiers.....	9
I.4.4.1. Les mortiers de ciment .....	9
I.4.4.2. Les mortiers de chaux.....	9
I.4.4.3. Mortiers bâtards .....	9
I.4.4.4. Le Mortier réfractaire .....	9
I.4.4.5. Mortier rapide .....	9
I.4.4.6. Mortier industriel.....	9
I.4.5. Classifications des mortiers.....	10
I.4.5.1. Classification selon leur domaine d'utilisation .....	10
I.4.5.2. Classification selon la nature du liant.....	10

---

I.4.6. Le rôle d'utilisation de mortier.....	10
I.4.7. Fonctions d'un mortier.....	11
I.4.8. Emplois des mortiers.....	11
I.4.8.1. Les joints de maçonnerie.....	11
I.4.8.2. Les enduits.....	12
I.4.8.3. Les chapes.....	12
I.4.8.4. Les scellements et les calages.....	13
I.4.9. Méthodes de préparation des mortiers.....	13
I.4.9.1. Préparation manuelle.....	13
I.4.9.2. Préparation mécanique.....	14
I.4.10. Caractéristiques des mortiers.....	14
I.4.10.1. A l'état frais.....	14
I.4.10.2. A l'état durci.....	16
I.5. L'isolation thermique.....	17
I.5.1. Introduction.....	17
I.5.2. Avantages de l'isolation thermique.....	18
I.5.3. Inconvénients de l'isolation thermique.....	19
I.5.4. Les type d'isolations.....	19
I.5.4.1. Les isolants traditionnels.....	19
I.5.4.2. Les nouveaux isolants.....	19
I.5.5. Le polystyrène expansé.....	19
I.5.5.1. Définition du polystyrène.....	20
I.5.5.2. Composition chimique du Polystyrène.....	20
I.5.5.3. Les types de polystyrène expansé.....	21
I.5.5.4. Fabrication de polystyrène expansé.....	22
I.5.5.5. Propriétés du polystyrène expansé.....	22
I.5.5.6. Les avantages et les inconvénients du polystyrène expansé.....	23
I.6. Conclusion.....	23

## **Chapitre II**

II. Les bétons légers.....	24
II.1. Introduction sur les bétons légers.....	24
II.2. Bétons cellulaires.....	24
II.2.1. Production des bétons légers.....	25
II.2.1.1. Bétons cellulaires.....	25
II.2.1.2. Béton mousse.....	25
II.3. Béton de granulats légers.....	26

II.4. Béton caverneux (béton sans fines) .....	27
II.5. Plusieurs catégories de granulats légers .....	28
II.5.1. Granulats légers naturel .....	28
II.5.1.1. Granulats minéraux .....	28
II.5.1.2. Granulats Végétaux .....	29
II.5.2. Granulats obtenus par traitements des déchets industrie .....	29
II.5.3. Granulats artificiels .....	31
II.3.4.1. Argiles et schiste expansés .....	31
II.3.4.2. Verre fritte .....	32
II.3.4.3. Polystyrènes expansés .....	32
II.6. Caractéristiques des granulats légers .....	33
II.6.1. Caractéristiques géométriques .....	33
II.6.2. Propriétés mécaniques des granulats légers .....	33
II.6.3. Propriétés élastiques des granulats légers .....	34
II.6.4. Propriétés spécifiques des granulats légers .....	34
II.6.4.1. Porosité .....	34
II.6.4.2. Absorption d'eau .....	35
II.6.4.3. Masse volumique apparente des granulats légers : .....	36
II.6.4.4. Masse volumique réelle .....	36
II.7. Propriétés des bétons légers .....	37
II.7.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers .....	37
II.7.1.1. Comportement structural .....	37
II.7.1.2. Résistance à la compression .....	37
II.7.1.3. Résistance à la traction .....	38
II.7.1.4. Module d'élasticité .....	38
II.7.1.5. Retrait et fluage .....	39
II.7.1.6. La masse volumique .....	40
II.7.1.7. Durabilité .....	40
II.7.1.8. Conductivité thermique .....	41
II.8. Les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons provenant de granulats légers .....	41
II.8.1. Les propriétés mécaniques .....	41
II.8.2. Retrait .....	42
II.8.3. L'isolation thermique .....	43
II.9. Domaines d'utilisation des bétons légers .....	43
II.10. Conclusion .....	44

**Chapitre III**

III. Matériaux et méthodes de caractérisation .....	45
III.I. Introduction.....	45
III.2. Le sable .....	45
III.3. La masse volumique du sable.....	45
III.3.1. Masse volumique apparente [NF EN 1097-3] [44] .....	46
III.3.2. Masse volumique absolue [NF EN 1097- 6] [45].....	46
III.4. Analyse granulométrique par tamisage [NF EN 933-1] [46].....	47
III.4.1. Mode Opérateur.....	47
III.4.2. Module de finesse (NFP 18-540) [47].....	48
III.5. Equivalent de sable.....	48
III.5.1. Mode Opérateur.....	49
III.6. Le ciment.....	49
III.6.1. La masse volumique absolue du ciment .....	50
III.6.2. La consistance normalisée.....	50
III.6.3. Essai de prise .....	51
III.7. La chaux .....	52
III.8. Le super plastifiant .....	52
III.9. La poudre d'aluminium .....	53
III.10. Polystyrène expansé .....	53
III.11. Le mortier.....	54
III.11.1. Confection des mortiers.....	54
III.11.2. Mortier à base de granulat léger (polystyrène).....	55
III.11.3. Mortier cellulaire .....	56
III.11.4. Les essais thermiques .....	57
III.11.5. Essai d'étalement sur mortier (table à secousse) .....	58
III.11.6. La masse volumique du mortier .....	58
III.11.7. Coefficient d'absorption [NF EN 1097- 6] [45].....	59
III.11.8. Essais de compression .....	59
III.11.9. Essai de flexion (EN 196-1) [53].....	60
III.11.10. Les caractéristiques thermiques des mortiers .....	61
III.11.11. Détermination de la vitesse de propagation du son (Ultrason).....	61
III.12. Conclusion.....	61

## **Chapitre IV**

IV. Résultat et discussion .....	62
IV.1. Introduction .....	62
IV.2. Résultats de caractérisation physique des matériaux .....	62
IV.2.1. Sable .....	62
IV.2.1.1. Masse volumique .....	62
IV.2.1.2. Analyse granulométrique .....	62
IV.2.1.3. Equivalent de sable .....	63
IV.2.2. Ciment .....	63
IV.2.2.1. Masse volumique .....	63
IV.2.2.2. Consistance du ciment .....	64
IV.2.2.3. L'essai de prise du ciment .....	64
IV.2.2.3. Composition chimique et minéralogique du ciment .....	64
IV.2.2.4. La résistance mécanique de ciment : .....	65
IV.2.3. Polystyrène .....	65
IV.2.3.1. La masse volumique .....	65
IV.2.3.2. Analyse granulométrique .....	65
IV.3. Résultats et analyse relatif au mortier .....	66
IV.3.1. A l'état frais .....	66
IV.3.1.1. La maniabilité .....	66
IV.3.2. A l'état durci .....	68
IV.3.2.1. La masse volumique .....	68
IV.3.2.2. Résistance à la compression .....	70
IV.3.2.3. Résistance à la flexion (Traction indirecte) .....	71
IV.3.2.4. Gonflement des éprouvettes de mortier de la poudre d'aluminium .....	75
IV.3.2.5. La conductivité thermique .....	75
IV.3.2.6. Coefficient d'absorption d'eau .....	78
IV.3.2.7. La vitesse de propagation du son (Ultrason) .....	81
IV.3.2.8. La variation de masse volumique en fonction de la résistance .....	82
IV.3.2.9. La variation de la résistance à la compression après 28 j en fonction de la conductivité thermique .....	83
IV.3.2.10. La variation de la masse volumique après 28 j en fonction de la conductivité thermique .....	84
IV.3. Conclusion .....	84
Conclusion générale .....	86
Références bibliographiques .....	88

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Fibres de polypropylène.....	7
<b>Figure I.2.</b> Le mortier.....	7
<b>Figure I.3.</b> Constituants de mortier et du béton.....	8
<b>Figure I.4.</b> Type de mortier.....	10
<b>Figure I.5.</b> Les joints de maçonnerie.....	12
<b>Figure I.6.</b> Enduit traditionnel.....	12
<b>Figure I.7.</b> Les chapes traditionnelles.....	13
<b>Figure I.8.</b> Scellement, calage de platine.....	13
<b>Figure I.9.</b> Préparations manuelles de mortier.....	13
<b>Figure I.10.</b> Malaxeur.....	14
<b>Figure I.11.</b> Essai d'étalement sur table à secousse.....	15
<b>Figure I.13.</b> Principe de fonctionnement du Maniabilimètre.....	15
<b>Figure I.14.</b> Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.....	16
<b>Figure I.15.</b> Dispositif de rupture en compression.....	16
<b>Figure I.16.</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.....	17
<b>Figure I.17.</b> Répartition des déperditions thermiques.....	18
<b>Figure I.18.</b> Polystyrène.....	20
<b>Figure I.19.</b> La structure de polystyrène expansé.....	21
<b>Figure I.20.</b> Polystyrène expansé moulé (PSE-M).....	21
<b>Figure I.21.</b> Polystyrène expansé extrudé (PSE-X).....	22
<b>Figure II.1.</b> Figure schématique des diverses catégories de béton léger.....	24
<b>Figure II.2.</b> Typique du béton cellulaire autoclave.....	25
<b>Figure II.3.</b> Béton caverneux (béton sans fines).....	27
<b>Figure II.4.</b> Pierre de ponce.....	28
<b>Figure II.5.</b> Pouzzolane.....	28
<b>Figure II.6.</b> Copeaux de bois.....	29
<b>Figure II.7.</b> Granulats de liège.....	29
<b>Figure II.8.</b> Laitier expansé.....	30
<b>Figure II.9.</b> Cendres volantes.....	30
<b>Figure II.10.</b> Vermiculite.....	31
<b>Figure II.11.</b> Perlite.....	31
<b>Figure II.12.</b> Argiles et schiste expansés.....	32
<b>Figure II.13.</b> Verre fritte.....	32
<b>Figure II.14.</b> Polystyrènes expansés.....	32
<b>Figure II.15.</b> Porosité des granulats.....	35
<b>Figure II.16.</b> Absorption d'eau des granulats d'argile expansés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV).....	36
<b>Figure II.17.</b> Figure schématique du flux de contraintes dans le béton en cours de production (à gauche) et dans le béton léger de construction (à droite).....	37
<b>Figure II.18.</b> La résistance à la compression sur cube et la masse volumique après séchage à l'étuve d'un béton léger à argile expansée sont corrélées.....	38
<b>Figure II.19.</b> Le module d'élasticité de différents bétons légers est corrélé à la masse volumique après séchage à l'étuve.....	39

<b>Figure II.20.</b> Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants.....	40
<b>Figure II.21.</b> La corrélation entre la capacité du béton à s'affaisser après 28 jours (mesurée sur des cubes) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 5 cm et fabriqués avec divers granulats légers.....	42
<b>Figure II.22.</b> Le retrait endogène évolue au fil du temps : déformation libres (a) et contraintes causées par le retrait empêché (b) ; bétons légers avec des granulats saturés (BL-8,9%) et partiellement saturés (BL-5,8%) ; bétons de granulats rigides (BO).....	43
<b>Figure III.1.</b> Sable utilisé.....	45
<b>Figure III.2.</b> Mesure de la masse volumique apparente.....	46
<b>Figure III.3</b> Mesure de la masse volumique absolue.....	47
<b>Figure III.4.</b> Série des tamis.....	48
<b>Figure III.5.</b> Essais d'équivalent de sable visuel et au piston.....	48
<b>Figure III.6.</b> Mesure de la masse volumique absolue du ciment.....	50
<b>Figure III.7.</b> Exemple de mesure de la consistance normalisée du ciment.....	51
<b>Figure III.8.</b> Exemple de mesure de la prise du ciment.....	52
<b>Figure III.9.</b> Sac de 20 kg de la chaux.....	52
<b>Figure III.10.</b> Le super plastifiant.....	53
<b>Figure III.11.</b> La poudre d'aluminium.....	53
<b>Figure III.12.</b> Granulat de polystyrène.....	54
<b>Figure III.13.</b> Malaxage des constituants de mortier.....	54
<b>Figure III.14.</b> Mode de conservation des éprouvettes prismatiques (4x4x16).....	55
<b>Figure III.15.</b> Eprouvette prismatique (4x4x16) du mortier de polystyrène.....	56
<b>Figure III.16.</b> Mortier cellulaire (avec ajout de poudre d'alumine) éprouvette prismatique (4x4x16) cm <sup>3</sup> .....	57
<b>Figure III.17.</b> Mortier pour l'essai thermique « éprouvette (10x7x2,5) cm <sup>3</sup> ».....	57
<b>Figure III.18.</b> L'essai de l'étalement de mortier.....	58
<b>Figure III.19.</b> Détermination de la masse volumique des éprouvettes de mortier.....	59
<b>Figure III.20.</b> Essais de Coefficient d'absorption des éprouvettes.....	59
<b>Figure III.21.</b> L'essai de compression.....	60
<b>Figure III.22.</b> L'essai de flexion.....	60
<b>Figure III.23.</b> Le CT METRE.....	61
<b>Figure IV. 1.</b> Courbe granulométrie du sable.....	63
<b>Figure IV.2.</b> La granulométrie de polystyrène.....	66
<b>Figure IV.3.</b> Histogramme valeurs d'étalement (%) pour le mortier.....	67
<b>Figure IV.4.</b> Histogramme des résultats de la masse volumique à 7jrs et 28jrs.....	68
<b>Figure IV.5.</b> Histogramme des résultats de la masse volumique à 7 et 28j.....	69
<b>Figure IV.6.</b> Ecrasement des éprouvettes demi-prismes.....	70
<b>Figure IV.7.</b> Histogramme des résultats de résistance à la compression.....	71
<b>Figure IV.8.</b> Ecrasement des éprouvettes prismatiques.....	71
<b>Figure IV.9.</b> Histogramme des résultats de résistance à la flexion.....	72
<b>Figure IV.10.</b> Histogramme des résultats de résistance à la compression.....	73
<b>Figure IV.11.</b> Histogramme des résultats de résistance à la flexion.....	74
<b>Figure IV.12.</b> Figure après gonflement des éprouvettes.....	75
<b>Figure IV.13.</b> Histogramme des résultats de la conductivité thermique (mortier PSE).....	76

<b>Figure IV.14.</b> Histogramme des résultats de la conductivité thermique (mortier PAL) .....	77
<b>Figure IV.15.</b> Histogramme des résultats de coefficient d'absorption.....	78
<b>Figure IV.16.</b> Histogramme des résultats de coefficient d'absorption.....	80
<b>Figure IV.17.</b> Histogramme de vitesse de propagation de son .....	81
<b>Figure IV.18.</b> La variation de masse volumique en fonction de la résistance à la compression (PSE) .....	82
<b>Figure IV.19.</b> La variation de masse volumique en fonction de la résistance à la compression .....	82
<b>Figure IV.20.</b> La variation de la résistance à la compression après 28 j en fonction de la conductivité thermique.....	83
<b>Figure IV.21.</b> La variation de la masse volumique en fonction de la conductivité thermique	84

Liste des tableaux

<b>Tableau I.1.</b> Les avantages et les inconvénients du polystyrène expansé.....	23
<b>Tableau II.1.</b> Les caractéristiques des bétons en cellule .....	26
<b>Tableau II.2.</b> Typologie des bétons légers .....	26
<b>Tableau II.3.</b> Classes de densité pour le béton de granulats légers .....	27
<b>Tableau II.4.</b> Texture poreuse de certains granulats .....	35
<b>Tableau II.5.</b> En fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve, la conductivité thermique des bétons légers à base d'argile expansée et des bétons courants est évaluée (valeurs de dimensionnement selon la norme SIA 381/1) .....	41
<b>Tableau II.6.</b> Caractéristiques des bétons de granulats légers .....	44
<b>Tableau III.1.</b> Type du sable en fonction des valeurs du module de finesse.....	48
<b>Tableau III.2.</b> La qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable par piston et visuel (d'ESP et ESV).....	49
<b>Tableau III.3.</b> Les propriétés de base de la poudre d'aluminium.....	53
<b>Tableau III.4.</b> Les formulations du mortier à base de granulats légers (polystyrène).....	55
<b>Tableau III.5.</b> Les formulations du mortier cellulaire (avec ajout de poudre d'alumine).....	56
<b>Tableau III.6.</b> Classification des mortiers en fonction de leurs étalements.....	58
<b>Tableau IV.1.</b> Résultat Masses volumiques du sable.....	62
<b>Tableau IV.2.</b> Résultat de l'essai de l'analyse granulométrie de sable par tamisage .....	62
<b>Tableau IV.3.</b> Résultat de l'essai d'équivalent de sable. ....	63
<b>Tableau IV.4.</b> Résultat Masses volumiques du ciment.....	63
<b>Tableau IV.5.</b> Résultat de l'essai de consistance normale.....	64
<b>Tableau IV.6.</b> Résultat de l'essai de prise.....	64
<b>Tableau IV.7.</b> Composition chimique et minéralogique de ciment utilisée CEM II/42,5 .....	65
<b>Tableau IV.8.</b> Evolution de la résistance en compression de ciment utilisée CEM II/42,5....	65
<b>Tableau IV.9.</b> Résultat de la masse volumique de polystyrène. ....	65
<b>Tableau IV.10.</b> Résultats de l'analyse granulométrique du polystyrène. ....	66
<b>Tableau IV.11.</b> Valeurs mesurées de l'étalement pour le mortier témoin et substituée. ....	67
<b>Tableau IV.12.</b> Résultat de la masse volumique d'éprouvette à 7 et 28 jours.....	68
<b>Tableau IV.13.</b> Résultat de la masse volumique d'éprouvette à 7 et 28 jours (à base de poudre d'aluminium).....	69
<b>Tableau IV.14.</b> Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la compression en fonction du temps de conservation (mortier à base de polystyrène) .....	71
<b>Tableau IV.15.</b> Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la flexion en fonction du temps de conservation (mortier à base de polystyrène) .....	72
<b>Tableau IV.16.</b> Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la compression en fonction du temps de conservation (mortier à base de poudre d'aluminium) .....	73
<b>Tableau IV.17.</b> Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la flexion en fonction du temps de conservation (mortier à base de poudre d'aluminium) .....	74
<b>Tableau IV.18.</b> Résultats de conductivité thermique (mortier à base de polystyrène) .....	76
<b>Tableau IV.19.</b> Résultats de conductivité thermique (mortier de la poudre d'aluminium) ....	77
<b>Tableau IV.20.</b> Résultat de l'essai de coefficient d'absorption de l'échantillon (à base de polystyrène).....	78

<b>Tableau IV.21.</b> Résultat de l'essai de coefficient d'absorption de l'échantillon (à base de poudre d'aluminium).....	79
<b>Tableau IV.22.</b> Résultat de l'essai de l'ultrason de l'échantillon (à base de poudre d'aluminium) après 28 j. ....	81

## **Introduction Générale**

### Introduction générale

La plupart des matériaux de construction présentent des défis liés à leur poids, ce qui est particulièrement vrai pour le béton avec une densité de  $2400 \text{ kg/m}^3$ . Toutefois, il est possible de fabriquer un béton de densité réduite en utilisant des agrégats légers ou en créant des vides dans le mélange granulaire du béton, ce qui leur donne une densité bien inférieure à celle des bétons ordinaires. En incorporant ces agrégats légers dans un mélange du béton, on peut obtenir un béton de qualité structurale avec une densité d'environ  $1850 \text{ kg/m}^3$ . Les coûts de construction sont réduits grâce au béton léger, qui facilite la construction et présente l'avantage d'être un matériau de construction relativement "écologique". Le béton léger peut également offrir des avantages supplémentaires, tels qu'une meilleure isolation thermique et une durabilité accrue face à l'humidité.

De nombreuses avancées ont bouleversé les constructions en béton au cours des dix dernières années, dont les bétons légers, ceux dont la masse volumique à l'état sec est inférieure à  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Ces bétons sont utilisés dans le domaine du génie civil depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle, notamment en Europe (France, Allemagne), en Amérique (USA) et en Asie (Japon et ancienne URSS). Ces bétons sont de plus en plus utilisés en raison des bénéfices qu'ils offrent, notamment sur le plan économique et technique. En général, ces bétons sont fabriqués selon trois méthodes, à savoir l'utilisation d'agrégats légers, de l'aération ou du gaz, ou en réduisant la partie fine du granulat.

Afin d'améliorer ce genre de béton, il est crucial de prendre en compte deux aspects essentiels : les idées concernant la fabrication de bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, l'évaluation du potentiel des matériaux légers comme source de matières premières devient de plus en plus intéressante.

Ce mémoire a été réalisé au laboratoire du département de Génie Civil de l'université Akli Mohand Oulhadj de Bouira. Son objectif est d'examiner l'impact de la substitution du sable par des taux de granulats du polystyrène expansé et de poudre d'aluminium sur le comportement physico-mécanique et thermique du béton.

Dans cette étude pour élaborer des mortiers légers, le sable a été partiellement remplacé par des granulats de polystyrène à différents pourcentages (10 %, 20 %, 30 % et 40 %). De plus, six formulations distinctes ont été développées avec différentes quantités de poudre d'aluminium (2 %, 2,2 %, 2,4 %, 2,6 % et 2,8 %) pour produire un mortier cellulaire.

Les propriétés physiques et mécaniques (densité, résistance à la compression et à la flexion) ainsi que les propriétés thermiques de ces mortiers seront analysées et comparées à celles d'un mortier de référence.

Le présent mémoire est structuré en quatre parties distinctes. Le chapitre I se focalise sur des informations générales sur les mortiers. Le second chapitre II représente une analyse bibliographique des bétons légers et des bétons cellulaires. Le chapitre III présente les caractéristiques, les essais et techniques d'analyse des matériaux utilisés dans la confection des mortiers. Le dernier chapitre est une analyse et discussion des résultats expérimentaux concernant le comportement physico-mécanique et thermique du mortier léger et le mortier cellulaire. Enfin, et en se basant sur les résultats obtenus, une conclusion globale et des perspectives pour les futures recherches seront exposées.

# **Chapitre I**

## I. Généralités sur les mortiers

### I.1. Introduction

L'institut américain Concrète (ACI) préfère utiliser le terme « béton léger » plutôt que le terme plus scientifiquement approprié de béton de densité (ACI 213R-03, 2003). Selon la définition donnée par le Comité ACI 213 intitulé « Granulats légers et béton léger », le « Béton léger » est un béton produit à partir de matériaux grossiers légers. Les granulats et granulats fins ont un poids normal, peut-être avec des granulats légers et des granulats fins. « Tous les bétons légers » sont des bétons conçus à partir de matériaux fins et de granulats grossiers. Nous utiliserons cette terminologie ACI tout au long de ce chapitre [1].

### I.2. Définition du béton léger

Les bétons légers sont caractérisés par leur masse volumique apparente sèche ne dépassant pas  $1800 \text{ Kg/m}^3$ . Le béton léger est un type de béton qui présente des caractéristiques particulières, ce qui le distingue du béton classique en raison de sa faible masse volumique. En effet, la masse d'un béton de densité normale varie de  $2200$  à  $2600 \text{ kg/m}^3$ , tandis que celle du béton léger varie entre  $300$  et  $1850 \text{ kg/m}^3$  [2].

### I.3. Constituants du béton

L'eau, le ciment, les granulats et éventuellement les adjuvants forment le béton.

#### I.3.1. Le ciment

Le ciment est constitué d'un mélange de silicates et d'aluminates de calcium qui est moulu après avoir refroidi le clinker à une température de fusion de  $(1450-1550) \text{ }^\circ\text{C}$ . Le ciment classique est également connu sous le nom de liant hydraulique en raison de sa capacité à hydrater et à se durcir en présence d'eau. Cette hydratation transforme la pâte liante, qui avait une consistance à l'origine plus ou moins fluide, en un solide presque insoluble dans l'eau. Ce phénomène de durcissement est causé par l'hydratation de certains minéraux, tels que les silicates et les aluminates de calcium.

Il existe cinq types principaux de ciment selon leur composition, conformément aux normes NF P15-301 et ENV197-1. Dans leur notation européenne, ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains (la notation française est mentionnée entre parenthèse) :

- **CEM I** : Ciment Portland (**CPA** dans la notation française),
- **CEM II** : Ciment Portland composé (**CPJ**)
- **CEM III** : Ciment de haut fourneau (**CHF**)
- **CEM IV** : Ciment pouzzolanique (**CPZ**)

- **CEM V** : Ciment au laitier et aux cendres (CLC)

On classe les ciments en fonction de leur résistance mécanique à 28 jours (exprimée en  $N/mm^2$ ). Il y a trois catégories : 32.5 MPa, 42.5 MPa et 52.5 MPa [3].

### **I.3.2. Les granulats**

Il est donc incorrect d'utiliser le mot "agrégats" pour désigner les granulats, car un agrégat est un mélange de différentes substances ou éléments qui s'adhèrent solidement entre eux (comme le mortier ou le béton par exemple).

Au singulier, le mot granulats fait référence à un ensemble de grains d'un même type, peu importe le critère de classification utilisé. Au pluriel, le terme granulats sera employé pour désigner un mélange de grains de différents types. Il est essentiel que les granulats utilisés dans les travaux de génie civil répondent à des exigences de qualité et à des caractéristiques spécifiques à chaque application. Le squelette du béton est composé de granulats qui représentent généralement environ 80% du poids total du béton.

Les granulats jouent un rôle crucial dans la production de bétons, tant sur le plan économique que technique, car ils permettent de réduire la quantité de liant plus coûteuse. De plus, ils augmentent la stabilité dimensionnelle (retrait, fluage) et sont plus résistants que la pâte de ciment [3].

### **I.3.3. Le sable**

L'un des granulats utilisés dans le béton est le sable, qui est généralement extrait de la mer ou des dunes. Afin d'être utilisé de manière optimale dans le béton, il est nécessaire que le sable respecte certaines caractéristiques afin d'assurer une meilleure adhérence entre lui et les autres éléments.

Les quantités sont alors exprimées en kilogrammes et parfois même en volume de sable [3].

### **I.3.4. Les graviers**

Les graviers jouent un rôle crucial dans les mortiers, fournissant ainsi une structure et une résistance à la construction. En général, les mortiers, constitués de ciment, de sable et d'eau, sont enrichies de graviers afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques. Les graviers sont plus solides, plus résistants et plus résistants à l'usure et à la compression. Ils offrent aussi la possibilité de réguler la densité du mortier, ce qui offre des bénéfices supplémentaires en termes de légèreté ou de poids, en fonction du choix des granulats utilisés. La présence de graviers dans le mortier permet de produire des mélanges adaptés à des utilisations particulières comme les revêtements de sol, les maçonneries et les constructions en béton armé, où la résistance et la résistance sont des critères essentiels [3].

### I.3.5. L'eau de gâche

On la retrouve dans toutes les caractéristiques du béton. L'eau joue deux rôles : physique, c'est-à-dire qu'elle permet le déplacement et le moulage du béton, et chimique, car elle sert de liant pour le ciment et de mouiller les granulats. Il est essentiel que l'eau soit potable et ne renferme aucune impureté. De plus, même si cela doit être évité, l'eau de mer peut être utilisée, mais dans le cas d'un béton non armé afin d'éviter les agressions des armatures par le sel. Il est important de réduire le dosage de l'eau afin d'éviter tout impact sur la résistance du béton ou sa durabilité. Elle varie en fonction de la quantité de ciment, des granulats ou de la consistance désirée.

### I.3.6. Les adjuvants

Les Adjuvants pour le béton, le mortier et le coulis sont répartis en trois catégories principales.

#### I.3.6.1. Adjuvants modifiant l'ouvrabilité et la rhéologie du béton

**Plastifiants (Réducteurs d'eau) :** La principale fonction de ces adjuvants est de favoriser une augmentation des résistances mécaniques grâce à une diminution de la teneur en eau du béton. Ils contribuent également à accroître la résistance du béton à une teneur en eau constante, ce qui facilite sa mise en place.

**Super plastifiants (Haut réducteurs d'eau) :** Leur rôle principal consiste à augmenter considérablement l'ouvrabilité du mélange tout en préservant les performances mécaniques. Ils offrent également la possibilité de diminuer considérablement la teneur en eau de gâchage, ce qui entraîne une réduction significative du rapport E/C. Les bétons acquièrent des résistances mécaniques élevées à court et à très long terme grâce à eux.

#### I.3.6.2. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement

- **Accélérateur de prise :** Adjuvants qui réduisent la durée nécessaire pour que le mélange passe de l'état plastique à l'état rigide.
- **Accélérateur de durcissement :** Les adjuvants permettent d'accélérer la progression des résistances initiales du béton, que ce soit en modifiant le temps de prise ou non.
- **Retardateur de prise :** Adjuvants qui prolongent la durée de transition du mélange depuis le début de sa transition de l'état plastique à l'état rigide. Ceux-ci contrôlent la libération de chaleur causée par l'hydratation du ciment. Le fait d'avoir un retard de prise permet de transporter le béton sur de longues distances et de reprendre le bétonnage. Le bétonnage en grande quantité est favorisé par la réduction de la chaleur d'hydratation.

### I.3.6.3. Adjuvants modifiant des propriétés particulières

- **Entraîneur d'air** : Les adjuvants permettent d'incorporer pendant le processus de malaxage une quantité régulière de fines bulles d'air, réparties de manière homogène et qui restent après le durcissement.
- **Hydrofuges de masse** : Des adjuvants qui empêchent l'eau de pénétrer dans les pores et les capillaires du béton sans compromettre ses caractéristiques plastiques et esthétiques.
- **Rétenteur d'eau** : Un adjuvant pour les matériaux cimentaires comme les coulis, les mortiers de ciment et les bétons de ciment est un rétenteur d'eau. On l'emploie afin de diminuer le risque de ressuage de ces matériaux. Cela renforce ainsi leur stabilité [4].

### I.3.7. Les Agents Moussants

En quelque sorte, les agents moussants sont des supers-agents entraîneurs d'air qui ont pour fonction de remplacer les bulles d'air dans une partie de la pâte et des granulats. Ainsi, ce remplacement entraîne une réduction de la masse volumique. Il existe deux types d'agents moussants : les CLSM (Materials à faible tension) et les LD-CLSM (Materials à faible densité et à faible tension). Les CLSM, qui peuvent absorber jusqu'à 30 % d'air, produisent des bétons ayant une masse volumique supérieure à 800 kg/m<sup>3</sup>, tandis que les LD-CLSM peuvent absorber jusqu'à 70 % d'air pour des bétons ayant une masse volumique inférieure à 800 kg/m<sup>3</sup>. En règle générale, les moussants sont constitués de protéines hydrolysées ou de résine de savon. Ils sont employés dans le béton léger. On obtient une distribution homogène des bulles lors du malaxage à haute vitesse (N).

Deux méthodes d'incorporation existent : la première, pour les CLSM, implique l'ajout du produit sous forme de poudre ou de liquide dans le malaxeur, tandis que la seconde, généralement utilisée pour les LDCLSM, implique l'utilisation d'un fusil à mousse qui fait mousser le produit avant de l'introduire dans le malaxeur [5].

### I.3.8. Renforcement du béton léger par les fibres

Les fibres de polypropylène permettent de prévenir l'effritement du béton exposé au feu. Selon l'une des théories les plus courantes, en fondant à une température relativement basse de 170°C, les fibres de polypropylène créent des canaux qui permettent à la pression de vapeur de s'échapper du béton, empêchant ainsi les petites explosions qui entraînent l'éclatement ou l'effritement du béton. Les fibres de polypropylène augmentent considérablement la robustesse du béton, mais elles ont peu d'impact sur sa résistance à la traction.

Elles améliorent considérablement les caractéristiques du béton, telles que la prévention de l'apparition de fissures, la réduction de la porosité et de la perméabilité, l'augmentation de la ductilité, l'amélioration de la résistance à l'impact, un décoffrage plus rapide grâce à une cohésion améliorée, et une augmentation de la résistance à l'impact. [6].



**Figure I.1.** Fibres de polypropylène. [6].

## **I.4. Les mortiers**

### **I.4.1. Introduction**

Le mortier est un matériau hybride, composé d'une matière inerte (sable) et d'une matière active (liant), le tout mélangé avec une certaine quantité d'eau. Le mortier est en mesure de répondre à différentes exigences dans le domaine de la construction. Cependant, il n'y a pas de mortier universel, adapté à toutes les circonstances. Le choix du mélange idéal pour un projet spécifique ne sera possible que si le concepteur possède une bonne compréhension des matériaux qui composent le mortier et de leurs caractéristiques [7].

### **I.4.2. Définition du mortier**

Le mortier est l'un des matériaux utilisés dans la construction pour renforcer les éléments entre eux, garantir la stabilité de l'ouvrage et combler les espaces entre les blocs. Le mortier est généralement composé d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions spécifiques, qui varient en fonction des réalisations et des adjuvants utilisés [8].



**Figure I.2.** Le mortier [8].

### I.4.3. Composants du mortier

Les mortiers sont principalement constitués de sable, de liant et d'eau. Le ciment Portland est le liant le plus utilisé depuis le début du 20e siècle, mais certaines nouvelles constructions utilisent encore l'ancien mortier de chaux liante. [8]

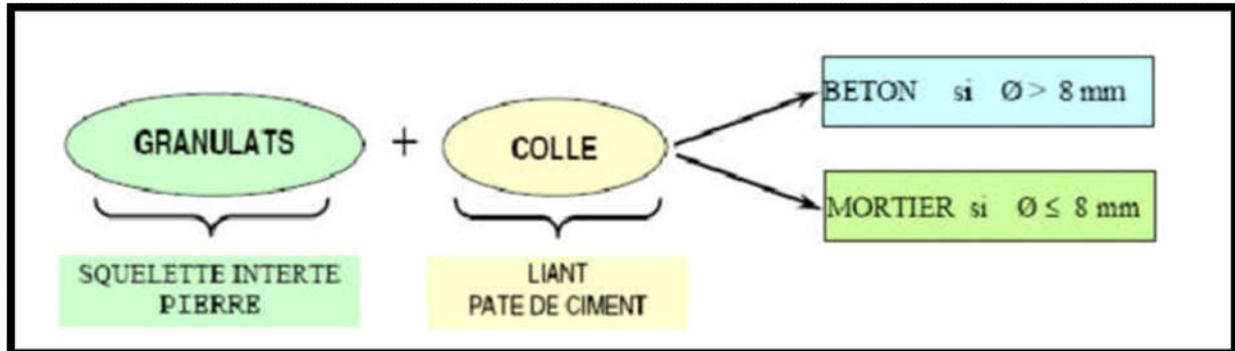


Figure I.3. Constituants de mortier et du béton [8]

#### I.4.3.1. Le sable

Le sable se compose de particules (quartz, micas, feldspaths) provenant de la dégradation de roches. Les grains de sable ont une taille variant de 0,063 mm à 2 mm [9].

#### I.4.3.2. Le liant

Peu importe, le liant utilisé doit être de qualité supérieure. Il joue un rôle crucial dans la fabrication d'un mortier. Il est possible qu'il s'agisse de ciment portland, de ciment de maçonnerie ou de chaux [8].

##### ❖ Le ciment de maçonnerie

Le ciment de maçonnerie est un matériau utilisé pour la construction qui comprend du ciment portland, un filler minéral inerte (calcaire), ainsi que des additifs tels que des agents mouillants, des agents hydrofuges et des entraîneurs d'air.

##### ❖ La chaux

Le mortier traditionnel est constitué de chaux, qui présente une grande plasticité et un excellent pouvoir de rétention d'eau. Cependant, sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La carbonatation des mortiers de chaux est lentement réalisée grâce au gaz carbonique de l'air, ce processus peut être considérablement ralenti par les conditions météorologiques froides et humides [8].

#### I.4.3.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est également cruciale car elle joue un double rôle : elle hydrate le ciment et, ce qui est plus crucial, elle favorise son ouvrabilité.

Il est recommandé que les mortiers contiennent la quantité d'eau maximale afin d'assurer une ouvrabilité optimale.

Il est important que l'eau soit propre et ne renferme aucun produit nocif comme des acides, des alcalis ou des matières organiques. Quand elle est consommable, elle peut être utilisée [8].

#### **I.4.3.4. Les adjuvants**

Les adjuvants sont utilisés dans les mortiers de maçonnerie et leur utilisation est certainement bénéfique dans certaines situations. Toutefois, leur utilisation n'est généralement pas conseillée. Les mortiers de ciment et de chaux sont dotés de la plasticité et du pouvoir de rétention d'eau que la chaux leur confère. Certains ciments utilisés dans la construction de maçonnerie sont composés de ciment portland et de chaux hydratée, en plus d'adjuvants [8].

#### **I.4.4. Les type des mortiers**

##### **I.4.4.1. Les mortiers de ciment**

Ils ont une grande résistance, prennent rapidement et se durcissent. En général, on utilise un rapport de 1/3 entre le ciment et le sable, tandis que le rapport de l'eau sur le ciment est d'environ 1/2. En outre, une injection de ciment les rend presque imperméables. D'autre part, il est plus susceptible d'être retiré [10].

##### **I.4.4.2. Les mortiers de chaux**

Les mortiers de chaux sont de couleur épaisse et onctueuse. Les mortiers de ciment se durcissent plus lentement que ceux-ci. Les mortiers en chaux ont une résistance inférieure à celle des mortiers en ciment [10].

##### **I.4.4.3. Mortiers bâtards**

Les mortiers sont composés d'un mélange de ciment et de chaux dans des proportions égales, en fonction de leur utilisation éventuelle. Les compositions de chaux et de ciment peuvent varier en fonction de leur domaine d'utilisation [10].

##### **I.4.4.4. Le Mortier réfractaire**

Il est réalisé à partir de ciment fondu, qui est résistant aux hautes températures. On l'emploie pour faire des cheminées et des barbecues [10].

##### **I.4.4.5. Mortier rapide**

Il est conçu à partir de ciment rapide, ce qui lui confère une rapidité et une résistance aux scellements. [10]

##### **I.4.4.6. Mortier industriel**

Il s'agit de mortiers fabriqués à partir de composants secs, soigneusement choisis, emballés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement uniformes [10].

Afin d'utiliser ce genre de mortier, il vous suffit de verser la quantité d'eau requise et de les mélanger avant de les utiliser.

Les producteurs de mortiers industriels offrent une sélection exhaustive de produits qui répondent à tous les exigences

-Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.

- Mortiers d'imperméabilisation

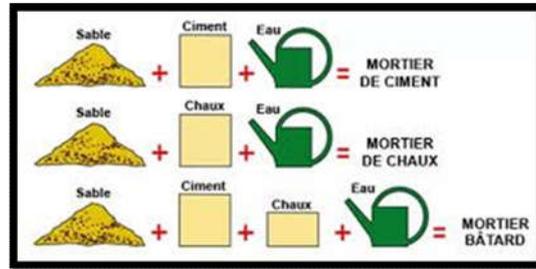


Figure I.4. Type de mortier [10]

### I.4.5. Classifications des mortiers

#### I.4.5.1. Classification selon leur domaine d'utilisation

En général, les mortiers diffèrent en fonction de leur domaine d'application, ce qui est extrêmement vaste et permet de distinguer les catégories suivantes [11].

- ✓ Mortier de pose.
- ✓ Mortier de joints.
- ✓ Mortier pour les crépis.
- ✓ Mortier pour le sol.
- ✓ Mortier pour les stucs.
- ✓ Pierres artificielles.
- ✓ Support pour les peintures murales.
- ✓ Mortier d'injection.
- ✓ Mortier de réparation pour pierres.

#### I.4.5.2. Classification selon la nature du liant

On peut classer les mortiers en fonction de la nature du liant de la manière suivante :

- ✓ Mortier de ciment portland.
- ✓ Mortier de chaux.
- ✓ Mortiers bâtards.
- ✓ Mortier à base de ciment de maçonnerie [11].

### I.4.6. Le rôle d'utilisation de mortier

Les diverses fonctions de la pâte plastique réalisée sont cruciales [12] :

- Garantir la liaison et la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, ce qui garantit la solidité de l'ouvrage et le rend monolithique.
- Garantir la protection des bâtiments contre l'humidité causée par les intempéries ou le remontage du sol.
- En utilisant des enduits aériens.
- En tant qu'écrans imperméables.
- Élaborer des chapes d'usure, dont l'un est destiné aux dalles en béton.
- Devenir l'élément essentiel dans la production de blocs manufacturés, de carreaux, de tuyaux et de différents éléments moulés.
- Faire partie intégrante du béton.
- Améliore la solidité de certains sols de fondations en les injectant.

#### **I.4.7. Fonctions d'un mortier**

Un mortier a pour principale fonction de relier les éléments de maçonnerie de façon à ce qu'ils forment un seul bloc. De plus, le mortier divise les composants et comble toutes les fissures et les fentes en créant une surface de contact homogène. Le rejointoiement a pour objectif de consolider les caractéristiques structurales des éléments tout en prévenant la pénétration de la pluie. Cela nécessite une adhésion totale. En cas de réalisation, le mur sera assez résistant pour faire face aux éléments. Les mortiers jouent un rôle essentiel dans toute construction. Il peut s'avérer bénéfique pour la majorité des projets de construction et de restauration en maçonnerie. [7]

- Lier des briques ou des pierres entre elles,
- Effectuer l'enduit d'un mur,
- Sceller des éléments,

#### **I.4.8. Emplois des mortiers**

##### **I.4.8.1. Les joints de maçonnerie**

Les éléments maçonnés utilisés dans la construction (blocs de béton, pierre de taille, briques) doivent être assemblés avec un mortier qui doit avoir des caractéristiques mécaniques adéquates pour garantir la transmission des vibrations et une compaction adéquate pour garantir l'étanchéité. En règle générale, il est recommandé d'utiliser des mortiers qui ne présentent pas un module d'élasticité excessif afin de pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'ils relient sans fissurer. Les mortiers de joints sont donc un élément essentiel de la maçonnerie, qui nécessite une étude minutieuse et une mise en œuvre efficace pour assurer leur fonction, notamment dans le cas de la maçonnerie apparente.

La norme XP P 10-202-1 (DTU 20) « Maçonnerie, béton armé, plâtre » donne des recommandations concernant les quantités recommandées pour les mortiers de jointoiment, ainsi que les instructions pour leur application [13].



**Figure I.5.** Les joints de maçonnerie [13]

#### **I.4.8.2. Les enduits**

Ce secteur d'activité est l'un des plus importants pour les mortiers. En plus des enduits classiques en trois couches mentionnées dans la norme NF P 15-201-1 et 2 (DTU 26.1), il existe actuellement des enduits monocouches épais et des enduits isolants plus récents [13].



**Figure I.6.** Enduit traditionnel [13]

#### **I.4.8.3. Les chapes**

Les chapes ont pour rôle de garantir l'amélioration du dallage et l'uniformité de sa surface. Les chapes peuvent représenter la touche finale. Elles peuvent également servir de base à un revêtement de sol. Il est nécessaire que les chapes soient assez résistantes pour garantir la transmission des charges vers le support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). La chape peut également jouer un rôle thermique ou acoustique, qu'elle soit attachée ou flottante. Les travaux de construction sont définis dans la norme P 14-201 (DTU 26.2). Chapes et dalles fabriquées à partir de liants hydrauliques [13].



**Figure I.7.** Les chapes traditionnelles [13]

#### **I.4.8.4. Les scellements et les calages**

Les différentes difficultés liées au scellement et au calage ont incité les fabricants de mortiers industriels à développer des produits spécifiques adaptés aux travaux à effectuer : Les éléments de couverture, les éléments de second œuvre de mobilier urbain, les regards de visite et l'assemblage d'éléments préfabriqués sont mis en scellement [13].



**Figure I.8.** Scellement, calage de platine [13]

#### **I.4.9. Méthodes de préparation des mortiers**

##### **I.4.9.1. Préparation manuelle**

En premier lieu, il est nécessaire de mélanger le sable à sec et de le lier de manière parfaite, puis de créer une cuvette au milieu du mélange pour recevoir l'eau de gâchage. On humecte progressivement la masse, puis on la mélange à l'aide d'un robot à mortier. Toutefois, il convient de noter [14].



**Figure I.9.** Préparations manuelles de mortier [14]

- Il est important de procéder avec soin au mélange à sec afin de garantir une répartition homogène du liant dans toute la masse du sable.

- Il est recommandé de verser de l'eau à plusieurs reprises, d'abord pour faciliter le mélange et améliorer sa qualité, puis parce qu'il est facile d'ajouter un peu d'eau alors qu'on ne peut pas en retirer.

#### I.4.9.2. Préparation mécanique

Les mortiers sont fabriqués à l'aide de machines connues sous le nom de bétonnières. Dans certains modèles, il est nécessaire de mélanger à sec, en partie avant de le placer dans le tambour mélangeur où il est suffisamment mouillé. Certains s'en mêlent eux-mêmes : on introduit soit directement dans le tombeur, soit dans une benne, tous les éléments du mortier. Ce n'est qu'une opération de quelques minutes, beaucoup plus rapide et moins difficile qu'à la main. [14]



Figure I.10. Malaxeur [14]

#### I.4.10. Caractéristiques des mortiers

##### I.4.10.1. A l'état frais

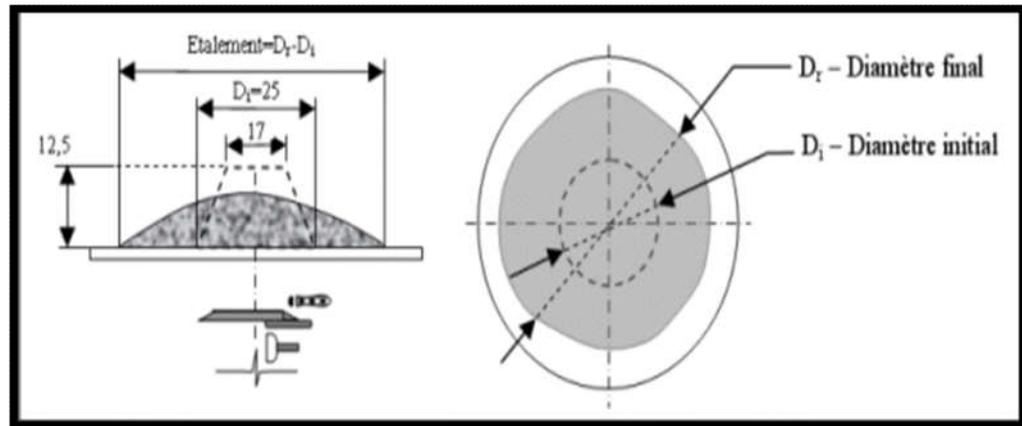
###### ➤ Consistance (ouvrabilité)

Les différents appareils les plus répandus pour mesurer la consistance ou l'ouvrabilité d'un mortier sont :

- La table à secousses : Après l'installation et la démolition d'un moule tronconique, le mortier subit 15 chocs en 15 secondes. Le diamètre de la galette obtenue est mesuré. La formule suivante donne l'étendue (l'étalement) en % [15].

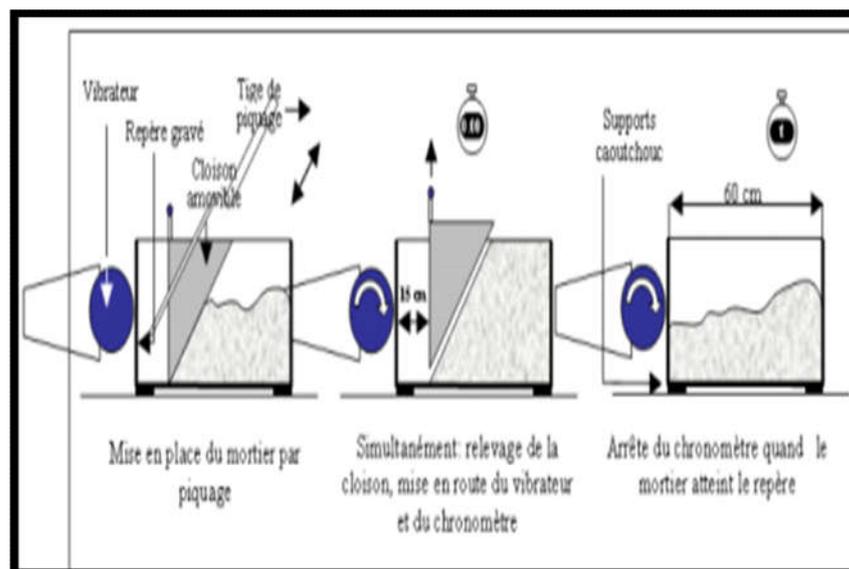
$$E \% = \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec :  $D_r$  = diamètre final et  $D_i$  = diamètre initial



**Figure I.11.** Essai d'étalement sur table à secousse.

- Maniabilimètre (LCPC) : Dans ces expériences, elle utilise le mortier pour s'écouler en raison d'une vibration. L'instrument utilisé est connu sous le nom de Maniabilimètre LCPC et est illustré sur la figure ci-dessous. Il se compose d'un boîtier métallique parallélépipédique (supports en caoutchouc), équipé d'un vibreur et équipé d'une cloison amovible [15].



**Figure I.12.** Principe de fonctionnement du Maniabilimètre.

- Essai de prise : On évalue généralement le temps de prise sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et en respectant la norme en question (avec l'appareil de Vicat). Le temps de prise d'un mortier peut être augmenté (hors norme) en utilisant le même dispositif, mais en ajoutant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. L'aiguille qui pénètre dans le mortier pèse 1000 grammes. L'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) lors du début de prise, tandis que l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur lors de la fin de prise [15].

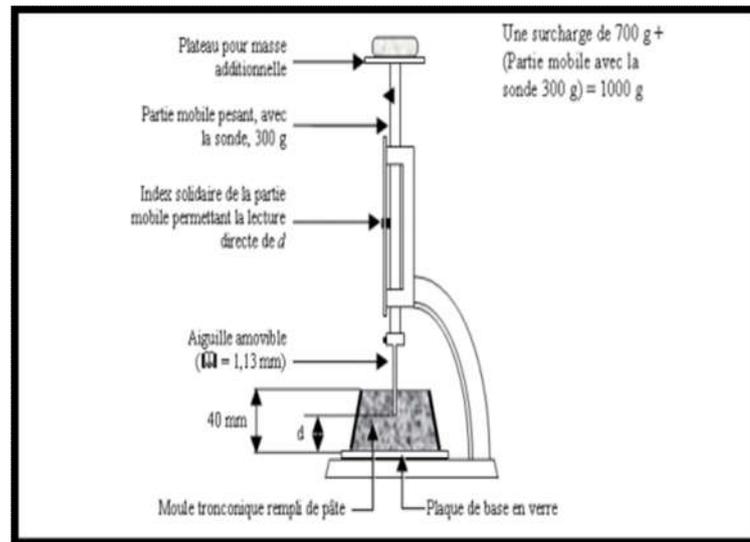


Figure I.13. Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

#### I.4.10.2. A l'état durci

- Masse volumique apparente : Il s'agit de la masse d'un corps par unité de volume visible en état naturel (incluant les vides et les capillaires notamment). On peut la mesurer en ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$  ou  $\text{t/m}^3$ ) [16].
- Masse volumique absolue : La masse d'un corps est calculée en fonction du volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans prendre en compte les vides et les pores). On peut la mesurer en ( $\text{g/cm}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$  ou  $\text{t/m}^3$ ) [16].
- Résistance mécanique : Les propriétés du mortier sont évaluées à l'aide d'échantillons préparés à partir de moules normalisées de diverses dimensions et matériaux (plastique ou métal). Des tests directs sont effectués pour évaluer la résistance à la compression du mortier, conformément à la norme NF EN 196-1. La résistance est mesurée sur cylindres et mesurée sur demi-prismes lors de l'essai de flexion cube, et elle est exprimée en MPA ou en  $\text{N/mm}^2$  [16].

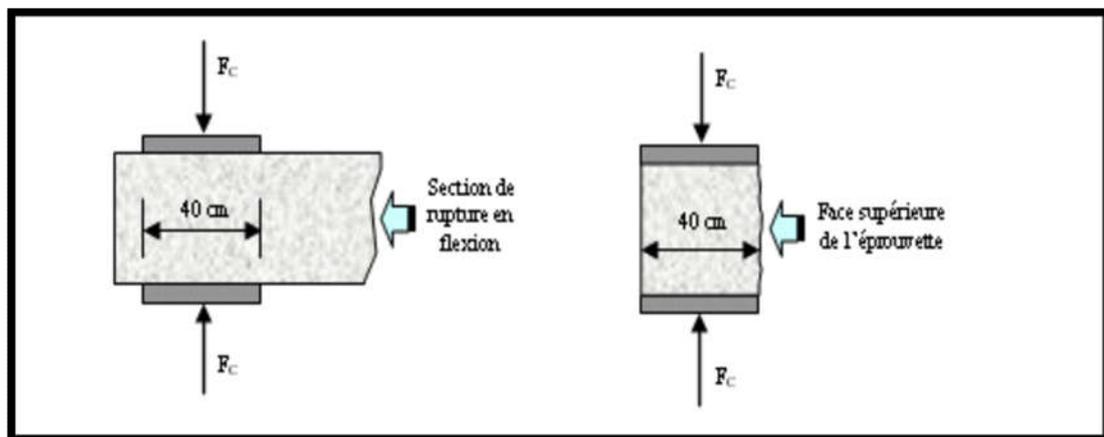
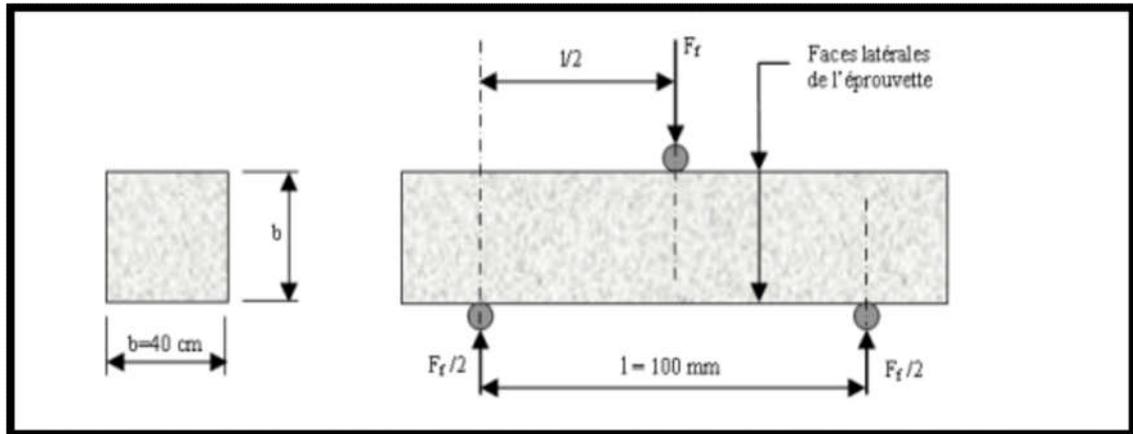


Figure I.14. Dispositif de rupture en compression [16]

L'importance de la résistance à la flexion réside également dans sa capacité à résister à la fissuration d'un mortier. Il est essentiel que les mortiers soient toujours moins résistants que les éléments de maçonnerie afin d'éviter les fissures dans les joints, où elles peuvent être facilement réparées.



**Figure I.15.** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion [16]

- Le retrait : Les matériaux cimentaires connaissent une diminution de leurs dimensions ou leur retrait, même en l'absence de chargement. Il y a une composante externe qui résulte de gradients hydriques ou thermiques entre le matériau et son environnement, et une composante interne qui est produite par le matériau lui-même sans interaction avec l'extérieur [17].
- Le gonflement : Après leur installation, la pâte de ciment ou de mortier se développe constamment dans l'eau, augmentant ainsi en volume et en masse. Les molécules d'eau absorbent de l'eau dans le gel de ciment, ce qui entraîne une pression de gonflement. Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel. En outre, la pénétration de l'eau diminue la tension de surface du gel, ce qui entraîne ensuite une légère expansion [17].

## I.5. L'isolation thermique

### I.5.1. Introduction

Dans un édifice, les pertes de chaleur sont causées par différentes parties opaques (mur, toit et plancher) qui peuvent être constituées de béton. Il est donc pertinent de considérer des types de béton de structure qui présentent des caractéristiques d'isolation thermique améliorées. Pour améliorer la capacité d'isolation des éléments en béton, l'emploi de granulats légers, qui présentent de bonnes propriétés thermiques grâce à leur structure poreuse, peut constituer une solution. Grâce à cette méthode d'isolation répartie, il est possible de prévenir l'utilisation de dispositifs constructifs lourds tout en respectant les normes de la RT 2012.

L'objectif de cette étude est d'améliorer la relation entre les performances mécaniques et la capacité isolante des bétons de granulats légers. C'est une approche expérimentale et numérique qui l'accompagne. La masse volumique des bétons de granulats légers ciblés est inférieure à  $1500 \text{ kg/m}^3$  et la résistance en compression est supérieure à 25 MPa.

On étudie l'impact de la nature des granulats légers, de la quantité de sable alluvionnaire substituée par du sable léger, du rapport E/C et de l'ajout de fumée de silice sur les performances mécaniques et thermiques des bétons, dans le but de proposer des formulations appropriées pour une variété d'applications structurelles [18].

Il est conseillé d'utiliser des matériaux qui ont des caractéristiques d'isolation thermique dans le bâtiment afin de diminuer la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation tout au long de l'année, afin d'atteindre des conditions de confort et de protection de l'environnement. Cela se fait en utilisant des matériaux qui résistent au transfert thermique, qui est inversement proportionnel à leur densité, ce qui signifie que plus leur densité n'est faible, plus leur résistance à la chaleur n'est élevée.

Les particules légères Ce procédé est le plus fréquemment utilisé pour fabriquer du béton (mortier) léger et isolant. Les granulats courants (gravillons et sable) sont remplacés par des granulats légers. Plusieurs granulats spécialisés peuvent être employés pour fabriquer des bétons ou des mortiers légers. La sélection du granulat varie en fonction de la densité désirée [19].

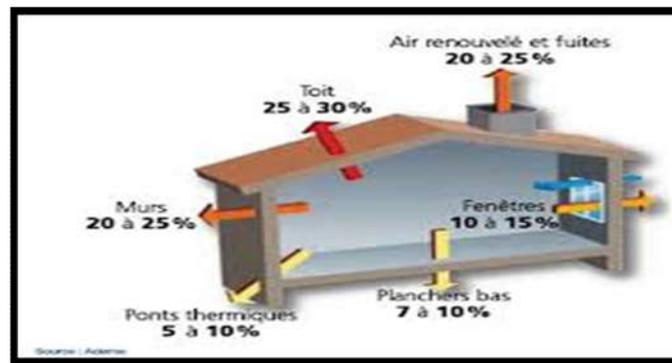


Figure I.16. Répartition des déperditions thermiques [19].

### I.5.2. Avantages de l'isolation thermique

- ✓ L'isolation diminue les pertes à travers les parois
- ✓ Réduit les besoins en chauffage
- ✓ Pendant l'été, l'isolation assure une protection contre la chaleur et le rayonnement solaire extérieur, tandis qu'une isolation efficace élimine "l'effet de paroi froide" en hiver

- ✓ À température constante, un édifice isolé procure un confort accru
- ✓ L'isolation thermique joue un rôle dans l'amélioration de l'isolation sonore. [20].

### **I.5.3. Inconvénients de l'isolation thermique**

- ✓ Améliore le taux d'occupation du sol sur le sol.
- ✓ Change l'apparence de la demeure (façades, toit et fenêtres) [20].

### **I.5.4. Les type d'isolations**

Les isolants thermiques sont des matériaux ou des combinaisons de matériaux qui empêchent les échanges d'énergie entre deux systèmes.

#### **I.5.4.1. Les isolants traditionnels**

Ces matériaux isolants ont une longue histoire d'utilisation, on peut identifier :

- Les matériaux isolants minéraux (les laines minérales) sont constitués de matériaux recyclés et sont fabriqués en collage de fibres minérales. On peut trouver ces produits sous la forme de matelassés et de panneaux.
- Le polystyrène (expansé ou extrudé) et le polyuréthane sont des isolants synthétiques. Ces matériaux présentent des inconvénients, car ils renferment des éléments susceptibles de dégrader la couche d'ozone et d'échapper à des gaz toxiques en cas de combustion. Ils sont représentés par des panneaux.
- Les isolants végétaux et animaux : cette catégorie d'isolation est souvent fabriquée à partir de sources renouvelables et nécessite une production énergétique importante. Différents isolants végétaux sont disponibles (chanvre, lin, coton, paille ou laine de bois ou liège expansé). Ou des matériaux naturels (laine de mouton, plumes de canard) qui sont plus ou moins employés pour isoler le bâtiment [21].

#### **I.5.4.2. Les nouveaux isolants**

Il s'agit d'isollements avec des propriétés thermiques exceptionnelles, très compétitifs par rapport à l'air immobile, car l'air immobile peut être un isolant idéal si ce n'est un fluide qui peut circuler dans la lame d'air. Les panneaux isolants sous vide, appelés PIV, et l'aérogel de silice sont utilisés [21].

#### **I.5.5. Le polystyrène expansé**

Il existe une variété de systèmes d'isolation disponibles sur le marché, mais l'isolation en polystyrène expansé est la plus facile à installer malgré son efficacité. Effectivement, elle présente un coefficient d'isolation thermique élevé, variant de 0,030 à 0,038 W/m.K. Peu importe sa teinte (gris ou blanc), elle offre un rapport qualité/prix exceptionnel.

Un isolant polystyrène expansé, avec des performances thermiques similaires, a un coût de 30 % inférieur aux autres systèmes d'isolation. Cette étude concerne les caractéristiques d'un béton léger fabriqué à partir de polystyrène expansé [22].

#### I.5.5.1. Définition du polystyrène

Les billes de polystyrène sont utilisées pour désigner tous les déchets d'emballage. Il est possible de les récupérer et de les valoriser dans le secteur de la construction.

Ceux-ci représentent une menace pour l'environnement et font l'objet de nombreuses études. Les recherches menées portent principalement sur l'amélioration des caractéristiques des composites à matrices cimentaires en ajoutant des billes de polystyrène expansé traité ou non sous forme de renforts. [23].

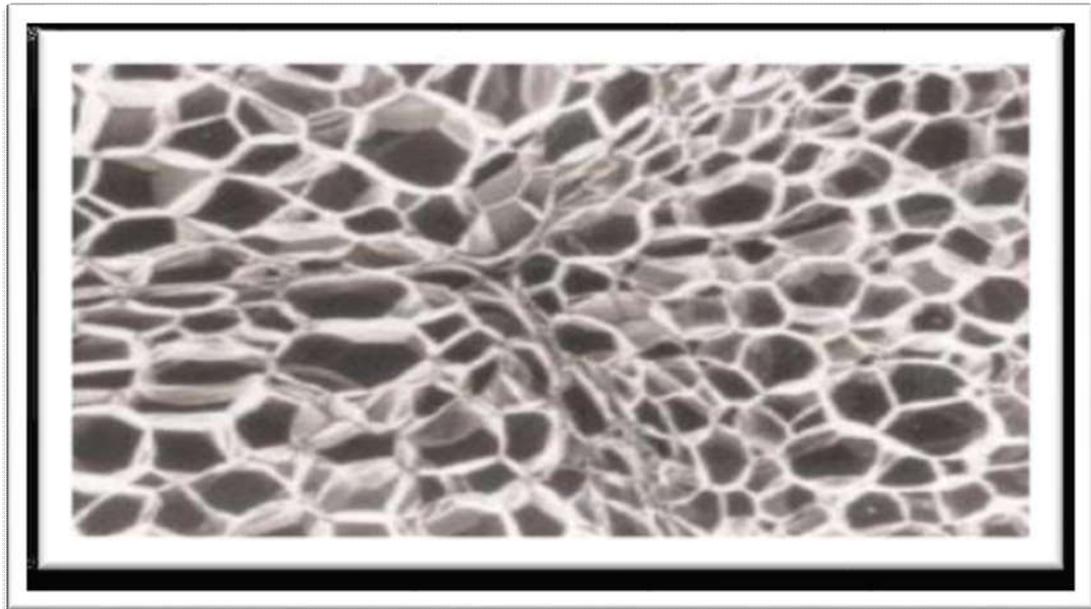


Figure I.17. Polystyrène [22]

#### I.5.5.2. Composition chimique du Polystyrène

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire possédant un squelette aliphatique, qui est obtenu par polymérisation du motif homopolymère. De manière structurale, il s'agit d'un matériau essentiel utilisé pour fabriquer du polystyrène expansé. Il se présente sous la forme de petites perles blanches, qui sont chimiquement très stables et possèdent des propriétés thermoplastiques. En fonction des utilisations, trois types distincts sont identifiés en fonction de leur granulométrie et de leurs propriétés.

- Les perles sphériques utilisées dans les fabrications courantes sont transformées en un "porogène" (ou agent gonflant) : le pentane.
- Certains produits sont conçus pour être fabriqués avec des matériaux « difficilement inflammables » ou auto-extinguibles, ce qui n'est obtenu qu'après un certain temps de stockage en raison de la présence de pentane.
- Ces produits sont conçus pour produire des produits en expansion qui résistent aux essences et aux huiles minérales sans hydrocarbures aromatiques. Le polystyrène expansé (PES) est constitué de soudures interpelles, avec des cellules généralement de taille comprise entre 60 et 200  $\mu\text{m}$  [22].



**Figure I.18.** La structure de polystyrène expansé [22]

### I.5.5.3. Les types de polystyrène expansé

Les polystyrènes expansés moulés (PSE-M) et les polystyrènes expansés extrudés (PSE-E) sont deux catégories de PSE.

- **Le PSE-M :** Le polystyrène "expansible" est fabriqué à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté un agent d'expansion (pentane, à une température de 35°C pendant la polymérisation). Les perles de PS pré-expansées sont pré-expansées à la vapeur d'eau, puis elles sont stabilisées pendant une période de stabilisation afin de perdre leur excès d'eau. Finalement, dans un moule, ils sont élargis et moulés à la vapeur [24].



**Figure I.19.** Polystyrène expansé moulé (PSE-M) [24]

- **Le PSE-E :** De son côté, il est obtenu par extrusion (mise en forme à la chaleur) en injectant un gaz sous pression dans le polymère cristallin fondu.

En raison de ses propriétés qui lui confèrent 98% d'air, le PSE a été utilisé dans la formulation du béton léger en tant que granulat extra léger (en termes de masse volumique). La masse volumique apparente des billes de polystyrène varie de 10 à 50 kg/m<sup>3</sup> [24].



**Figure I.20.** Polystyrène expansé extrudé (PSE-X) [24].

#### **I.5.5.4. Fabrication de polystyrène expansé**

La production du polystyrène se fait en suivant les étapes ci-dessous :

##### **➤Pré- expansion**

La phase de pré-expansion du produit de base est effectuée. Cette étape est réalisée dans un pré-mousseur équipé d'une entrée de vapeur, d'une entrée d'air et d'un système d'introduction des perles déshydratées. L'opération se déroule en permanence à une vitesse de 250 Kg/h et à une température de 97 °C. La densité du produit obtenu varie de 17 à 18 Kg/m<sup>3</sup>.

##### **➤Stockage intermédiaire**

Ensuite, les perles pré-élargies sont conservées dans des silos afin de subir un processus de "mûrissement", ce qui permet de réguler les pressions entre les cellules où le pyrogène a en grande partie disparu en raison de la température et du milieu extérieur.

##### **➤Seconde expansion**

Elle est réalisée en utilisant la même technique que précédemment, mais dans des dispositifs de volume plus élevé. C'est pendant cette opération que les perles sont créées en fonction du produit que l'on souhaite obtenir [25].

#### **I.5.5.5. Propriétés du polystyrène expansé**

Les principales caractéristiques du polystyrène expansé sont les suivantes :

- ✓ Son faible poids corporel (faible masse volumique)
- ✓ Sa capacité d'isolation thermique
- ✓ Ses propriétés mécaniques remarquables (résistance à la compression, capacité à amortir les chocs)
- ✓ Sa résistance à l'eau
- ✓ Son aisance à ajuster (moulage, découpage)

✓ Sa capacité à être recyclé [26].

#### I.5.5.6. Les avantages et les inconvénients du polystyrène expansé

Le polystyrène expansé, également connu sous le nom de mousse de polystyrène, est un matériau plastique couramment utilisé dans l'emballage, la construction et d'autres applications. Il présente plusieurs avantages et inconvénients :

**Tableau I.1.** Les avantages et les inconvénients du polystyrène expansé [24].

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>-une réflexion thermique efficace</li> <li>-une conductivité thermique limitée.</li> <li>-une excellente capacité de compression</li> <li>-un faible coefficient de dilatation</li> <li>-une excellente résistance au vieillissement</li> <li>-un coût de production abordable et un poids plume.</li> <li>-ils peuvent être recyclés car le polystyrène est un matériau qui peut être facilement converti.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parfois, les panneaux de PSE sont insuffisants et doivent donc être complétés par d'autres matériaux d'isolation.</li> <li>- Les billes expansées qui les composent ont tendance à se détacher lorsque l'eau est en excès,</li> <li>- ce qui ne garantit pas une isolation phonique optimale.</li> </ul>

#### I.6. Conclusion

Ce chapitre est une étude théorique sur les mortiers, En conclusion, les mortiers sont des matériaux de construction polyvalents et indispensables pour de nombreux projets. Leur choix et leur utilisation doivent tenir compte de facteurs tels que la durabilité, la résistance, l'impact environnemental et les spécificités du projet pour assurer une construction de qualité.

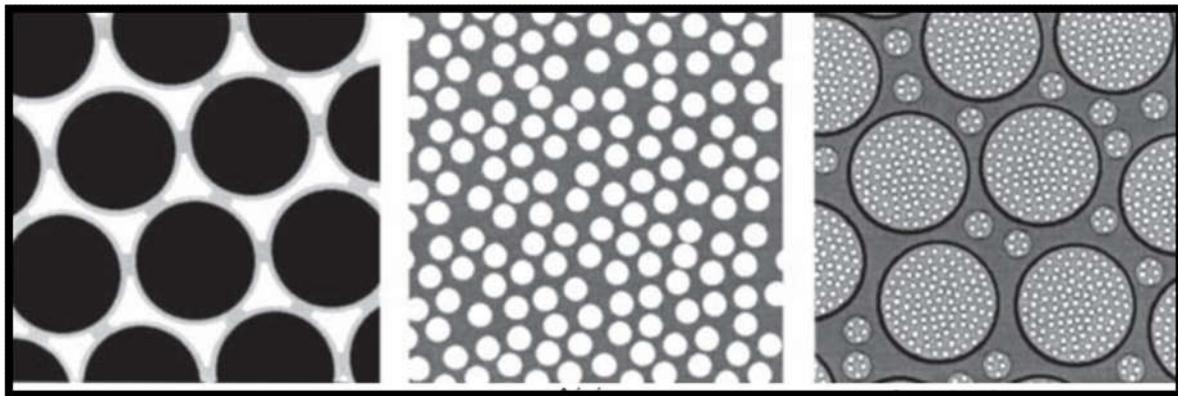
## **Chapitre II**

## II. Les bétons légers

### II.1. Introduction sur les bétons légers

Ces dernières décennies, les bétons légers sont devenus de plus en plus populaires en raison de leurs caractéristiques spécifiques et de leurs bénéfices dans différents secteurs de l'ingénierie civile. Les bétons légers se distinguent des bétons traditionnels par leur faible densité, ce qui les rend particulièrement adaptés à des applications où le poids est un élément essentiel, comme la construction de structures préfabriquées, les revêtements de sols, et même dans des domaines spécialisés comme l'aérospatiale [27].

La composition des bétons légers permet de les classer en différents groupes. En incorporant des bulles d'air dans le mélange, le béton cellulaire se distingue par sa faible densité et son excellent isolement thermique. En substituant une partie des granulats traditionnels par des agrégats légers, comme les granulats expansés ou les agrégats artificiels légers, on obtient du béton avec des granulats légers. Finalement, on obtient le béton caverneux en introduisant des trous ou des vides dans le mélange, ce qui diminue considérablement sa densité tout en maintenant sa résistance mécanique. Ces diverses formes proposent une multitude d'options



pour satisfaire différents besoins en matière de construction et d'ingénierie [28].

Béton caverneux

béton cellulaire

béton à granulats légers

**Figure II.21.** Figure schématique des diverses catégories de béton léger [28].

### II.2. Bétons cellulaires

La pâte contient de l'air. Les bétons cellulaires sont des matériaux composés d'une combinaison de sable siliceux et de liant hydraulique, produisant ainsi de petites bulles d'environ 1 mm de diamètre :

- Par réaction chimique (gaz de béton)
- Par manipulation (action) physique pendant le processus de malaxage (béton mousse)

- Les buts sont d'obtenir une légèreté remarquable, une isolation thermique de qualité supérieure et une résistance au feu élevée. Il est donc essentiel de créer des formulations de béton qui présentent une densité minimale, une efficacité thermique optimale et une résistance aux températures élevées. Ces propriétés jouent un rôle crucial dans différentes applications, telles que la construction de bâtiments respectueux de l'environnement, les structures préfabriquées et les environnements où les risques d'incendie sont sérieux [29].

## II.2.1. Production des bétons légers

### II.2.1.1. Bétons cellulaires

Des bulles de gaz (hydrogène) sont ajoutées à une pâte de ciment ou à un mortier, généralement fabriqué avec du ciment Portland de bonne consistance, par de la poudre d'aluminium (0,2 % en masse de ciment) qui réagit avec le  $\text{Ca(OH)}_2$  et les alcalis comme prévu. Libéré en tant que solution. Le mélange est étendu par les bulles de gaz jusqu'à atteindre la densité requise, puis le béton est durci soit à la vapeur à pression atmosphérique, soit à la vapeur à 180°C sous haute pression dans un autoclave. Il est possible d'inclure du renfort prétraité dans des unités qui sont coupées à la taille nécessaire peu après le durcissement. La résistance, la stabilité volumique et la durabilité du béton cellulaire autoclave sont supérieures à celles du béton cellulaire non autoclave. Il s'agit des normes BS EN 678, 679, 680 et 13518-11.

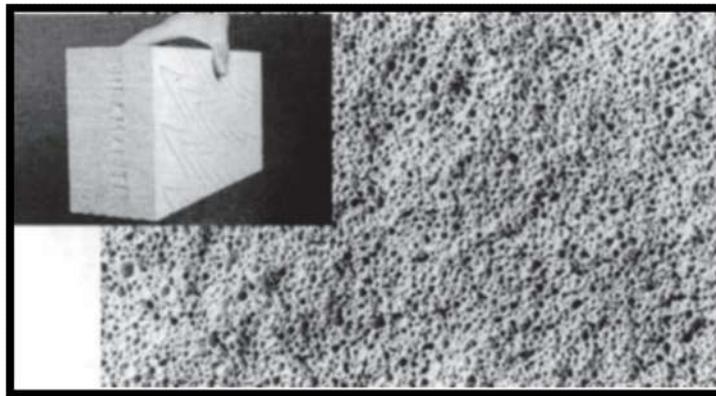


Figure II.22. Typique du béton cellulaire autoclave [28]

### II.2.1.2. Béton mousse

Le béton mousse est considéré comme étant à plus de 25% d'air. Il existe deux méthodes principales pour introduire l'air dans un mélange de mortier ou de béton. Tout d'abord, on peut mélanger une mousse préformée issue d'un générateur de mousse avec d'autres composants dans un malaxeur classique ou un camion à béton prêt à l'emploi.

Ensuite, il est possible de mélanger un adjuvant qui génère de la mousse synthétique ou à base de protéines avec les autres composants du mélange dans un mélangeur à cisaillement élevé.

Il est essentiel que la mousse soit stable lors du mélange, du transport et de la mise en place, dans les deux méthodes. Les bulles qui se forment dans le béton durci doivent être subtiles et leur taille habituelle varie de 0,1 à 1 mm [29].

**Tableau II.2.** Les caractéristiques des bétons en cellule [30].

Densité	Conductivité thermique	Résistance à la compression	
		Pour la masse volumique de 400 kg/m <sup>3</sup> est environ 0.5 à 1 MPA	Pour la masse volumique de 1200kg/m <sup>3</sup> est environ 5 à 6 MPA
Diffère en fonction des compositions. de 0.4 à 1.2 t/m <sup>3</sup>	Leur capacité à conduire la chaleur diffère conductivité thermique varie de 0.16 à 0.4 w/m/c°.		

### II.3. Béton de granulats légers

RILEM/CEB ont reconnu la variété des applications du béton de granulats légers, ce qui a conduit à la classification présentée dans le tableau ci-dessous.

**Tableau II.3.** Typologie des bétons légers [28].

Propriété	Classe et type		
	I Structurel	II Structurel/ Isolant	III Isolant
Résistance à la compression (MPa)	>15,0	>3,5	>0,5
Coefficient de conductivité thermique (W/mK)	/	<0,75	<0,30
Plage de densité approximative (kg/m <sup>3</sup> )	1600 à 2000	<1600	<1450

Le béton léger de granulats est un béton dont la densité sèche à l'air est inférieure à 1810 kg/m<sup>3</sup>. On distingue deux catégories principales de béton léger, à savoir le béton composé de matériaux légers grossiers et fins, et celui composé de matériaux légers granulats grossiers et fins naturels. Il est permis d'interpoler entre ces classes. Peut-être l'approche la plus radicale est celle adoptée par les Japonais 29,30, qui mentionnent le béton léger, mais ne précisent aucune densité et les caractéristiques sont données uniquement pour le béton à base de

granulats légers grossiers et fins. En Russie et dans la CEI, on définit le béton léger en fonction de sa capacité à résister à la compression.

Selon le type de granulat utilisé, un ajout à SNIP 2.03.01-8431 offre une gamme de résistance allant de 2,5 à 40 MPA, avec des densités variant de 800 à 2000 kg/m<sup>3</sup>. Selon la norme européenne pertinente 32 (tableau 3), le béton de granulats légers est classé en fonction de sa densité après avoir été séché au four.

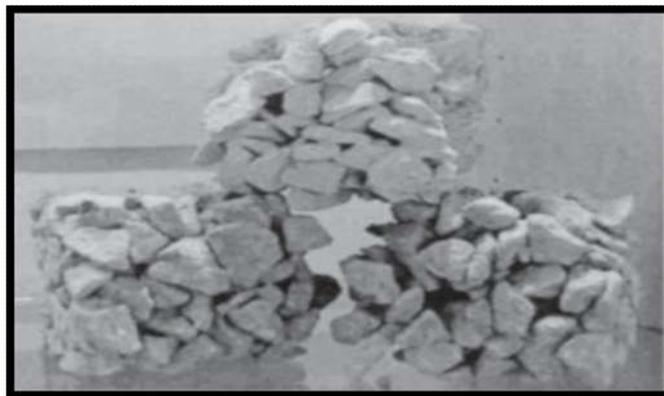
**Tableau II.4.** Classes de densité pour le béton de granulats légers [28]

Classe de densité kg/m <sup>3</sup>	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Densité sécher au four	901 à 1000	1001à1200	1201à1400	1401à1600	1601à1800	1801à 2000

#### II.4. Béton caverneux (béton sans fines)

Les ingrédients du mélange sont le ciment, l'eau et les granulats, sans les fines (sable). Une fois préalablement humidifiés avec de l'eau, les granulats sont combinés avec le ciment et l'eau de gâchage. Cela conduit à la couche (jusqu'à environ 1,3 mm) de pâte de ciment qui recouvre chaque particule de granulats grossiers et la lie aux particules adjacentes en contact point à pinte, laissant ainsi des vides interstitiels. Il s'agit de bétons assez légers (de 1,6 à 1,8 tonnes par mètre carré) avec des graviers courants et de 0,7 à 1 tonnes par mètre carré avec des argiles expansées.

Ils ont une faible résistance mécanique (3 à 7 MPA). [28]



**Figure II.23.** Béton caverneux (béton sans fines) [28]

## II.5. Plusieurs catégories de granulats légers

Les économies sont inévitables lorsque le poids d'un ouvrage est réduit lors de sa construction. Pour réaliser la densité des bétons de granulats légers mentionnée précédemment, il est essentiel d'utiliser des granulats légers.

Les granulats légers peuvent provenir de différentes sources, qu'elles soient naturelles, issues du traitement des déchets ou spécialement conçues pour les bétons légers. [31].

### II.5.1. Granulats légers naturel

#### II.5.1.1. Granulats minéraux

**Ponce** : Il s'agit d'une lave volumique alvéolée de couleur grise qui se forme lors de la fusion d'une roche. Elle se forme sans avoir l'apparence de grains assez arrondis, avec un diamètre maximal de 10 à 20 mm et une densité d'environ 500 à 800 kg/m<sup>3</sup>. [32].



Figure II.24. Pierre de ponce [32].

**Pouzzolane** : Il s'agit d'une pierre naturelle formée par les éruptions volcaniques. C'est plutôt abondant. Le magma volcanique refroidi assez lentement cristallise en silice alumineuse avec une densité sèche de 700 à 900 kg/m<sup>3</sup>. [32].



Figure II.25. Pouzzolane [32].

### II.5.1.2. Granulats Végétaux

- **Copeaux de bois** : On obtient des morceaux de bois de 5 à 25 mm en découpant et en broyant. Ils doivent être déshydratés, traités chimiquement et stabilisés en utilisant une attaque d'acide pour éliminer la cellulose, puis en utilisant du chlorure de calcium. Ensuite, ils sont lavés et séchés, avec une densité sèche de 280 à 400 kg/m<sup>3</sup> [33].



Figure II.26. Copeaux de bois [33].

- **Granulats de liège** : Le liège gonflé est composé de fragments d'écorces qui ont gonflé à une température élevée. Le principal usage du liège expansé en vrac est de créer une chape légère et isolante. Il permet également de fabriquer des bétons légers qui seront à la fois performants sur le plan thermique et sonore [33].



Figure II.27. Granulats de liège [33]

### II.5.2. Granulats obtenus par traitements des déchets industrie

- **Laitier expansé** : On obtient cela en introduisant de l'air dans le laitier en fusion. Après cette étape, le processus de concassage produit des granulats de différentes tailles. On les trouve assez peu sur le marché [34].



**Figure II.28.** Laitier expansé [34]

- **Cendres volantes** : Les cendres volantes désignent la fine couche de charbon pulvérisé qui se forme lors de la combustion. Ce sont des particules minérales qui se forment à partir du dépeussierage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible, qu'il y ait ou non des matériaux combustibles. Les particules pulvérulentes présentes dans les gaz de fumée des chaudières sont précipitées électrostatique ou mécanique pour former ces cendres. La densité sèche varie entre 630 et 680 Kg/m<sup>3</sup> [34].



**Figure II.29.** Cendres volantes [34].

- **Vermiculite** : Il s'agit d'un minéral naturel abondant provenant de la magnésie. Elle est obtenue en étendant l'eau chaude à une température de 300°C, puis en refroidissant brusquement les silicates. Elle a une densité sèche comprise entre 70 et 130 kg/m<sup>3</sup> [34].



**Figure II.30.** Vermiculite [34]

- **Perlite** : On obtient ces microbilles en chauffant une roche volcanique riche en silice à 900 et 1100 °C, puis en refroidissant brusquement, ce qui donne une densité sèche de 50 à 100. Kg/m<sup>3</sup> [34]



**Figure II.31.** Perlite [34]

### II.5.3. Granulats artificiels

#### II.3.4.1. Argiles et schiste expansés

Les bétons les plus populaires à travers le monde sont traités à des températures allant de 1150 à 1380°C. Le dégagement de certains gaz dans le matériau lui confère une structure interne alvéole et une surface externe vitrifiée et dure. Ils présentent un diamètre de 3 à 25 mm, une forme assez arrondie et une densité sèche de 350 à 750 kg/m<sup>3</sup>, ce qui donne des bétons d'une masse volumique de 1200 à 200 kg/m<sup>3</sup> [35].



Figure II.32. Argiles et schiste expansés [35]

#### II.3.4.2. Verre fritte

Le mélange de poudre de verre avec un expansif sous forme de granules est traité à une température de 800 °C, ce qui donne des boulettes avec une densité sèche d'environ 130 à 160 kg/m<sup>3</sup> [35].



Figure II.33. Verre fritte [35]

#### II.3.4.3. Polystyrènes expansés

Le polystyrène est un polymère aromatique synthétique obtenu en utilisant le monomère styrène, qui est dérivé du benzène et de l'éthylène, des produits pétroliers. Il se présente sous forme de billes sphériques de 1 à 6 mm de diamètre, avec une densité sèche de 10 à 15 kg/m<sup>3</sup>, ce qui donne des bétons avec une masse volumique de 300 à 600 kg/m<sup>3</sup> [35].



Figure II.34. Polystyrènes expansés [35]

## II.6. Caractéristiques des granulats légers

### II.6.1. Caractéristiques géométriques

En ce qui concerne la structure de ses grains, il existe des grains réguliers et des grains irréguliers avec des formes sphériques. D'un point de vue granulométrique, les granulométries régulières sont généralement les plus efficaces. Effectivement, leur fluctuation altère l'homogénéité du béton. La rhéologie à l'état frais d'un béton fraîchement malaxé est plus influencée par la forme et la texture d'un granulat que par celle d'un béton durci. La production de béton à partir de granulats avec des particules rugueuses, anguleuses et allongées nécessite davantage d'eau que celle à partir de granulats lisses, arrondis et compacts. Sur le plan rhéologique, les particules anguleuses requièrent donc davantage de ciment afin de maintenir le même rapport eau/liant. De la même manière, il peut être compliqué de pomper les bétons fabriqués avec des granulats anguleux ou à granulométrie très discontinue. En revanche, l'adhérence entre la pâte et le granulat est généralement plus efficace pour les particules rugueuses et anguleuses par rapport aux particules lisses et arrondies. Il est donc primordial de prendre en considération ces éléments lors de la sélection des granulats pour un béton [36].

### II.6.2. Propriétés mécaniques des granulats légers

Il est difficile d'évaluer avec précision les propriétés mécaniques des granulats légers en tenant compte des caractéristiques de chaque grain (porosité, densité, etc.). On utilise principalement l'essai d'écrasement au pot, développé par le laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC). Selon la norme européenne EN13055-1 (AFNORNFEN13055-1,2002), le protocole d'essai définit la résistance conventionnelle des grains. La résistance à l'écrasement en vrac est évaluée en comprimant un échantillon de granulats compactés par vibration à l'aide d'un piston dans un cylindre de 100 mm de haut et de 175 à 200 cm<sup>2</sup> de surface.

. L'enfoncement du piston atteint une vitesse de 0.2 mm par seconde et l'essai est achevée lorsque l'enfoncement atteint 20 mm. L'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre doit être résistant [37].

Le centre technique des tuiles et briques (CTIB) a réalisé un essai de compression hydrostatique. La résistance à la pression hydrostatique (pression de rupture) est caractérisée par cela. On place un granulat dans une enceinte plastique extrêmement déformable, qui est placée dans un bain d'huile de la presse. Cette huile est soumise à une pression graduelle jusqu'à ce que le granulat léger se brise en triple étreinte, ce qui se traduit par une chute soudaine de la pression. La pression de rupture définit donc la résistance du grain [37].

Le laboratoire de l'École des Mines de Paris a également mis en place l'essai au fil qui permet de mesurer la résistance à la traction par fendage.

Il se fait en entourant d'un fil d'acier mince un granulats léger et en le tirant de plus en plus, jusqu'à ce que le grain soit divisé en deux. Le rapport entre la force de traction et la force de rupture à la surface de la boucle qui forme le fil d'acier autour du grain détermine la résistance du grain.

Les formules empiriques entre la résistance et la masse volumique ont été établies pour chaque méthode de mesure (Arnould et al, 1986) [37].

### II.6.3. Propriétés élastiques des granulats légers

Muller-Rochholz a proposé une méthode pour évaluer le module d'Young, le coefficient de poisson et le module de cisaillement, en utilisant un essai ultrasonique. Dans cette expérience, il évalue les vitesses d'impulsion des ondes longitudinales et transversales à travers un granulats. Les vitesses ont été évaluées en fonction du module de Young, du coefficient de poisson et du module de cisaillement. On vérifie l'exactitude des valeurs en utilisant des matériaux tels que l'acier et le verre. Lors d'un essai de compression, Morin a effectué une mesure de déformation à l'aide d'une jauge sur un grain de 20 mm, où il a coupé deux faces planes parallèles [37].

### II.6.4. Propriétés spécifiques des granulats légers

#### II.6.4.1. Porosité

Les propriétés hygrométriques des granulats sont influencées par la porosité, ce qui a un impact sur la maniabilité du béton. La porosité totale des granulats légers est très élevée, pouvant atteindre 75% de leur volume apparent. La porosité est influencée par la dimension des grains, qui peut varier de 4 mm à 1 mm. La porosité augmente à mesure que les grains sont de plus grande taille. Il est possible de distinguer deux catégories de pores :

- Les pores ouverts qui forment une continuité de pores dans le matériau.
- Les pores fermés qui sont séparés et non connectés.

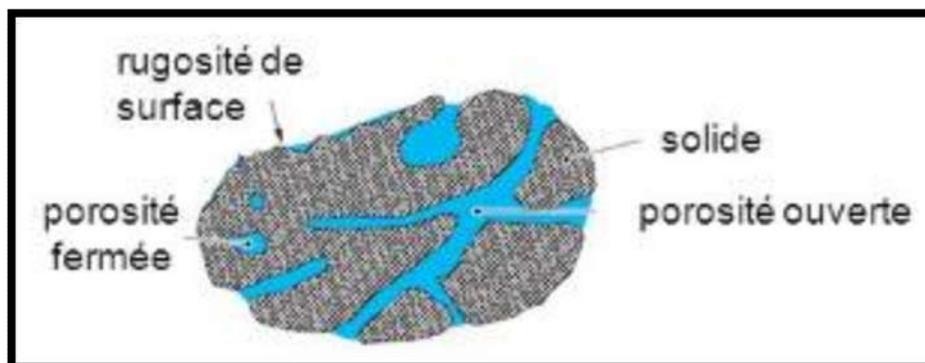


Figure II.35. Porosité des granulats [38]

Tableau II.5. Texture poreuse de certains granulats [38].

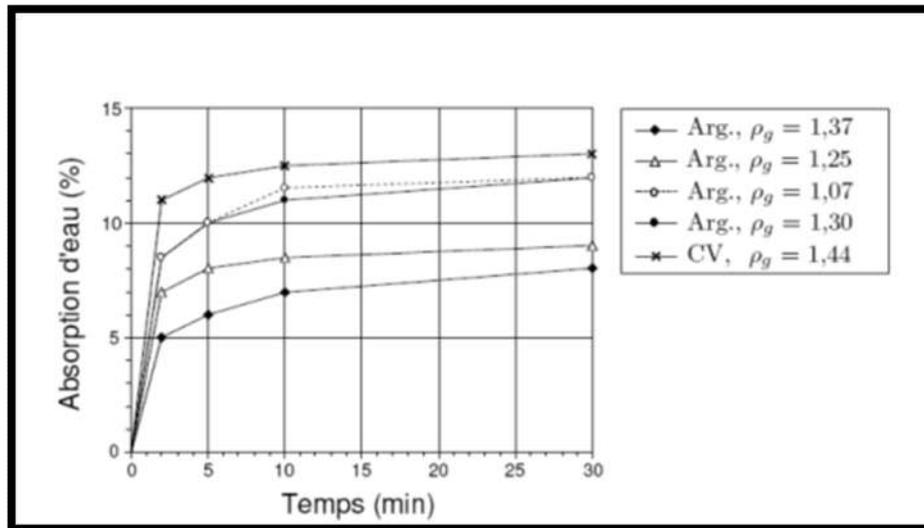
Granulats	$\rho(\text{kg/m}^3)$	Porosité $\phi$
Granulat minéral	2600	< 1%
Argile expansée	850	60 à 70 %
Copeaux de bois en vrac	275	75%
Granulat bois (Agresta)	600	60%
Argile expansée 4/10 (KE, 2008)	560	64.6%
Schiste expansée 4/10 (KE, 2008)	493	65.4%
Schiste expansée 4/10 (NGUYEN, 2013)	520	59.5%
Argile expansée 4/10 (NGUYEN, 2013)	580	56.1%

Les granulats légers présentent une porosité relativement élevée et très importante, allant de 60 à 75 %, tandis que celle du granulat minéral est inférieure à 1%. Pour qu'une formulation de bétons soit efficace, il est nécessaire de connaître l'état de porosité des granulats et le taux d'absorption en eau [38].

#### II.6.4.2. Absorption d'eau

Les granulats légers absorbent de l'eau en fonction de leur porosité. En effet, le nombre de pores présents dans les grains, leurs interactions et la densité de l'enveloppe à la surface des granulats ont un impact sur leur aptitude à absorber l'eau. D'après plusieurs études, la vitesse d'absorption est relativement rapide pendant les premières heures d'immersion et sera plus lente au-delà. On définit généralement l'absorption d'eau des granulats légers comme une série de deux étapes :

- La phase d'absorption rapide (de quelques secondes à quelques heures) commence dès que les granulats secs sont plongés dans l'eau.
- Une phase d'absorption plus lente jusqu'à ce que la valeur stable soit atteinte (cette phase peut durer jusqu'à deux ans) [37].



**Figure II.36.** Absorption d'eau des granulats d'argile expansés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV).

#### II.6.4.3. Masse volumique apparente des granulats légers :

Deux masses volumiques apparentes sont présentes dans les granulats légers : la masse volumique en vrac, qui correspond à la proportion de la masse volumique des granulats légers secs (granulats qui remplissent un contenant spécifié de manière aléatoire et sans compactage) par rapport au volume du contenant ; la masse volumique réelle, qui correspond à la proportion de la masse d'un échantillon de granulats légers secs par rapport au volume qu'il occupe dans l'eau. [39]

#### II.6.4.4. Masse volumique réelle

Cette quantité est calculée en respectant la norme NF EN 1097-6. De la même manière que la masse volumique en vrac joue un rôle dans le choix du granulat léger, la masse volumique réelle joue un rôle dans la détermination des proportions des composants granulaires qui entrent dans le béton. La relation entre la masse volumique en vrac et la masse volumique réelle est la suivante [39].

$$MV_{réelle} = 7/4MV_{vrac}$$

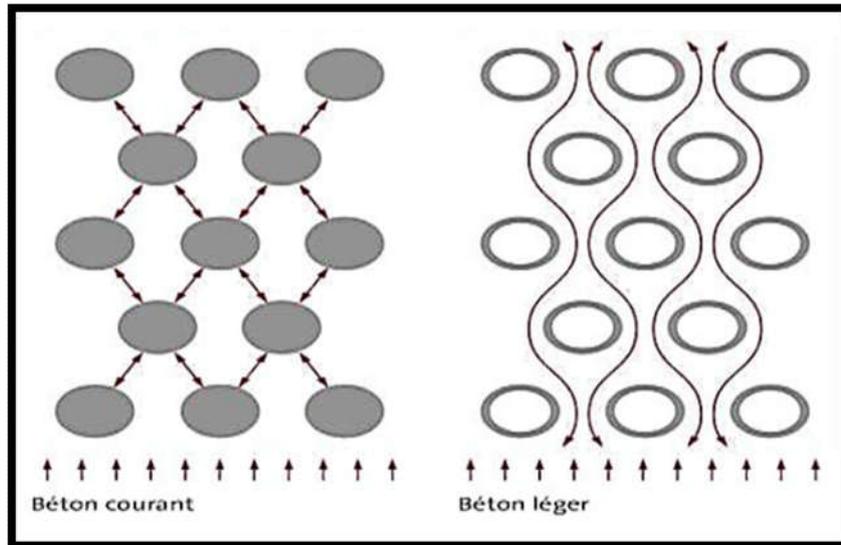
Il convient de souligner que cette relation permet de calculer de manière approximative la masse volumique réelle des granulats légers utilisés dans les bétons légers de structure dont le coefficient d'absorption d'eau ne dépasse pas 15 %.

## II.7. Propriétés des bétons légers

### II.7.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers

#### II.7.1.1. Comportement structural

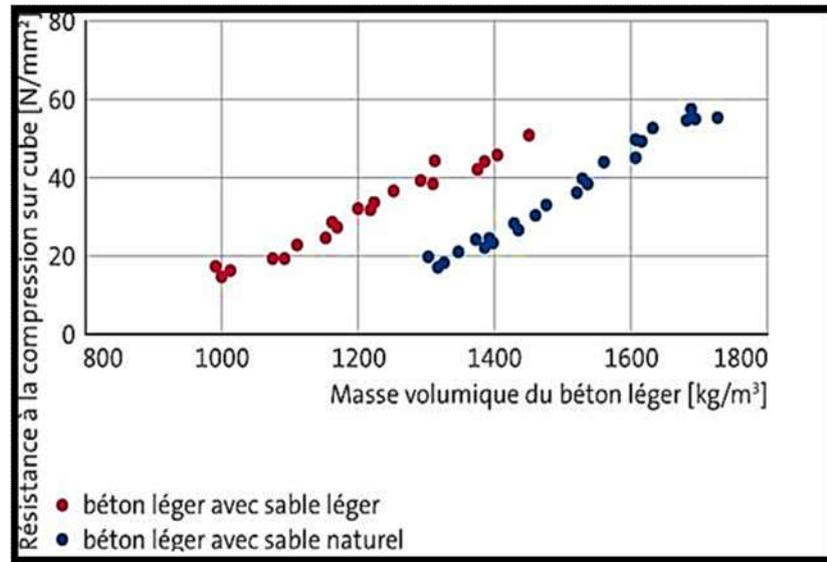
Dans la figure II.38, on compare le comportement structural du béton léger de construction à celui du béton de masse volumique habituel. Si le flux de contraintes dans le béton de masse volumique courante se déplace dans le granulat, il est dévié vers la pâte de ciment durcie, qui présente une rigidité et une résistance supérieures à celles du granulat léger. [40]



**Figure II.37.** Figure schématique du flux de contraintes dans le béton en cours de production (à gauche) et dans le béton léger de construction (à droite) [40].

#### II.7.1.2. Résistance à la compression

La masse volumique du béton est principalement influencée par la porosité du granulat liée à sa masse volumique : plus la masse volumique du granulat est faible, plus la masse volumique du béton léger sera faible. La masse volumique du béton léger influence directement sa résistance à la compression : plus la masse volumique est faible, plus sa résistance à la compression sera faible [41].



**Figure II.38.** La résistance à la compression sur cube et la masse volumique après séchage à l'étuve d'un béton léger à argile expansée sont corrélées [40]

### II.7.1.3. Résistance à la traction

On peut évaluer la résistance à la traction du béton en se basant sur sa résistance à la compression. Pour le béton léger, il est nécessaire de corriger la résistance à la traction en utilisant un facteur de correction qui varie en fonction de la masse volumique, comme indiqué dans l'équation suivante [41] :

$$\eta_l = 0.4 + 0.6(\rho/2200)$$

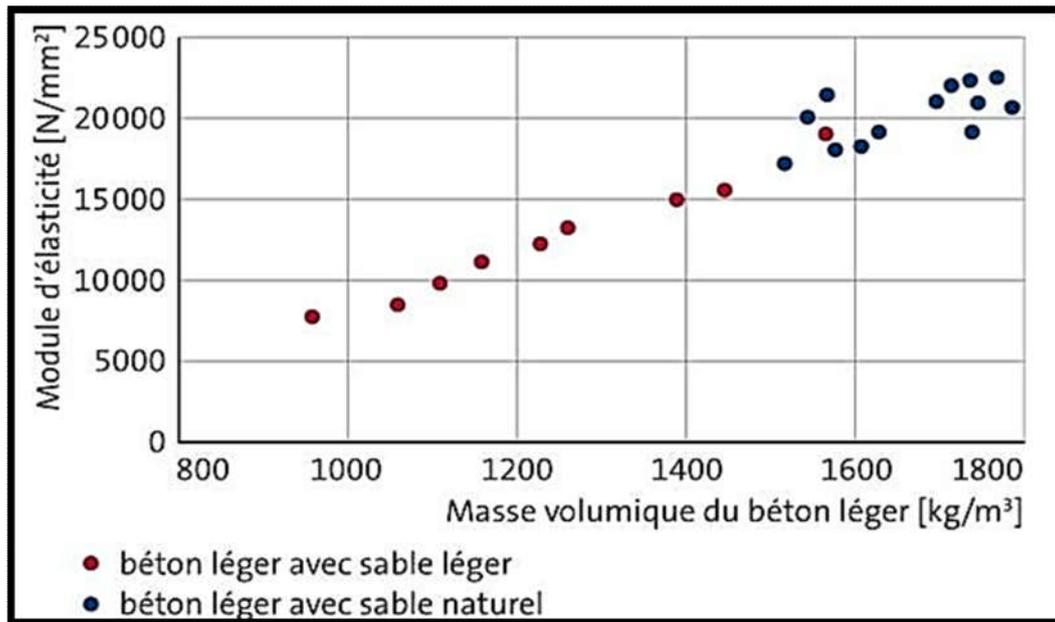
$\eta_l$  = Résistance à la traction : facteur de correction

$\rho$  = La masse volumique du béton après le séchage à l'étuve [ $kg/m^3$ ]

### II.7.1.4. Module d'élasticité

Le béton léger est principalement influencé par le module d'élasticité des granulats et de celui de la pâte de ciment. Le module d'élasticité du granulat léger a des valeurs courantes allant de 3000 à 18000 N/mm<sup>2</sup> et ne dépasse qu'une fraction du module d'élasticité du granulat normal. Il est généralement moins élevé que celui de la pâte de ciment. Le module d'élasticité du béton léger de construction peut varier entre 5000 et 24000 N/mm<sup>2</sup> en fonction du type de granulat léger, de la résistance à la compression et de la masse volumique du béton léger. Alors que les résistances à la compression sont les mêmes, le béton léger a un module d'élasticité inférieur de 30 à 70 % par rapport au béton normal. [40].

La masse volumique du béton léger entraîne une diminution du module d'élasticité. La figure 40 illustre cette dépendance pour divers types de bétons légers.



**Figure II.39.** Le module d'élasticité de différents bétons légers est corrélé à la masse volumique après séchage à l'étuve [40].

On peut évaluer le module d'élasticité du béton en se basant sur sa résistance à la compression. Selon l'équation suivante, il est nécessaire de corriger le béton léger en utilisant un facteur de correction qui dépend de sa masse volumique [40].

$$\eta E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2$$

$\eta E$  = Module d'élasticité : Facteur de correction

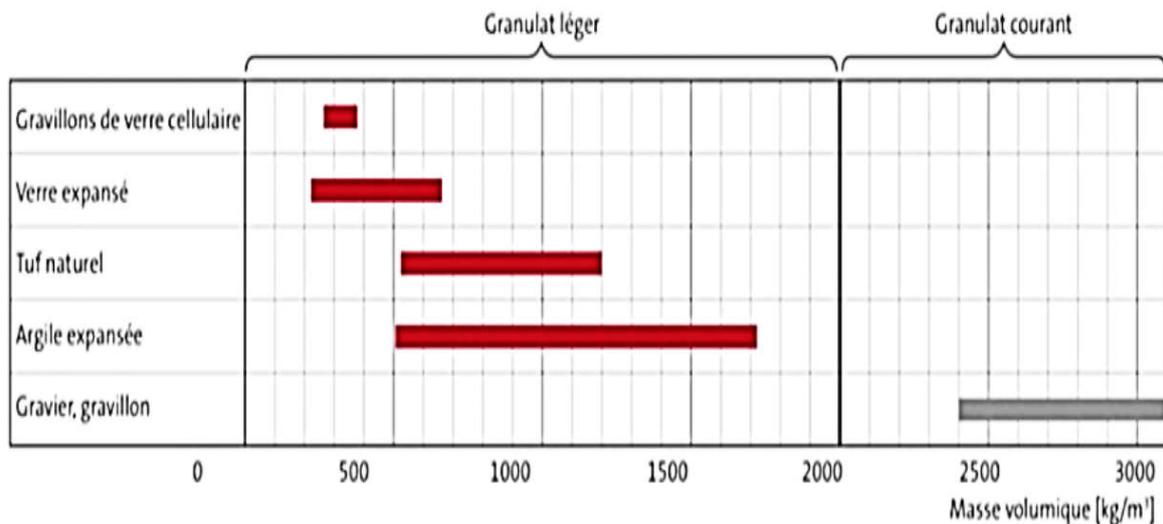
$\rho$  = masse volumique du béton après séchage à l'étuve [ $kg/m^3$ ]

#### II.7.1.5. Retrait et fluage

Il y a une augmentation de 20 à 50 % du retrait du béton léger par rapport à celui d'un béton de masse volumique standard selon la norme suisse SIA 262. Pour le béton léger, il est possible d'estimer les déformations de fluage en utilisant la norme SIA 262. Un coefficient de fluage  $\phi(t, t_0)$  sera utilisé en multipliant le facteur de correction  $\eta$ . Le retrait du béton léger revêt une importance supérieure à celle du béton classique. Il représente environ 0,5 fois le facteur d'un béton ordinaire pour les classes inférieures à la classe LC 16/18 et 1,2 pour les classes supérieures à la classe LC 20/22. Le terme "LC" désigne concrètement le béton léger, ce qui signifie que le premier chiffre correspond à la résistance à la compression à 28 jours sur une éprouvette cylindrique, tandis que le second chiffre correspond à la résistance à la compression à 28 jours sur une éprouvette cubique [40].

### II.7.1.6. La masse volumique

Dans le cadre de cette étude, la masse volumique du béton est l'une des caractéristiques les plus cruciales. On peut diminuer la masse volumique en échangeant le granulat et en modifiant les proportions des différents composants [42].



**Figure II.40.** Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants [42]

### II.7.1.7. Durabilité

On peut observer de nombreux pores et cavités sur la surface d'un béton léger compact, mesurant plusieurs centimètres. En général, ils n'ont pas d'impact négatif sur la longévité du béton. On conseille l'utilisation d'un coffrage absorbant afin de diminuer la taille et le nombre des pores. De plus, il est conseillé de traiter les surfaces des éléments de construction exposés aux intempéries avec un traitement hydrofuge lorsque la classe de masse volumique est inférieure à [1000 - 1200] Kg/m<sup>3</sup> (au plus tôt à l'âge de 28 jours). Cela accroît la résistance au gel du béton léger et facilite également le nettoyage de la surface des salissures et des graffitis. La conception du béton est souvent influencée par les conditions d'exposition. Effectivement, les cycles de gel-dégel, qu'ils soient accompagnés ou non de sels fondants, jouent un rôle essentiel dans la résistance des bétons légers exposés aux conditions météorologiques. Les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, doivent être distingués, car les mécanismes de dégradation sont différents. Si des agents moussants sont utilisés, la durée de malaxage peut atteindre 180-200 secondes [43].

### II.7.1.8. Conductivité thermique

Selon la norme SIA 381/1 (norme suisse), les valeurs de dimensionnement du coefficient de conductibilité thermique pour les bétons légers à base d'argile expansée sont établies en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve.

**Tableau II.6.** En fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve, la conductivité thermique des bétons légers à base d'argile expansée et des bétons courants est évaluée (valeurs de dimensionnement selon la norme SIA 381/1) [40]

Masse volumique sèche $\rho$ du béton léger [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivité thermique $\lambda$ [w/mk]
1000	0.30
1250	0.50
1500	0.70
1700	1.00
2400	1.80

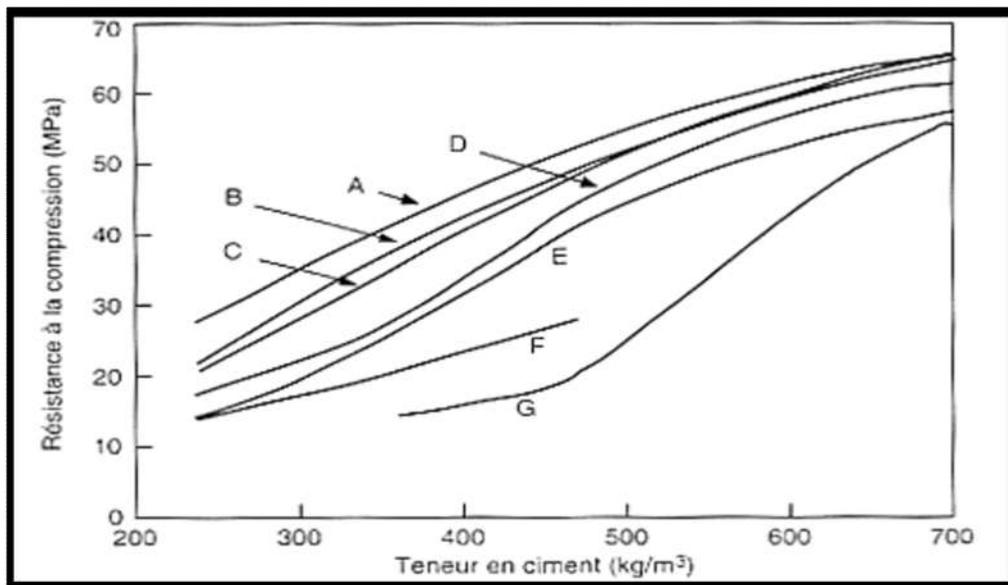
Le béton léger se distingue par sa faible capacité à conduire la chaleur par rapport à un béton de masse volumique habituel. Les bétons légers, également connus sous le nom d'isolement, qui ont des masses volumiques après séchage à l'étuve compris entre 800 et 1000 kg/m<sup>3</sup>, offrent non seulement une compaction et une capacité portante accrues, mais également des caractéristiques d'isolation thermique. Ils offrent la possibilité de construire des murs monolithiques en béton de parement, sans nécessiter de doublage ni d'isolation périphérique supplémentaire. Cependant, pour répondre aux exigences d'isolation thermique, de tels murs nécessiteraient des épaisseurs considérables (environ 1.50 m) afin de répondre aux exigences d'isolation thermique ( $u \approx 0.15$ ). Il est impossible d'atteindre la masse volumique sèche du béton isolant sans l'utilisation d'entraîneurs d'air spécifiques ou d'agents moussants utilisés pour les bétons moussants [40].

## II.8. Les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons provenant de granulats légers

### II.8.1. Les propriétés mécaniques

Plusieurs chercheurs ont étudié les diverses caractéristiques des granulats légers et des bétons légers. Les bétons de granulats légers se distinguent principalement des bétons de granulats rigides par leur masse volumique plus faible, ce qui réduit à la fois le module élastique et la résistance du béton.

Malgré un niveau de résistance limité, des bétons légers à haute performance avec une résistance en compression supérieure à 60 MPa et une masse volumique inférieure à 1900 kg/m<sup>3</sup> ont été fabriqués. On ne connaît pas encore les mécanismes qui permettent d'expliquer un tel niveau de performance. La relation entre la résistance mécanique du béton à la compression et le dosage en ciment peut être mentionnée pour divers bétons légers (voir figure ci-dessous).

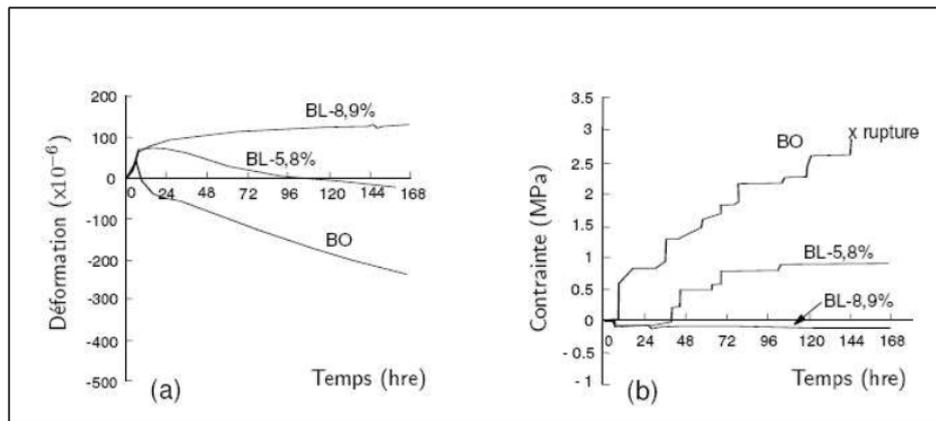


**Figure II.41.** La corrélation entre la capacité du béton à s'affaisser après 28 jours (mesurée sur des cubes) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 5 cm et fabriqués avec divers granulats légers.

Les bétons légers de granulats sont des matériaux composés de granulats flexibles qui sont noyés dans une matrice plus ou moins rigide et continue ( $E_g \geq E_m$ ). Leurs propriétés mécaniques sont donc étroitement liées à la disparité du module élastique entre ces deux phases, ainsi qu'à leurs proportions volumiques respectives [6].

### II.8.2. Retrait

La plupart des bétons légers ont un retrait plus élevé que les bétons classiques et plus tardif, car l'eau absorbée par les granulats légers est progressivement restituée par la matrice, ce qui retarde la déshydratation du mortier, qui est la principale cause du retrait. La valeur finale du retrait est déterminée en fonction du dosage en ciment, en eau et de la nature des granulats légers utilisés. En comparant la déformation d'un béton ordinaire et de deux bétons saturés et partiellement saturés, la figure II.22 illustre quelques résultats de sur l'efficacité des granulats légers pour prévenir les dommages causés par le retrait endogène.



**Figure II.42.** Le retrait endogène évolue au fil du temps : déformation libres (a) et contraintes causées par le retrait empêché (b) ; bétons légers avec des granulats saturés (BL-8,9%) et partiellement saturés (BL-5,8%) ; bétons de granulats rigides (BO).

Le retrait endogène est une diminution de volume de la pâte liante provoquée par son assèchement interne du fait de la consommation de l'eau pour l'hydratation ; on dit aussi retrait d'auto-dessiccation ou retrait d'hydratation [6].

### II.8.3. L'isolation thermique

L'une des caractéristiques captivantes des bétons de granulats légers réside dans leur capacité à isoler la chaleur grâce aux nombreuses bulles d'air qui se trouvent dans l'épaisseur du béton. Le béton sec est plus efficace en termes d'isolation que le béton humide. Ces bétons légers sont également des excellents isolants sonores.

Les performances d'isolation thermique sont influencées par la relation entre la masse et le coefficient de conductivité thermique, d'autant plus forte que la densité diminue.

En raison de leur conductivité thermique et de leur faible coefficient de dilatation, les bétons légers ont une résistance au feu supérieure à celle des bétons classiques, à condition que les granulats soient minéraux. Les bétons légers ont une structure cellulaire qui leur garantit une excellente résistance à l'eau tout en favorisant les échanges de vapeur. De plus, ils sont également des matériaux résistants au gel [6].

### II.9. Domaines d'utilisation des bétons légers

Les bétons légers de granulats sont employés dans le secteur du bâtiment et des constructions. Les éléments tels que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts, etc., sont généralement utilisés pour alléger ces éléments. On retrouve également des bétons de granulats légers qui permettent d'améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques, ce qui protège les résidents des perturbations sonores.

Ils sont employés dans les bâtiments préfabriqués ou construits sur site. Les produits de structure utilisant des bétons légers ont des masses volumiques réelles sèches allant de 1200 à 2000 kg/m<sup>3</sup> et des résistances à la compression allant de 25 à 80 MPA [6].

**Tableau II.7.** Caractéristiques des bétons de granulats légers [6]

Types de bétons spéciaux	Propriétés, caractéristiques particulières	Utilisation, domaines d'applications privilégiés
Bétons de granulats légers	-Masse volumique réduite (entre 1000 et 1800 kg/m <sup>3</sup> ) -bonne résistance mécanique	-Allègement des produits et des ouvrages -isolation thermique et phonique

Les structures peuvent utiliser des bétons légers en fonction de leurs masses volumiques apparentes, comme indiqué ci-dessous :

- Les bétons de remplissage ont une masse volumique apparente de 300 à 1000kg/m<sup>3</sup>, sont souvent peu résistants en compression et ont de bonnes caractéristiques thermiques.
- Les bétons isolants porteurs ont une masse volumique apparente comprise entre 1000 et 1400 kg/m<sup>3</sup>, leur résistance mécanique est bien supérieure à celle des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont satisfaisantes. Ils sont généralement utilisés comme des éléments préfabriqués.
- Les bétons de construction ont une masse volumique variant de 1400 à 1800 kg/m<sup>3</sup>. Ils sont conçus pour former des structures en raison de leurs résistances mécaniques qui peuvent être similaires à celles des bétons classiques. Leur capacité d'isolation est plutôt limitée. Il peut également servir à la restauration de planchers en bois ou en béton, ainsi qu'au ragréage des sols et au remblai [43].

## II.10. Conclusion

Le béton léger est un matériau de construction qui offre de multiples bénéfices en termes d'efficacité énergétique et de diminution du poids. On le produit habituellement en intégrant des matériaux légers comme des agrégats ou des agents de moussage, ce qui diminue la densité du béton. Toutefois, il convient de souligner que le béton léger peut présenter certaines contraintes, notamment en ce qui concerne sa résistance et sa durabilité par rapport au béton classique. Il peut aussi être requis d'utiliser des méthodes particulières de mélange et d'application afin d'obtenir les performances optimales. Globalement, le béton léger présente une attractivité supplémentaire par rapport au béton traditionnel dans de multiples situations, en particulier pour les constructions où la réalisation de poids et l'isolation thermique sont des préoccupations essentielles.

## **Chapitre III**

### III. Matériaux et méthodes de caractérisation

#### III.1. Introduction

Ce chapitre est divisé en deux parties distinctes. **La première partie** est dédiée à la description des essais réalisés dans notre travail expérimental, ainsi qu'aux matériaux utilisés pour l'élaboration des mortiers légers. Les essais physiques et mécaniques ont été menés au sein du Laboratoire du département de Génie Civil de l'université AKLI MOUHAND OULHADJ de BOUIRA. Les matériaux utilisés dans cette partie sont les suivants : le sable de carrière de la région de SOUR EL GHOZLANE, de la Wilaya de BOUIRA, l'eau de gâchage provenant du réseau de distribution de la région de BOUIRA, le ciment Portland CEM II/-L42, 5 de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE, la poudre d'aluminium et le polystyrène.

**La deuxième partie** de l'étude se concentre sur la formulation des différentes variantes des mortiers en ajoutant, d'une part, de la poudre d'aluminium à des taux variables de 2 %, 2.2 %, 2.4 %, 2.6 % et 2.8 %, qui seront comparés aux échantillons de mortier témoins sans ajout de poudre d'aluminium, et d'autre part, en substituant le polystyrène à des proportions de 10 %, 20 %, 30 % et 40 %. Cette substitution implique le remplacement d'une partie du sable utilisé par son équivalent volumique en granulat de polystyrène expansé.

Les mortiers légers produits ont été soumis à des essais physico-mécaniques, comprenant la détermination de leur masse volumique ainsi que de leur résistance mécanique en flexion et en compression, en plus d'être caractérisés par des essais thermiques.

#### III.2. Le sable

Le sable employé pendant cette expérience est originaire de la région de SOUR EL GHOZLANE de la WILAYA de BOUIRA.



Figure III.43. Sable utilisé.

#### III.3. La masse volumique du sable

La masse volumique du sable varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment la granulométrie du sable, la composition minéralogique et la présence de contaminants.

En moyenne, la masse volumique du sable sec se situe généralement entre 1 400 et 1 600 kg/m<sup>3</sup>. Cependant, cette valeur peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques du sable utilisé. Par exemple, le sable de silice, qui est couramment utilisé dans la construction, a généralement une masse volumique d'environ 1 600 kg/m<sup>3</sup>. Il est important de noter que la masse volumique du sable peut également varier en fonction de son degré de saturation en eau.

### III.3.1. Masse volumique apparente [NF EN 1097-3] [44]

**Le mode opératoire** pour mesurer la masse volumique apparente du sable consiste en plusieurs étapes. Tout d'abord, il faut préparer un récipient de volume connu et le tarer sur une balance. Ensuite, former un entonnoir avec le sable en prenant le matériau dans les deux mains. Positionner les mains au-dessus du récipient à une hauteur d'environ 10 cm et verser le sable jusqu'à ce que le récipient soit rempli et que le sable déborde légèrement sur les bords. Utiliser une règle pour lisser la surface du sable sans le comprimer. Ensuite, peser le récipient avec le sable et noter cette masse. Répéter cette opération au moins deux fois pour obtenir des mesures précises. Enfin, calculer la masse volumique apparente du sable en divisant la masse du sable par le volume du récipient. La formule suivante permet de calculer la masse volumique apparente :  $\rho_{Abs} = \frac{m}{V}$



Figure III.44. Mesure de la masse volumique apparente.

### III.3.2. Masse volumique absolue [NF EN 1097- 6] [45]

**Le mode opératoire** pour mesurer la masse volumique du sable consiste en plusieurs étapes. Tout d'abord, on commence par le remplissage du cylindre gradué avec une quantité d'eau connue ( $V_1 = 400$  ml).

Ensuite, un échantillon de sable sec est mesuré ( $m_s = 300$  g) et cet échantillon est placé dans le cylindre gradué en veillant à éliminer toutes les bulles d'air.

Lorsque le sable est introduit, le liquide se déplace dans le cylindre, faisant augmenter le niveau de l'eau jusqu'à ce qu'il atteigne un niveau  $V_2$ , correspondant à un volume de 500 ml.

La masse volumique absolue est déterminée avec la formule suivante :  $\rho_{APP} = \frac{m_s}{V_1 - V_2}$



Figure III.45 Mesure de la masse volumique absolue.

#### III.4. Analyse granulométrique par tamisage [NF EN 933-1] [46]

L'analyse granulométrique des granulats implique la sélection et la préparation d'un échantillon représentatif, suivi du tamisage à travers un ensemble de tamis de différentes tailles. Après avoir pesé les particules retenues sur chaque tamis, les pourcentages cumulatifs sont calculés et tracés sur un graphique semi-logarithmique pour former la courbe granulométrique. Cette courbe offre des indications sur la distribution des tailles des particules dans l'échantillon, avec des valeurs telles que le diamètre maximal et la teneur des fines particules des granulats.

##### III.4.1. Mode Opératoire

Pour réaliser l'analyse granulométrique du sable, nous commençons par préparer un échantillon de 2 kg de sable, que nous tamisons à travers une série de tamis, classés de la plus grande à la plus petite ouverture (5/2.5/0.63/0.315/0.16/0.08). On verse l'échantillon de sable sur le tamis de 5 mm, nous fixons la série de tamis sur la table vibrante et on la laisse agir pendant 12 minutes à une vitesse moyenne. Une fois l'essai terminé, le reste sur chaque tamis est ensuite pesé et les pourcentages de refus et de tamisât sont calculés. Enfin, nous traçons les courbes granulométriques pour visualiser la distribution des tailles des particules dans l'échantillon de sable.



Figure III.46. Série des tamis

### III.4.2. Module de finesse (NFP 18-540) [47]

On peut mesurer la finesse du sable étudié en calculant son module de finesse MF. Le module de finesse du sable est une mesure utilisée pour caractériser la finesse globale d'un échantillon de sable. Il est calculé en prenant en compte la distribution des tailles de particules dans le sable. Plus précisément, le module de finesse est défini comme la somme des pourcentages des refus cumulatifs des tamis avec des ouvertures spécifiques, généralement 0,16 mm et 5 mm, divisé par 100. Selon la relation suivante :

$$Mf = \sum \text{refus cumulé de tamis \% (0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 2.5; 5)/100}$$

Le Tableau suivant représente La finesse du sable en fonction des valeurs du module de finesse.

Tableau III.8. Type du sable en fonction des valeurs du module de finesse.

MF	Type
1,8 – 2,2	La plupart du sable est composé de grains fins.
2,2 – 2,8	Il s'agit d'un type de sable préféré.
2,8 – 3,3	Le sable a une certaine grosseur.

### III.5. Equivalent de sable

Cet essai est fréquemment utilisé pour évaluer la qualité des sables. L'objectif de l'essai est de distinguer les particules fines présentes dans le sable des éléments sableux plus gros, en respectant la norme (NF EN 933-8) [48].



Figure III.47. Essais d'équivalent de sable visuel et au piston.

### III.5.1. Mode Opérateur

Le mode opératoire pour déterminer l'équivalent de sable comprend plusieurs étapes. Tout d'abord, l'échantillon de sable est préparé en prélevant une quantité représentative, puis en le séchant et en le tamisant pour obtenir une fraction de taille spécifique, conformément aux normes applicables. Ensuite, une solution lavante est préparée. Le mélange est alors préparé en ajoutant l'échantillon de sable à une quantité précise de la solution lavant dans un cylindre de mesure, suivi d'une agitation vigoureuse pour assurer une dispersion uniforme des particules fines. Après une période de décantation définie, les grains de sable se déposent jusqu'à un niveau de  $h_2$ , et puis le flocculat se déposer au-dessus du sable dans la solution.

L'équivalent de sable est mesuré par la formule :  $E_q = \frac{h_2}{h_1}$ .

Le tableau suivant représente la qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable par piston et visuel (d'ESP et ESV).

**Tableau III.9.** La qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable par piston et visuel (d'ESP et ESV).

ES visuel	ES au piston	Nature et qualité du sable
ESV < 65%	ESP < 60%	Le sable argileux peut entraîner un gonflement. Sable à éliminer pour obtenir des bétons de haute qualité.
65% ≤ ESV < 75%	60 ≤ ESP < 70%	Le sable légèrement argileux de qualité acceptable n'a pas d'impact significatif sur la qualité du béton.
75% ≤ ESV < 85%	70% ≤ ESP < 80%	Sable propre avec une faible quantité de fines argileuses, idéal pour les bétons de grande qualité.
ESV ≥ 85%	ESP ≥ 80%	La présence presque totale de fines argileuses dans le sable très propre peut entraîner un manque de plasticité du béton, ce qui nécessitera une augmentation du dosage en eau.

### III.6. Le ciment

Le ciment utilisé dans le cadre de notre étude est un ciment portland CEM II A-L 42.5 N de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE, de la Wilaya de Bouira.

Le ciment Portland au calcaire CEM II A-L 42.5 N (NA 442/2013) [49] est une variante de ciment gris qui se compose principalement de clinker ordinaire, représentant entre 80 et 94 % du mélange, avec une teneur en C<sub>3</sub>S (silicate tricalcique) d'au moins 55 %. En outre, il contient entre 6 et 20 % de calcaire pur, qui agit comme un additif pour modifier certaines propriétés du ciment. Ce ciment peut également inclure jusqu'à 5 % de gypse en tant que régulateur de prise pour contrôler le temps de prise du ciment.

Cette composition confère au ciment des caractéristiques spécifiques, le rendant adapté à diverses applications dans l'industrie de la construction, où des exigences de résistance et de performance particulières sont nécessaires.

### III.6.1. La masse volumique absolue du ciment

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment qui varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant compris entre 3,0 et 3,2 g/cm<sup>3</sup>.

#### Mode Opératoire

Pour déterminer la masse volumique absolue du ciment, le mode opératoire commence par remplir un pycnomètre avec du toluène jusqu'à ce que le niveau se situe entre 0 et 1, en évitant de mouiller les parois. Ensuite, le pycnomètre est immergé dans de l'eau à 20°C. Une masse précise de ciment de 64 g, à une précision de 0,1 g, est pesée, puis versée lentement dans le pycnomètre pour éviter tout dépôt sur les parois. Après avoir bouché le pycnomètre, celui-ci est incliné à 45° et roulé avec un mouvement de va-et-vient pour faciliter le départ de l'air. Ensuite, le pycnomètre est placé dans un bain marie et le niveau N<sub>1</sub> du liquide est lu. La masse volumique absolue du ciment est calculée en utilisant la formule  $\rho = 64 / (N_1 - N_0)$  g/cm<sup>3</sup>, où N<sub>0</sub> représente le niveau initial du toluène dans le pycnomètre et N<sub>1</sub> le niveau final après ajout du ciment.

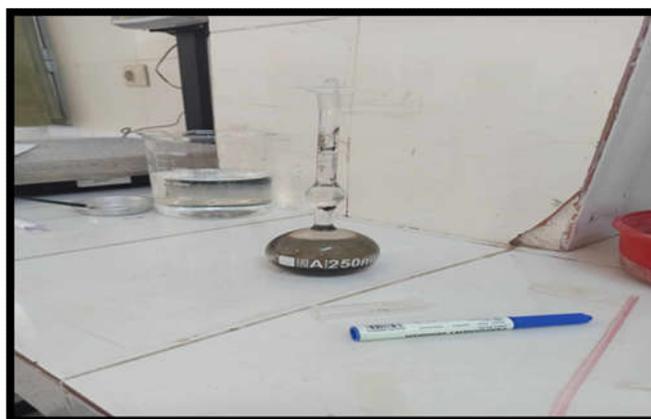


Figure III.48. Mesure de la masse volumique absolue du ciment

### III.6.2. La consistance normalisée

On procède à l'essai de consistance normale en utilisant l'appareil de Vicat conformément à la norme (EN 196-3) [50]. La quantité d'eau nécessaire pour produire une pâte de ciment de consistance normale est appelée consistance normale. On mesure l'enfoncement d'une tige cylindrique, sous l'action d'une charge constante, dans la pâte. L'enfoncement revêt une importance accrue lorsque la consistance est plus fluide, ce qui donne lieu à l'appellation de

"consistance de Vicat". L'objectif est d'établir la quantité idéale d'eau de gâchage pour hydrater le ciment.

### Mode Opératoire

Pour mesurer la consistance normale du ciment, 500 g de ciment sont pesés et placés dans la cuve du malaxeur, auquel est ajouté un volume d'eau sélectionné, par exemple 130 ml, pour obtenir un rapport eau/ciment (E/C) de 0,26. Le malaxeur est ensuite mis en marche à une vitesse lente pendant 90 secondes, puis arrêté pendant 15 secondes pour ramener la pâte dans la cuve. Après avoir réactivé la machine pendant 90 secondes, la pâte est rapidement introduite dans un moule tronconique, où l'excès est retiré avec une truelle et l'échantillon est placé sur la platine de l'appareil de Vicat. Lorsque le malaxage commence, la sonde est abaissée à la surface de l'échantillon pour mesurer la distance « d » qui sépare l'extrémité de la sonde de la plaque de base. Si cette distance est de  $6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , la consistance de la pâte est considérée comme normalisée. Dans le cas contraire, si « d » ne se situe pas dans cette plage ( $d > 7 \text{ mm}$  ou  $< 5 \text{ mm}$ ), l'essai doit être répété avec un rapport E/C différent jusqu'à ce que la consistance requise soit atteinte.



**Figure III.49.** Exemple de mesure de la consistance normalisée du ciment

### III.6.3. Essai de prise

L'objectif de l'essai est de surveiller l'évolution de la consistance d'une pâte uniformisée ; l'instrument utilisé est l'appareil de Vicat avec une aiguille de 1.13 mm de diamètre.

Lorsque l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule, de telle manière que  $d = 4 \text{ mm} \pm 1$ , on considère que le début de prise est atteint. La mesure de ce moment, à partir du début du malaxage, est connue sous le nom de « temps de début de prise ». Le moment où l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0,5 mm est appelé « temps de fin de prise ». L'objectif est de calculer la durée entre le processus de gâchage et le début de la prise du ciment.

Aussi évaluer également la durée qui s'écoule entre le processus de gâchage et la finalisation de la prise du ciment selon la norme (EN 196-3) [50].



Figure III.50. Exemple de mesure de la prise du ciment

### III.7. La chaux

La chaux aérienne est un matériau de construction traditionnel produit par la calcination de calcaire à une température de  $900^{\circ}\text{C}$ , dans un processus appelé « cuisson ». Ce matériau est principalement composé d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) et présente une réactivité avec le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) de l'air, ce qui lui permet de durcir lentement au contact de l'humidité et de retrouver ainsi sa forme de calcaire d'origine. La chaux aérienne est largement utilisée dans la construction comme liant dans les mortiers et les enduits. La chaux utilisée dans le cadre de notre étude est celle de la zone industrielle EL HSASNA de la wilaya du SAIDA.



Figure III.51. Sac de 20 kg de la chaux

### III.8. Le super plastifiant

Afin d'assurer une fluidité aux mélanges étudiée, on a utilisé un adjuvant de type Super plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent « Sikaplast 40 pro », pour bétons prêts à l'emploi, issu de la boîte SIKA Algérie.

Le pourcentage du super plastifiant est choisie selon les essais préliminaires sur mortiers ayants donner une meilleure fluidité, on a retenu le pourcentage de 2% par rapport au dosage du ciment, selon la norme (NF EN 934-2) [51].



Figure III.52. Le super plastifiant

### III.9. La poudre d'aluminium

Il est important de souligner que la poudre d'aluminium utilisée comme agent réactif pour l'expansion du mortier léger est composée d'aluminium pur à 99%, avec une granulométrie d'environ 100 $\mu$ m. La qualité de l'aluminium a un impact sur la réaction d'expansion (aluminium-chaux) et, par conséquent, sur la densité du produit final.



Figure III.53. La poudre d'aluminium

Tableau III.10. Les propriétés de base de la poudre d'aluminium.

Non	Caractéristiques principales	Valeurs des indicateurs
1	Apparence	Grise
2	Pureté %	0.99
3	Substance organique soluble %	< 4,0
4	Volatil %	$\leq$ 10
5	Taille de particules ( $\mu$ m)	50-75
6	Solubilité	Soluble dans l'acide et l'alcali

### III.10. Polystyrène expansé

Le polystyrène expansé, également connu sous le nom de polystyrène expansible ou EPS (Expanded Polystyrene en anglais), est un matériau plastique léger et isolant utilisé dans de nombreuses applications.

Il est fabriqué à partir de granules de polystyrène qui sont chauffés et expansés à l'aide de vapeur d'eau, créant ainsi une structure cellulaire fermée qui lui confère ses propriétés isolantes. Le polystyrène expansé est largement utilisé dans l'industrie de la construction pour l'isolation thermique des bâtiments, dans l'emballage pour protéger les produits fragiles pendant le transport, ainsi que dans de nombreux autres domaines en raison de sa légèreté, de sa résistance aux chocs et de son faible coût. Les masses volumiques (apparente et absolue) ainsi que l'analyse granulométrique du polystyrène expansé ont été mesurées au niveau du laboratoire.



Figure III.54. Granulat de polystyrène.

### III.11. Le mortier

#### III.11.1. Confection des mortiers

Des échantillons prismatiques de de trois types de mortiers (témoin, mortier léger à base de poudre d'alumine et un autre à base de polystyrène) ont été élaborées, un malaxeur a été utilisé pour préparer les mélanges du mortier, un dispositif à chocs qui permet de faire tomber les moules d'une hauteur de  $15 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$  à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 secondes a été utilisé pendant le remplissage des moules prismatiques  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ , après 24 heures les éprouvettes ont été démoulées et ont été stockées dans un bassin rempli d'eau.



Figure III.55. Malaxage des constituants de mortier.





**Figure III.57.** Eprouvette prismatique (4x4x16) du mortier de polystyrène

### III.11.3. Mortier cellulaire

Le but de cette méthode consiste à générer des bulles d'air à l'intérieur du mortier frais en ajoutant de la poudre d'aluminium. L'émission de gaz est due à la réaction chimique entre la poudre d'aluminium et la chaux. Six formulations ont été réalisées, avec des pourcentages de poudre d'aluminium variés (2%, 2,2%, 2,4%, 2,6% et 2,8%). La combinaison de sable et de ciment est mélangée à sec pendant deux minutes à une vitesse lente à l'aide d'un malaxeur. Ensuite, on verse progressivement de l'eau de gâchage dans le mélange, ce qui interrompt le processus de malaxage. Le temps de malaxage en phase humide est établi à quatre minutes : deux minutes à une vitesse lente, puis un arrêt pour racler les parois et surtout le fond de la cuvette afin d'homogénéiser le mélange. Par la suite, le malaxage est repris pendant deux minutes à une vitesse élevée. Le malaxage est interrompu une seconde fois afin d'ajouter la poudre d'aluminium, puis le malaxage est redémarré pendant une minute à vitesse rapide. Le tableau ci-dessous représente les différentes formulations de mortier cellulaire élaborées.

**Tableau III.12.** Les formulations du mortier cellulaire (avec ajout de poudre d'alumine).

Composition (g)	Mortier témoin	MPAL (2%)	MPAL (2,2%)	MPAL (2,4%)	MPAL (2,6%)	MPAL (2,8%)
<b>Ciment</b>	1200	1200	1200	1200	1200	1200
<b>Sable</b>	1800	1800	1800	1800	1800	1800
<b>La chaux</b>	/	200	200	200	200	200
<b>PAL</b>	/	24	26,4	28,8	31,2	33,6
<b>E/C</b>	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
<b>Eau</b>	560	560	560	560	560	560



**Figure III.58.** Mortier cellulaire (avec ajout de poudre d'alumine) éprouvette prismatique (4x4x16) cm<sup>3</sup>

#### III.11.4. Les essais thermiques

Les essais thermiques réalisés sur des mortiers légers sont des tests effectués pour évaluer la réponse de ces matériaux à des variations de température. Ces essais sont importants pour comprendre comment les mortiers légers réagissent aux conditions thermiques auxquelles ils peuvent être exposés dans leur environnement d'utilisation. Les essais thermiques peuvent inclure plusieurs paramètres, tels que la conductivité thermique, la dilatation thermique, la résistance au feu, la stabilité dimensionnelle, etc. L'objectif principal de ces essais est de garantir que les mortiers légers répondent aux exigences de performance thermique et de sécurité dans diverses applications, telles que la construction de bâtiments. Les essais thermiques ont été réalisés sur les trois types de mortier (témoin, à base de granulats de polystyrène et le mortier cellulaire contenant de la poudre d'aluminium), avec des éprouvettes de dimensions (10x7x2,5) cm<sup>3</sup>.



**Figure III.59.** Mortier pour l'essai thermique « éprouvette (10x7x2,5) cm<sup>3</sup> ».

### III.11.5. Essai d'étalement sur mortier (table à secousse)

L'objectif de la mesure de l'étalement est de donner un indicateur de la maniabilité du mélange. La facilité d'utilisation est une caractéristique inhérente au matériau frais. Elle évalue la simplicité de sa mise en place. Cette caractéristique peut avoir un impact sur les propriétés mécaniques du matériau lorsqu'il est durci. La figure suivante représente l'essai d'étalement sur mortier.



**Figure III.60.** L'essai de l'étalement de mortier

Le tableau ci-dessous représente la classification des mortiers en fonction de l'étalement.

**Tableau III.13.** Classification des mortiers en fonction de leurs étalements

Ouvrabilité	Etalement à la table %
Très ferme	10-30
Ferme	30-60
Normal	60-80
Mou	80-100
Très mou	>100

### III.11.6. La masse volumique du mortier

Les masses des mortiers ont été évaluées en se basant sur la norme (NF P 18-440) [52]. Les mesures sont effectuées à des âges de 7 et 28 jours. Pour déterminer la masse volumique du mortier à l'état durci, il faut peser les éprouvettes de chaque série de mortier, l'expression suivante donne la masse volumique :  $M_{app} = M/V$

M : masse de l'échantillon. V : taille de l'échantillon tel que :

$$V_{calculé} : 4 \times 4 \times 16 \text{ cm} = 256 \text{ cm}^3.$$



**Figure III.61.** Détermination de la masse volumique des éprouvettes de mortier.

### III.11.7. Coefficient d'absorption [NF EN 1097- 6] [45]

Il est nécessaire de placer un échantillon de mortier sec (on mesure sa masse  $m_1$ ) dans un bac rempli d'eau et de l'immerger complètement dans l'eau jusqu'à ce que sa masse soit stable. Après 24 heures d'immersion dans l'eau, l'échantillon doit être retiré et séché en surface avec un chiffon absorbant, jusqu'à ce qu'il passe d'un aspect mouillé et brillant à un aspect mat. On mesure sa masse  $m_2$ . Le coefficient d'absorption est mesuré comme suit :

$$Abs = \frac{m_2}{m_1 - m_2} \times 100$$



**Figure III.62.** Essais de Coefficient d'absorption des éprouvettes

### III.11.8. Essais de compression

Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques de 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup>. Les résultats de la résistance à la compression ( $R_f$ ) obtenue après 7 et 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement est une presse hydraulique avec une capacité maximale de compression de 1500 kN, comme illustré sur la photo ci-dessous. La formule suivante est utilisée pour calculer la résistance mécanique en compression :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad ; \text{ avec :}$$

$R_c$  : résistance à la compression (MPa).

$F$  : la charge de rupture (N).

$S$  : section de l'éprouvette ( $\text{mm}^2$ )

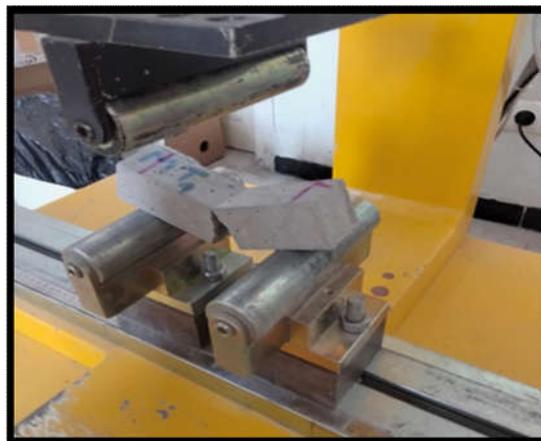


**Figure III.63.** L'essai de compression

### III.11.9. Essai de flexion (EN 196-1) [53]

L'essai de flexion trois points est réalisé sur des échantillons prismatiques de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . La moyenne des résultats sur trois échantillons est utilisée pour calculer la résistance à la traction par traction à 7 et 28 jours. Une presse hydraulique de flexion est utilisée, avec une capacité maximale de 150 kN. La formule suivante est utilisée pour calculer la résistance mécanique en flexion :

$$\sigma_f = \frac{1,5 \cdot l \cdot h}{b^3} \text{ (Mpa)} ; \text{ avec : } l=100 \text{ mm, } b=40\text{mm, } h=40 \text{ mm.}$$



**Figure III.64.** L'essai de flexion

### III.11.10. Les caractéristiques thermiques des mortiers

Le CT METRE, un appareil pratiquement transportable, a été développé dans le but d'évaluer de manière précise les propriétés thermiques de différents matériaux, tels que les briques, les roches, le béton cellulaire, les résines ou les produits complexes, par exemple.



Figure III.65. Le CT METRE

### III.11.11. Détermination de la vitesse de propagation du son (Ultrason)

Les valeurs de la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton léger, mesurées individuellement, sont respectivement de 3 et 3,8 km/s. La présence de bulles d'air dans la matrice amplifie le phénomène. Il est nécessaire que les ondes traversent ces bulles d'air afin de se propager dans la pâte. Cela souligne la capacité à réduire les ondes ultrasonores et à amortir les vibrations, qui sont des caractéristiques d'une isolation phonique efficace.

### III.12. Conclusion

Trois variétés de mortiers ont été étudiées dans cette recherche : le mortier témoin, un mortier léger élaboré à partir de granulats légers, et un mortier cellulaire contenant de la poudre d'alumine. Les matériaux constitutifs, notamment le ciment, le sable, le polystyrène, la poudre d'alumine et le super plastifiant, ont été soumis à des analyses physico-chimiques et mécaniques pour caractérisation. Différentes compositions ont été utilisées pour la fabrication des mortiers cellulaires, avec des concentrations de poudre d'aluminium variant de 2 à 2,8%, ainsi que pour les mortiers à base de granulats légers, où le sable a été substitué par du polystyrène à des taux de 10%, 20%, 30% et 40%. Des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  et  $(10 \times 7 \times 2,5) \text{ cm}^3$  ont été fabriquées et soumises à des tests physico-mécaniques et thermiques. Les résultats de ces tests seront exposés et interprétés dans le chapitre suivant.

## **Chapitre IV**

## IV. Résultat et discussion

### IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer et échanger les résultats des essais de caractérisation physique réalisés sur les matériaux de cette étude (sable, ciment, polystyrène expansé). Ensuite, nous exposerons et analyserons les résultats des essais physiques et mécaniques réalisés sur le mortier témoin et le mortier remplacé.

### IV.2. Résultats de caractérisation physique des matériaux

#### IV.2.1. Sable

##### IV.2.1.1. Masse volumique

Le tableau ci-dessous représente les résultats de la masse volumique du sable utilisé.

**Tableau IV.14.** Résultat Masses volumiques du sable

Granulat	Sable
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>1,54</b>
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	<b>3,00</b>

- **Interprétation**

Les résultats obtenus pour la masse volumique apparente et absolue sont conformes aux normes.

##### IV.2.1.2. Analyse granulométrique

Le Tableau IV.15. Représente les résultats de l'essai de l'analyse granulométrie de sable par tamisage :

**Tableau IV.15.** Résultat de l'essai de l'analyse granulométrie de sable par tamisage

Série de tamis	Refus partielle (g)	Refus partielle (%)	Refus %	Tamis %	MF
5	10	0.5	0,5	99.5	<b>2,33</b>
2	580	29	29,5	70,5	
1	660	33	62,5	37,5	
0.5	410	20,5	83	17	
0.25	270	13,5	96,5	3,5	
0, 125	20	1	97,5	2,5	
0.080	10	0,5	98	2	
fond	20	1	99	1	

La figure IV.1 représenté la courbe granulométrie de sable.

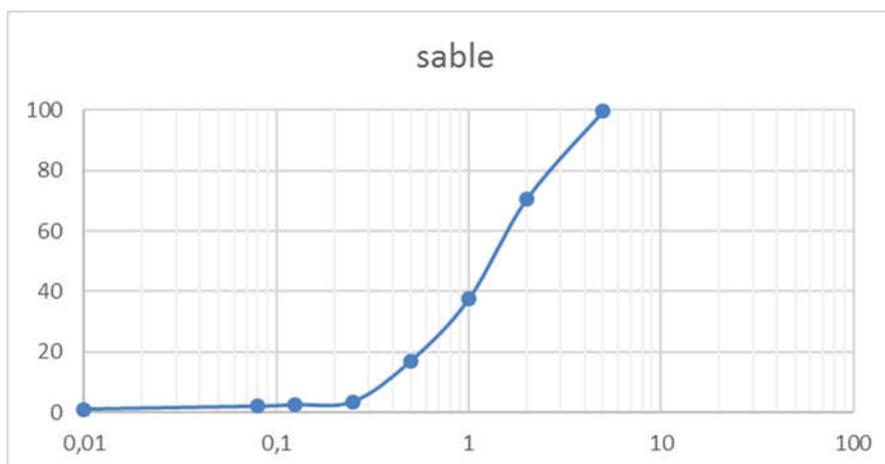


Figure IV. 66. Courbe granulométrie du sable

- **Interprétation**

On remarque que le module de finesse de sable égale  $MF = 2,33$ , Donc : le sable utilisé dans le cadre de notre étude est sable normal.

#### IV.2.1.3. Equivalent de sable

Le tableau IV.16 représente les résultats obtenus pour l'essai d'équivalent de sable :

Tableau IV.16. Résultat de l'essai d'équivalent de sable.

Equivalent de sable		Limite de valeur	Observation
ESV	<b>83 ,48</b>	$75\% < \text{ESV} < 85\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses
ESP	<b>75</b>	$70 \leq \text{ESP} < 80\%$	

- **Interprétation**

D'après les résultats du tableau ci-dessus on remarque que les valeurs de l'équivalent de sable visuel et à piston sont respectivement de 83.48 et 75, par conséquent notre sable est propre à faible proportion de fines argileuse, donc nous pouvons l'utiliser pour des bétons et mortiers de bonne qualité.

#### IV.2.2. Ciment

##### IV.2.2.1. Masse volumique

Le tableau IV.17 représente les résultats de masses volumiques du ciment.

Tableau IV.17. Résultat Masses volumiques du ciment.

Granulat	Ciment
Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	<b>1,11</b>
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	<b>3 ,13</b>

- **Interprétation**

Les résultats obtenus pour la masse volumique apparente et absolue sont conformes aux normes.

#### IV.2.2.2. Consistance du ciment

Le Tableau IV.18. Représente les résultats de l'essai de consistance normale :

**Tableau IV.18.** Résultat de l'essai de consistance normale.

Essai	Résultat	
Consistance normale	E/C = <b>0,23</b>	d = <b>5,5 m m</b>

- **Interprétation**

On remarque que la mesure de l'enfoncement de la sonde qui pénètre dans la pâte d = 5.5 mm, cette valeur est celle que l'on souhaite obtenir car elle correspond la fourchette de  $5 < d < 7$  mm, donc on considère que la consistance de la pâte étudiée est normalisée.

#### IV.2.2.3. L'essai de prise du ciment

Le Tableau IV.19. Représente les résultats de l'essai de prise :

**Tableau IV.19.** Résultat de l'essai de prise.

Délai de prise	Résultat
Temps de début de prise	3h : 15min
Temps de fin de prise	5h :00 min

- **Interprétation**

Selon les résultats, le ciment présente des caractéristiques de prise adaptées à une utilisation courante dans le domaine de la construction, offrant un équilibre satisfaisant entre le temps de manipulation et le temps de durcissement initial.

#### IV.2.2.3. Composition chimique et minéralogique du ciment

Le Tableau IV.20. La composition chimique et minéralogique du ciment CEM II/42,5 est illustrée par : Si le laboratoire de l'université de Bouira ne dispose pas de l'équipement nécessaire pour analyser la chimie du ciment, les données présentées dans le Tableau IV.20 sont fournies par le laboratoire de la cimenterie de SOUR EL GHOZLANE.

**Tableau IV.20.** Composition chimique et minéralogique de ciment utilisée CEM II/42,5

Eliment	Teneur%
SiO <sub>2</sub>	18.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.36
F <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.24
CaO	62.04
MgO	2.28
SO <sub>3</sub>	1.86
K <sub>2</sub> O	0.71
Na <sub>2</sub> O	0.12
CO <sub>2</sub>	5.20
CL	0.004
PF	7.30
CaO <sub>L</sub>	1.42
C <sub>3</sub> S	68.44
C <sub>2</sub> S	0.03
C <sub>3</sub> A	6.07
C <sub>4</sub> AF	9.85

#### IV.2.2.4. La résistance mécanique de ciment :

Le Tableau IV.21. Représente la résistance mécanique de ciment.

**Tableau IV.21.** Evolution de la résistance en compression de ciment utilisée CEM II/42,5

Jours	Résistance à la compression Rc (MPA)
14	33,41
28	35.85

#### IV.2.3. Polystyrène

##### IV.2.3.1. La masse volumique

Le tableau IV.22. Représente les résultats de la masse volumique de polystyrène

**Tableau IV.22.** Résultat de la masse volumique de polystyrène.

Granulat	Polystyrène
Masse volumique apparent (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0,015</b>
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	<b>0,018</b>

- **Interprétation**

Les résultats montrent que le polystyrène a une très faible densité, que ce soit en termes de masse volumique apparente ou absolue, et sont conformes aux normes.

##### IV.2.3.2. Analyse granulométrique

Le tableau IV.23. Représente les résultats de l'analyse granulométrique du polystyrène.

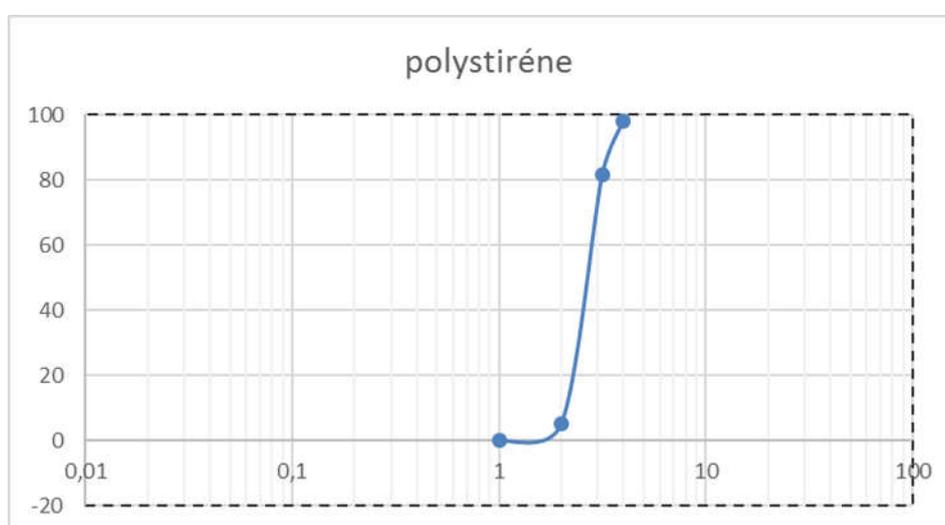
**Tableau IV.23.** Résultats de l'analyse granulométrique du polystyrène.

Série	Refus(g)	Refus cumulée%	Tamis %
4	6	1,71	98,29
3,15	58	16,6	83,4
2	268	81,7	18,3
1	00	00	00

- **Interprétation**

L'analyse granulométrique du polystyrène révèle que le matériau est principalement composé de particules relativement grossières. Les résultats indiquent une répartition granulométrique du polystyrène avec la majorité du matériau (81,7 %) étant retenue par le tamis de 2 mm.

La figure IV.2 représente la courbe granulométrie de polystyrène.



**Figure IV.67.** La granulométrie de polystyrène.

### IV.3. Résultats et analyse relatif au mortier

#### IV.3.1. A l'état frais

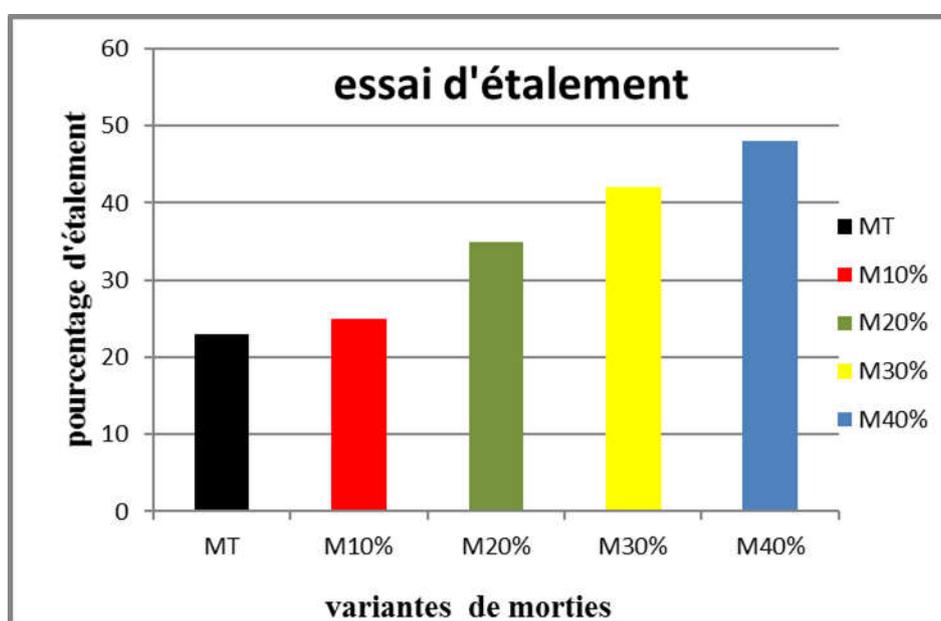
##### IV.3.1.1. La maniabilité

La rhéologie des mortiers à l'état frais, mesurée par l'essai d'étalement, sera présentée pour les deux méthodes de formulation. Le premier indice obtenu lors des essais en laboratoire est d'environ. Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de l'essai de l'étalement.

**Tableau IV.24.** Valeurs mesurées de l'étalement pour le mortier témoin et substituée.

Type de mortier	E/C	Eau	Ciment	E étalement %
MT	0,5	225	450	23
M 10%	0,5	225	450	25
M 20%	0,5	225	450	35
M 30%	0,5	225	450	42
M 40%	0,5	225	450	48

La représentation graphique des données numérique de l'étalement est montrée sur la figure ci-dessous :

**Figure IV.68.** Histogramme valeurs d'étalement (%) pour le mortier.

- **Interprétation des résultats**

L'histogramme montre clairement que l'augmentation du pourcentage de polystyrène dans le mortier entraîne une augmentation progressive du pourcentage d'étalement, indiquant une amélioration de la fluidité ou de la consistance du mortier, cette augmentation est due d'une part à la forme des grains de polystyrène qui est sphérique, c'est-à-dire absence des frottements lors de l'écoulement par conséquent la fluidité du mortier sera améliorée ; d'autre part la substitution de sable par le polystyrène augmente la consistance du mortier parce que les billes de polystyrène possède une absorption d'eau très faible (nature hydrophobe) par rapport au sable.

## IV.3.2.A l'état durci

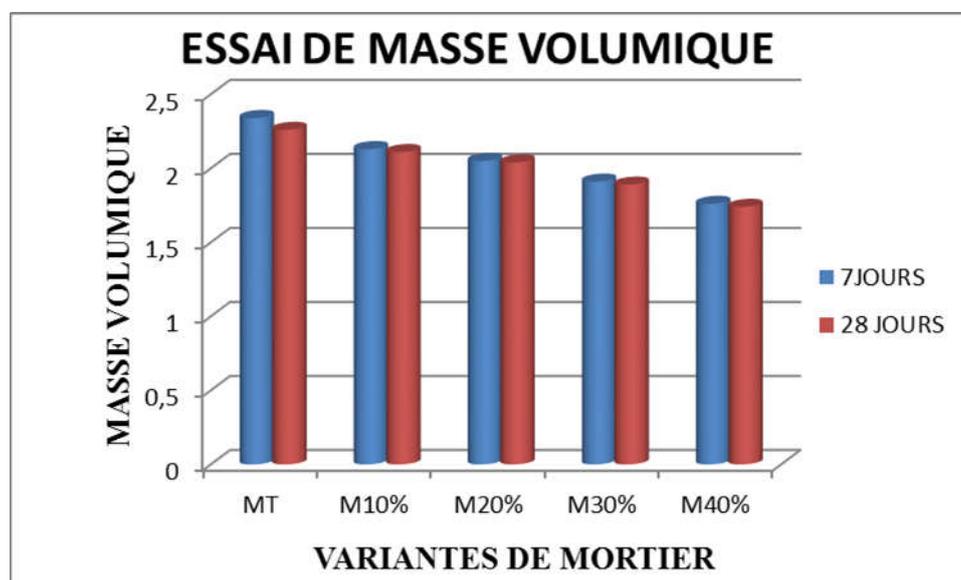
## IV.3.2.1. La masse volumique

Le tableau IV.12 représente les résultats de la Masse volumique d'éprouvette témoin et par substitution de sable par le polystyrène 10%, 20%, 30% et 40 % à 7 et 28 jours.

**Tableau IV.25.** Résultat de la masse volumique d'éprouvette à 7 et 28 jours  
(À base de polystyrène)

Type	L'éprouvette	Masse g		Volume cm <sup>3</sup>	Masse Volumique g/cm <sup>3</sup>	
		7j	28j		7j	28j
MT	4*4*16	599.00	579.8	256	2.34	2.26
M 10 %	4*4*16	545.66	541.73	256	2.13	2.11
M 20 %	4*4*16	526.33	523.1	256	2.05	2.04
M 30 %	4*4*16	490.66	486.3	256	1.91	1.89
M 40 %	4*4*16	451.33	447.00	256	1.76	1.74

La représentation graphique des données numérique de la masse volumique est montrée sur la figure ci-dessous.



**Figure IV.69.** Histogramme des résultats de la masse volumique à 7jrs et 28jrs

- **Interprétation des résultats**

Selon les données de la figure IV.27 il est observé que la masse volumique du mortier léger diminue à 7 jours et 28 jours lorsque le pourcentage de granulats légers (Polystyrène) dans le mortier augmente.

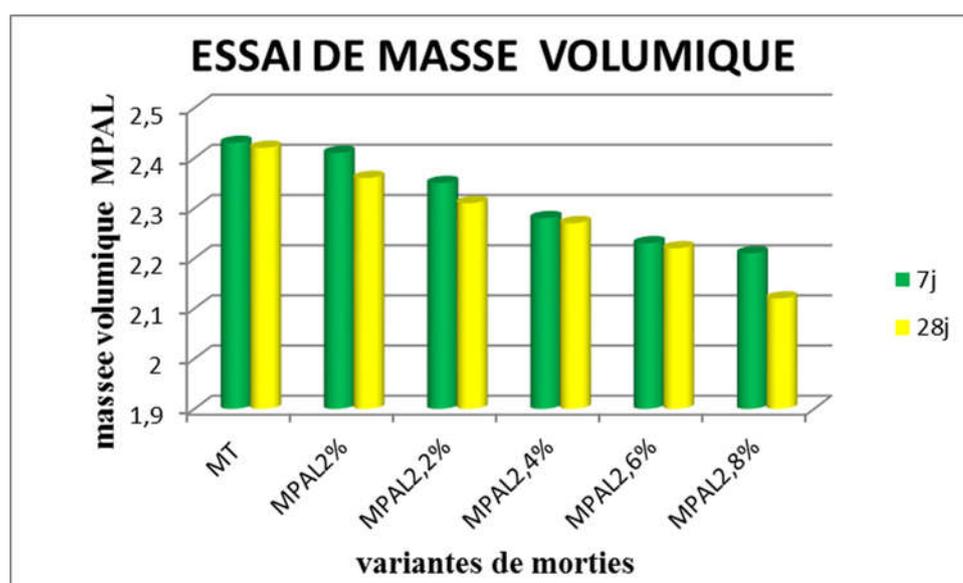
Le mortier ordinaire sans granulat léger présente une masse volumique de  $2,34 \text{ g/cm}^3$ , ce qui est légèrement supérieur à celui du mortier à base de polystyrène ( $1,76$  à  $2,13 \text{ g/cm}^3$ ). On peut expliquer cette réduction de la masse volumique des mortiers allégé grâce à l'ajout de granulat de polystyrène par sa masse volumique inférieure à celle du sable (la substitution de sable par le polystyrène).

Le tableau IV.13 représente les résultats de la Masse volumique d'éprouvette témoin et par taux de la poudre d'aluminium 2%,2.2% ,2.4%,2.6% et 2.8 % à 7 et 28 jours.

**Tableau IV.26.** Résultat de la masse volumique d'éprouvette à 7 et 28 jours (à base de poudre d'aluminium)

Type	L'éprouvette	Masse g		Volume $\text{cm}^3$	Masse Volumique $\text{g/cm}^3$	
		7j	28j		7j	28j
MT	4*4*16	623.4	621.1	256	2.43	2.42
M 2 %	4*4*16	619.00	606.1	256	2.41	2.36
M 2.2 %	4*4*16	603.5	593.7	256	2.35	2.31
M 2.4 %	4*4*16	584.00	582.9	256	2.28	2.27
M 2.6 %	4*4*16	572.67	570.6	256	2.23	2.22
M 2.8%	4*4*16	568.1	545	256	2.21	2.12

La représentation graphique des données numérique de la masse volumique est montrée sur la figure ci-dessous.



**Figure IV.70.** Histogramme des résultats de la masse volumique à 7 et 28j.

- **Interprétation des résultats**

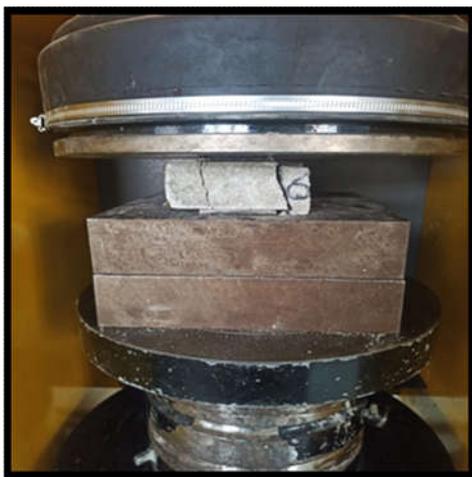
Selon la figure IV.5, il est observé que la masse volumique apparente du matériau à 7 et 28 jours diminue lorsque le taux de la poudre d'aluminium augmente, tandis que les vides générés par l'hydrogène libéré (dégagement de gaz) formation de bulles lors de la réaction de la poudre l'aluminium avec la chaux contribuent efficacement à l'allègement ou bien une réduction de la densité du matériau.

L'équation chimique simplifiée pour cette réaction est la suivante :



#### IV.3.2.2. Résistance à la compression

La résistance à la compression du mortier est généralement considérée comme sa plus importante propriété, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un mortier puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté, elle est estimée soit à court terme ou à long terme. Les valeurs moyennes obtenues sont enregistrées dans le tableau IV.14.

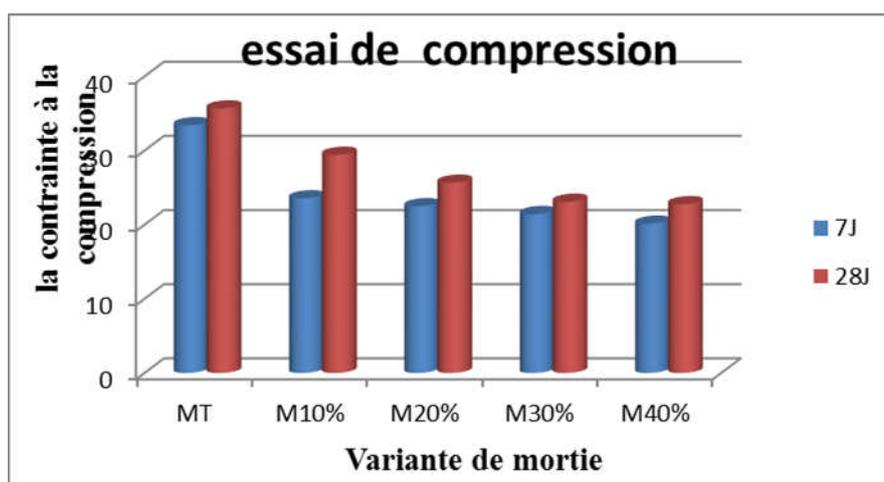


**Figure IV.71.** Ecrasement des éprouvettes demi-prismes

**Tableau IV.27.** Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la compression en fonction du temps de conservation (mortier à base de polystyrène)

Type de mortier	Résistance à la compression MPA			
	07 j		28 j	
	Charge (KN)	La contrainte $R_c$ (MPA)	Charge (KN)	La contrainte $R_c$ (MPA)
MT	53.46	33.41	57.03	35.68
M 10% SUB	37.7	23.56	47.08	29.43
M 20% SUB	35.98	22.49	41.05	25.66
M 30% SUB	34.3	21.43	36.96	23.10
M 40% SUB	32.23	20.14	36.41	22.76

La représentation graphique des données numérique de la résistance à la compression est montrée sur la figure ci-dessous :



**Figure IV.72.** Histogramme des résultats de résistance à la compression.

#### IV.3.2.3. Résistance à la flexion (Traction indirecte)



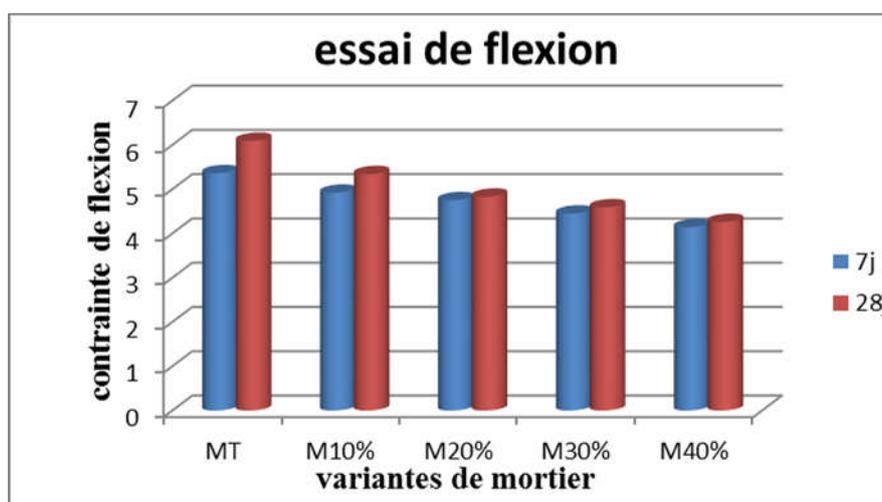
**Figure IV.73.** Ecrasement des éprouvettes prismatiques

Les valeurs moyennes obtenues peuvent être enregistrées dans le tableau VI.15.

**Tableau IV.28.** Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la flexion en fonction du temps de conservation (mortier à base de polystyrène)

Type de mortier	Résistance à la flexion MPA			
	07 j		28 j	
	Charge KN	La contrainte R <sub>c</sub> MPA	Charge KN	La contrainte R <sub>c</sub> MPA
MT	2.29	5.36	2.60	6.09
M 10% SUB	2.10	4.92	2.28	5.34
M 20% SUB	2.03	4.75	2.06	4.83
M 30% SUB	1.90	4.45	1.96	4.59
M 40% SUB	1.77	4.14	1.82	4.26

La représentation graphique des données numérique de la résistance à la flexion est montrée sur la figure ci-dessous :



**Figure IV.74.** Histogramme des résultats de résistance à la flexion

- **Interprétation des résultats**

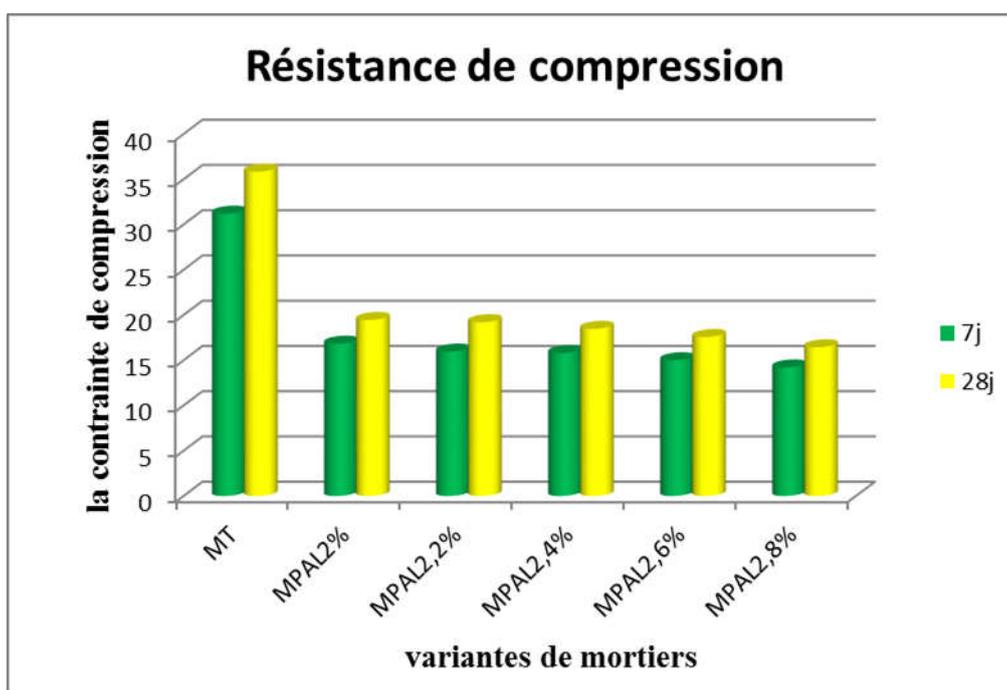
Selon les résultats des figures IV.31 de la résistance mécanique à la compression et à la flexion des mortiers légers à 7 et 28 jours diminue lorsque le pourcentage de granulat léger (polystyrène) dans le mortier augmente (une augmentation significative de la légèreté lorsque la quantité de polystyrène dans le mélange est élevée).

La composition M 40% offre les résistances les plus basses, où le sable est remplacé par 40% de polystyrène. On peut expliquer cette baisse par la faible dureté du granulat de polystyrène par rapport au sable.

**Tableau IV.29.** Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la compression en fonction du temps de conservation (mortier à base de poudre d'aluminium)

Type de mortier	Résistance à la compression MPA			
	07 j		28 j	
	Charge KN	La contrainte R <sub>c</sub> MPA	Charge KN	La contrainte R <sub>c</sub> MPA
MT	49.9	31.20	57.36	35.85
M 2%	26.93	16.83	31.13	19.45
M 2.2%	25.33	15.95	30.73	19.20
M 2.4%	25.26	15.79	29.56	18.47
M 2.6%	24.00	15.00	28.1	17.56
M 2.8 %	23.23	14.20	26.3	16.43

La représentation graphique des données numérique de la résistance à la compression est montrée sur la figure ci-dessous :

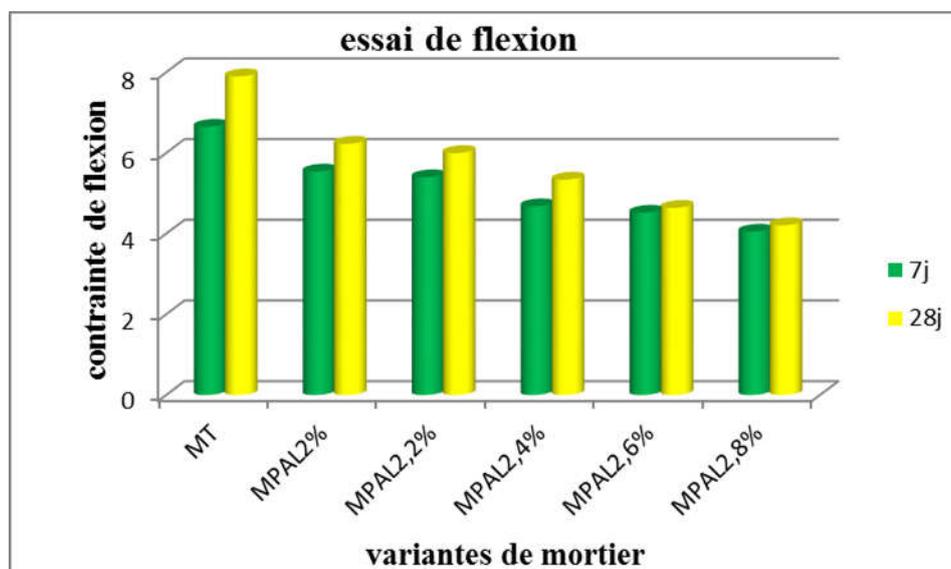


**Figure IV.75.** Histogramme des résultats de résistance à la compression

**Tableau IV.30.** Evolution de la valeur moyenne de la résistance à la flexion en fonction du temps de conservation (mortier à base de poudre d'aluminium)

Type de mortier	Résistance à la flexion MPA			
	07 j		28 j	
	Charge KN	La contrainte R <sub>c</sub> MPA	Charge KN	La contrainte R <sub>c</sub> MPA
MT	2.80	6.65	3.36	7.90
M 2%	2.36	5.54	2.66	6.23
M 2.2%	2.30	5.40	2.56	6.00
M 2.4%	2.00	4.68	2.28	5.34
M 2.6%	1.93	4.52	1.98	4.64
M 2.8 %	1.73	4.05	1.8	4.21

La représentation graphique des données numérique de la résistance à la flexion est montrée sur la figure ci-dessous :



**Figure IV.76.** Histogramme des résultats de résistance à la flexion

- **Interprétation des résultats**

D'après les Figures IV.33 les données sur la résistance mécanique à la compression et à la flexion obtenues pendant les périodes de 7 et 28 jours indiquent que lorsque la quantité de poudre d'aluminium est augmentée dans un mortier ou un béton léger, cela entraîne une augmentation des pores (développement de la porosité), ce qui réduit la densité et affaiblit la microstructure du support ou le matériau. La résistance mécanique à la compression et à la flexion diminue à court terme (7 jours) et à long terme (28 jours).

#### IV.3.2.4. Gonflement des éprouvettes de mortier de la poudre d'aluminium

Le phénomène de gonflement des éprouvettes de mortier contenant de la poudre d'aluminium lors du moulage et après démoulage est dû à la réaction chimique entre l'aluminium et la chaux (hydroxyde de calcium) en présence d'eau.

**Au moment de moulage :** lorsque la poudre d'aluminium est mélangée avec le mortier (chaux et eau), une réaction chimique entre l'aluminium et l'hydroxyde de calcium en présence d'eau produit l'hydrogène gazeux. Cette dernière forme des bulles d'air dans le mortier. Ces bulles provoquent une expansion du volume de mortier ce qui se manifeste par un gonflement visible. Ce gonflement est dû à l'augmentation de la quantité de gaz hydrogène piégé dans la structure du mortier. C'est ce qu'on appelle l'expansion volumétrique.

**Après démoulage :** Le volume du mortier commence à se stabiliser, car la production de gaz diminue et s'arrête. Le mortier continue à se durcir et à se consolider après le démoulage. Il peut encore présenter des signes de gonflement car les bulles de gaz formées pendant la réaction sont retenues dans la structure, créant ainsi des pores ou des cavités.

Il est possible d'observer une expansion résiduelle lorsque des réactions chimiques mineures se poursuivent ou lorsque le matériau absorbe de l'humidité supplémentaire.



Figure IV.77. Figure après gonflement des éprouvettes

#### IV.3.2.5. La conductivité thermique

Dans le cadre de notre étude, la conductivité thermique ( $\lambda$ ) est calculée d'une manière indirecte. Cependant, nous avons mesuré l'effusivité thermique ( $e$ ) expérimentalement en utilisant le Citimetre et par la suite la conductivité thermique est calculée théoriquement en utilisant la relation qui relie la conductivité thermique ( $\lambda$ ) avec l'effusivité thermique ( $e$ ), la densité ( $\rho$ ) et la capacité thermique massique ( $cp$ ), comme indiqué dans la relation suivante :

$$E = \sqrt{\lambda \rho cp}$$

En réorganisant cette formule, nous obtenons :

$$\lambda = \frac{e^2}{\rho \cdot c \cdot P}$$

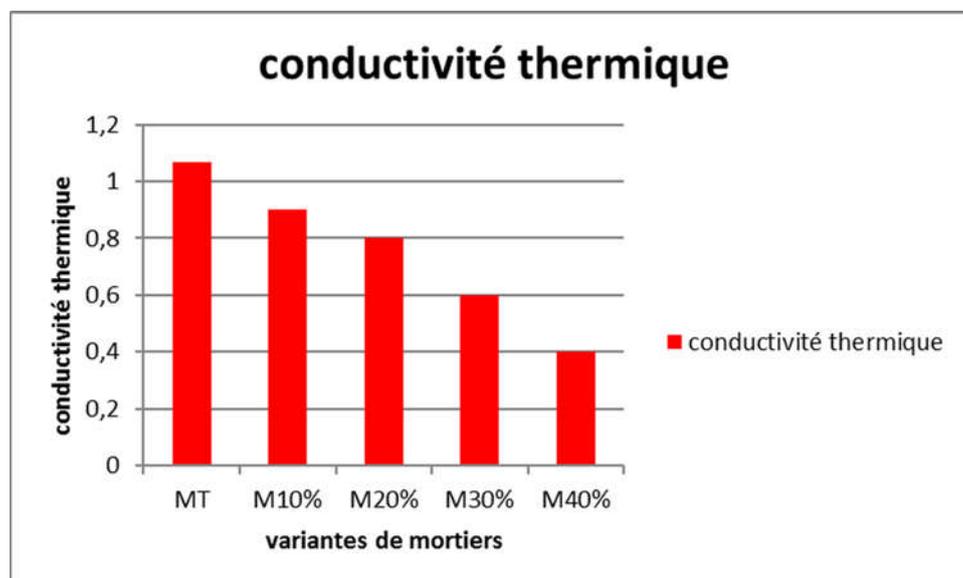
Sachant que l'effusivité thermique est proportionnelle à la racine carrée de la conductivité thermique ( $\lambda$ ), une diminution de l'effusivité thermique implique une diminution de la conductivité thermique.

Les tableaux IV.18 et IV.19 représentent les valeurs moyennes des conductivités thermiques  $\lambda$  à l'état sec des bétons cellulaires pour différentes teneurs en agent expansif et du béton léger à base des différents pourcentages de polystyrène.

**Tableau IV.31.** Résultats de conductivité thermique (mortier à base de polystyrène)

Types de mortiers	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Effusivité thermique J/k.m. s <sup>1/2</sup>	Conductivité thermique (w /m.k)
Mortier témoin	2370	4970	1.07
Mortier avec 10% PSE	2210	1515	0.9
Mortier avec 20% PSE	2090	1441	0.8
Mortier avec 30% PSE	2070	1280	0.6
Mortier avec 40% PSE	1830	985	0.4

Les résultats des essais de la conductivité thermique sont présentés sur la figure ci-dessous :

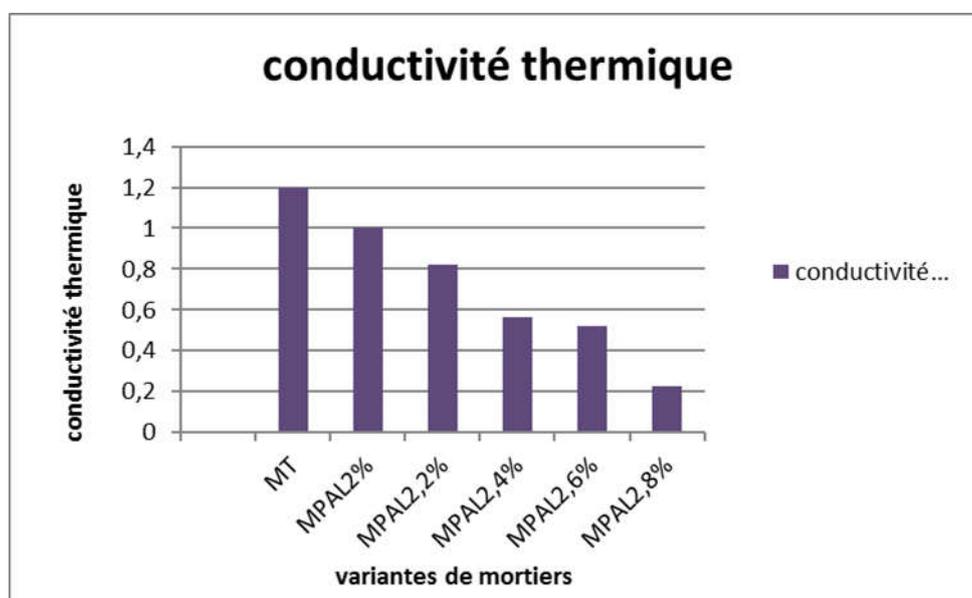


**Figure IV.78.** Histogramme des résultats de la conductivité thermique (mortier PSE)

**Tableau IV.32.** Résultats de conductivité thermique (mortier de la poudre d'aluminium)

Types de mortiers	Masse volumique Kg/m <sup>3</sup>	Effusivité thermique J/k.m. s <sup>1/2</sup>	Conductivité thermique (w /m.k)
Mortier témoin	2370	1600	1.2
Mortier PAL 2%	2330	1450	1.0
Mortier PAL 2.2%	1310	1306	0.823
Mortier PAL 2.4%	2280	1075	0.565
Mortier PAL 2.6%	2260	1028	0.521
Mortier PAL 2.8%	2250	678	0.227

Les résultats des essais de la conductivité thermique sont présentés sur la l'histogramme ci-dessous :

**Figure IV.79.** Histogramme des résultats de la conductivité thermique (mortier PAL)

- **Interprétation des résultats**

D'après les résultats des essais thermiques, il est observé que la conductivité thermique «  $\lambda$  » diminue avec l'augmentation du dosage en poudre d'aluminium et du pourcentage de polystyrène.

- Pour les mortiers cellulaires, la réduction de la conductivité thermique est attribuée à la porosité accrue de ses mortiers provoquée par réaction chimique entre la poudre d'aluminium et l'hydroxyde de calcium en présence d'eau produisant l'hydrogène gazeux.

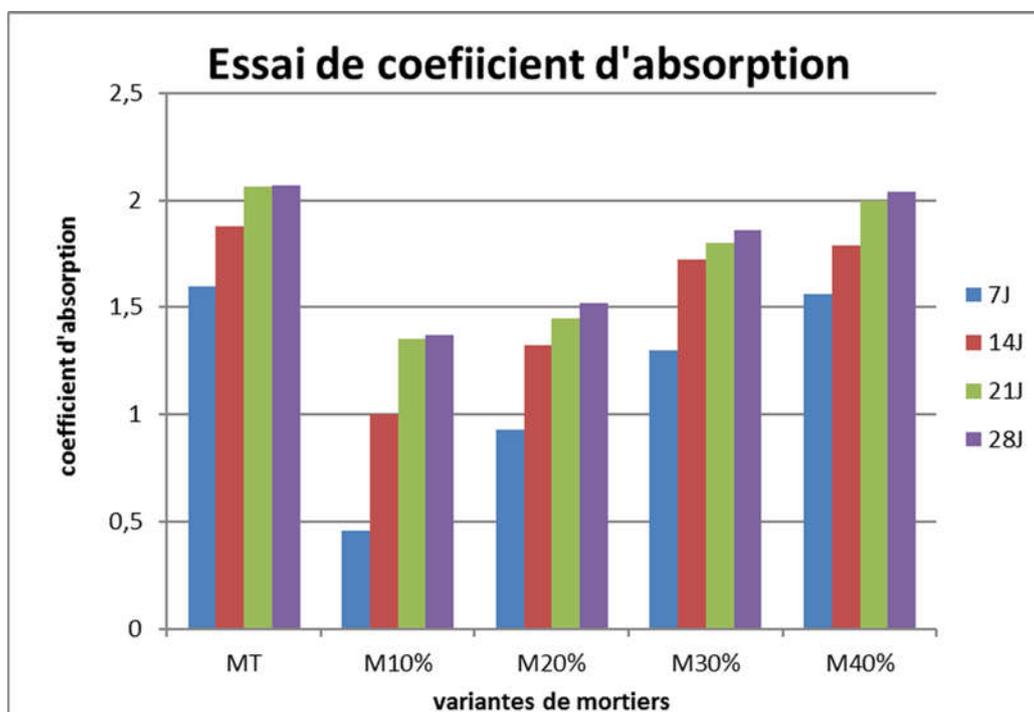
- Pour le mortier léger à base de polystyrène, cette diminution de la conductivité thermique s'explique par la grande quantité d'air présente dans la structure du polystyrène, l'air étant un excellent isolant thermique par rapport aux solides. De plus, un matériau de moindre densité possède généralement une conductivité thermique plus faible.

#### IV.3.2.6. Coefficient d'absorption d'eau

Le Tableau IV.20 représente les résultats de l'essai du coefficient d'absorption de l'échantillon (à base de polystyrène).

**Tableau IV.33.** Résultat de l'essai de coefficient d'absorption de l'échantillon (à base de polystyrène).

Type	Coefficients Ab %			
	7J	14 J	21 J	28 J
MT	1.60	1.88	2.06	2.07
M 10 %	0.46	1.00	1.35	1.37
M 20 %	0.93	1.32	1.45	1.52
M 30 %	1.30	1.72	2.03	2.05
M 40 %	1.56	1.79	2.04	2.06



**Figure IV.80.** Histogramme des résultats de coefficient d'absorption.

- **Interprétation**

Le mortier traditionnel a un coefficient d'absorption relativement constant et élevé, tandis que les variantes avec du polystyrène montrent des variations significatives en fonction de la quantité ajoutée.

C'est –à-dire l'ajout de polystyrène au mortier peut initialement réduire l'absorption d'eau, mais des concentrations plus élevées peuvent inverser cet effet.

Le mortier avec 10% de polystyrène montre le meilleur comportement en termes de réduction de l'absorption d'eau, tandis que des concentrations plus élevées de polystyrène augmentent l'absorption, indiquant une augmentation de la porosité.

L'augmentation du coefficient d'absorption d'eau d'un mortier léger à base de polystyrène sur des périodes de 7, 14, 21 et 28 jours, avec des pourcentages de polystyrène variés entre 10 % à 40 %, est principalement due à l'augmentation de la porosité et de la connectivité des pores.

La nature hydrophobe du polystyrène est compensée par la structure poreuse du mortier, permettant une absorption progressive de l'eau jusqu'à la saturation. Plus la teneur en polystyrène est élevée, plus la porosité est grande, ce qui entraîne une absorption d'eau plus importante en fonction de l'âge d'immersion dans l'eau.

Le tableau IV.34 représente les résultats de l'essai de coefficient d'absorption de l'échantillon (à base de la poudre d'aluminium).

**Tableau IV.34.** Résultat de l'essai de coefficient d'absorption de l'échantillon (à base de poudre d'aluminium).

Type	Coefficients Ab %			
	7J	14 J	21 J	28 J
MT	1.83	2.15	2.32	2.43
M 2 %	6.79	7.40	7.46	7.89
M 2.2 %	6.65	6.90	7.11	7.35
M 2.4 %	5.94	6.20	6.39	6.50
M 2.6 %	5.92	6.18	6.35	6.46
M 2.8 %	5.90	6.13	6.32	6.39

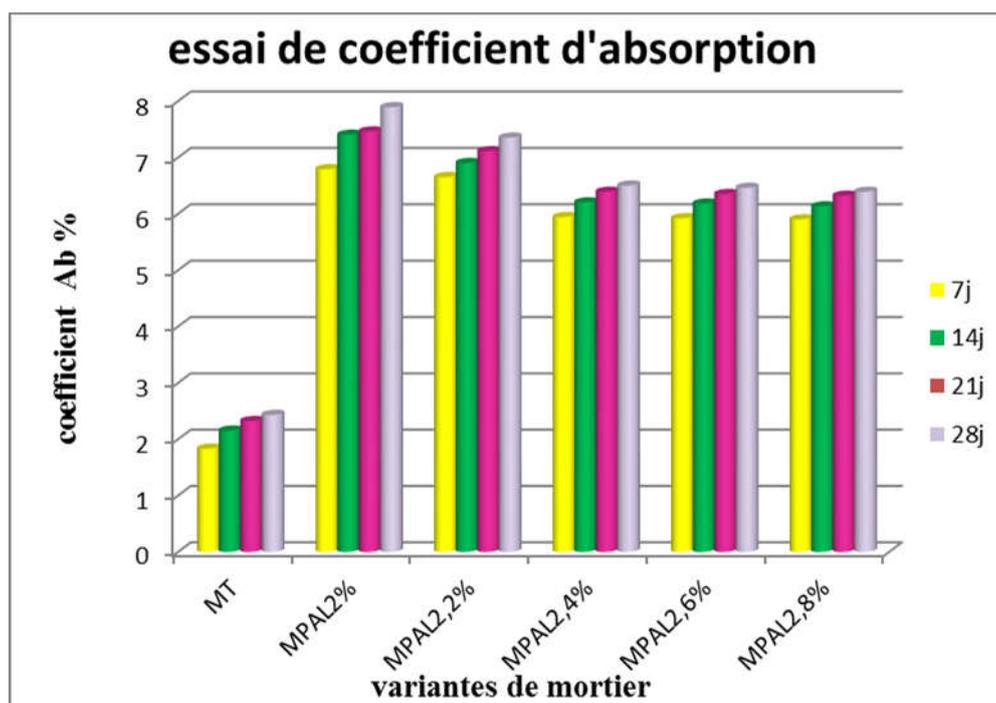


Figure IV.81. Histogramme des résultats de coefficient d'absorption.

- **Interprétation des résultats**

Le mortier témoin a un coefficient d'absorption relativement constant et élevé, tandis que les mortiers légers présentent des coefficients d'absorptions différents.

- Pour les variantes avec du polystyrène montrent des variations significatives en fonction de la quantité de polystyrène ajoutée. C'est –à-dire l'ajout de polystyrène au mortier peut initialement réduire l'absorption d'eau, mais des concentrations plus élevées peuvent inverser cet effet. Le mortier avec 10% de polystyrène montre le meilleur comportement en termes de réduction de l'absorption d'eau, tandis que des concentrations plus élevées de polystyrène augmentent l'absorption, indiquant une augmentation de la porosité. L'augmentation du coefficient d'absorption d'eau d'un mortier léger à base de polystyrène sur des périodes de 7, 14, 21 et 28 jours, avec des pourcentages de polystyrène variés entre 10 % à 40 %, est principalement due à l'augmentation de la porosité et de la connectivité des pores. La nature hydrophobe du polystyrène est compensée par la structure poreuse du mortier, permettant une absorption progressive de l'eau jusqu'à la saturation. Plus la teneur en polystyrène est élevée, plus la porosité est grande, ce qui entraîne une absorption d'eau plus importante en fonction de l'âge d'immersion dans l'eau.
- Pour les variantes avec MPAL montrent une plus grande capacité d'absorption, avec des variations mineures entre elles.

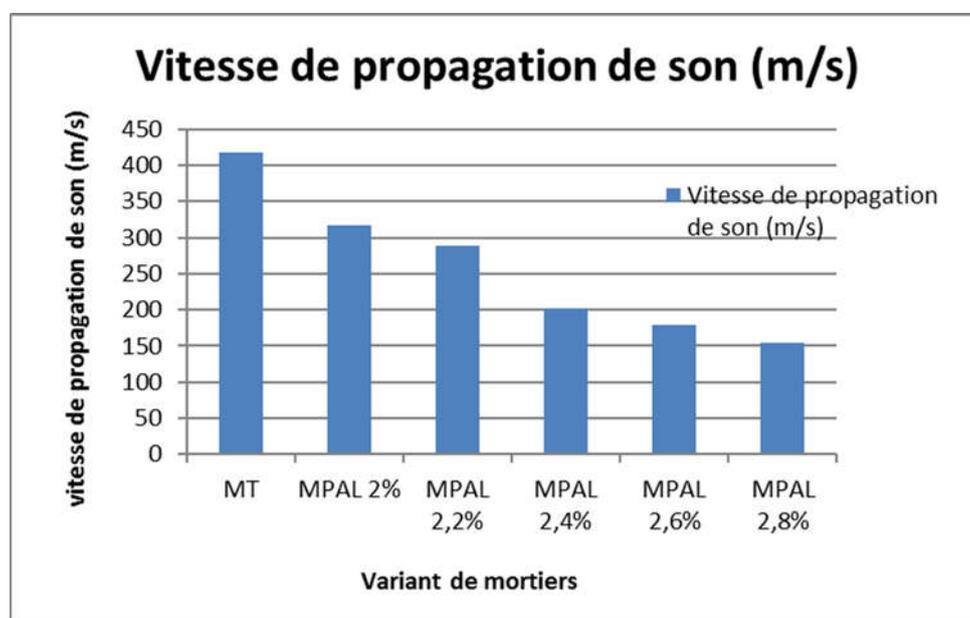
C'est-à-dire les mortiers avec des pourcentages croissants de MPAL (de 2 % à 2,8 %) montrent des coefficients d'absorption initiaux élevés, mais la différence entre les pourcentages n'est pas très marquée. Ils ont tous des coefficients d'absorption plus élevés que le mortier traditionnel, ce qui pourrait indiquer une plus grande porosité ou une formulation qui favorise une plus grande absorption d'eau.

#### IV.3.2.7. La vitesse de propagation du son (Ultrason)

Nous avons effectué des tests sur trois échantillons dans chaque formulation et nous exposons les valeurs moyennes dans le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.35.** Résultat de l'essai de l'ultrason de l'échantillon (à base de poudre d'aluminium) après 28 j.

Type de mortier	Vitesse de propagation de son (m/s)
Mortier témoin	418
Mortier PAL 2 %	316.66
Mortier PAL 2.2 %	288
Mortier PAL 2.4 %	201.33
Mortier PAL 2.6 %	78.66
Mortier PAL 2.8 %	153.66



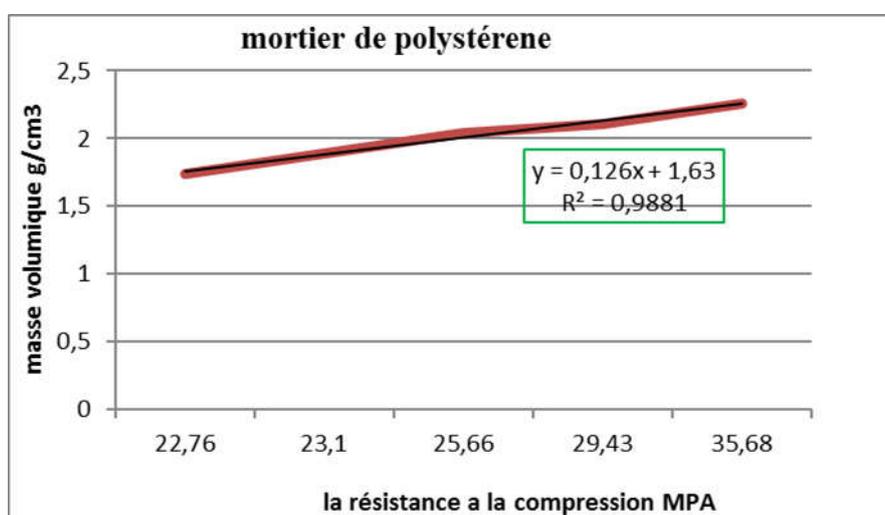
**Figure IV.82.** Histogramme de vitesse de propagation de son

- **Interprétation**

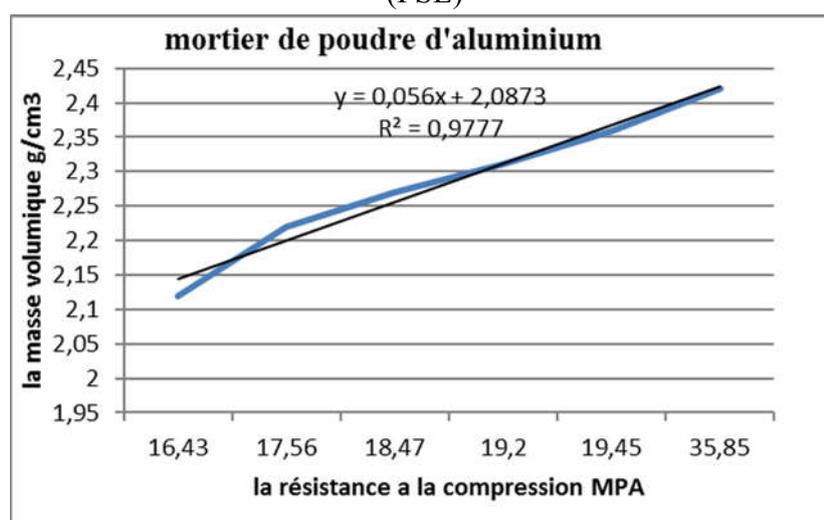
Les valeurs de propagation du son diminuent avec l'augmentation du pourcentage de poudre d'aluminium, cela indique que le matériau devient plus poreux, ce qui est cohérent avec l'effet attendu de l'ajout de poudre d'aluminium. Les pores créent des interfaces supplémentaires qui dispersent et atténuent les ondes sonores. Une diminution de la vitesse de propagation du son est la conséquence d'une augmentation de la porosité, un mortier poreux pourrait offrir une meilleure isolation acoustique et thermique.

#### IV.3.2.8. La variation de masse volumique en fonction de la résistance à la compression

La figure suivante représente la variation de la masse volumique en fonction de la résistance à la compression



**Figure IV.83.** La variation de masse volumique en fonction de la résistance à la compression (PSE)



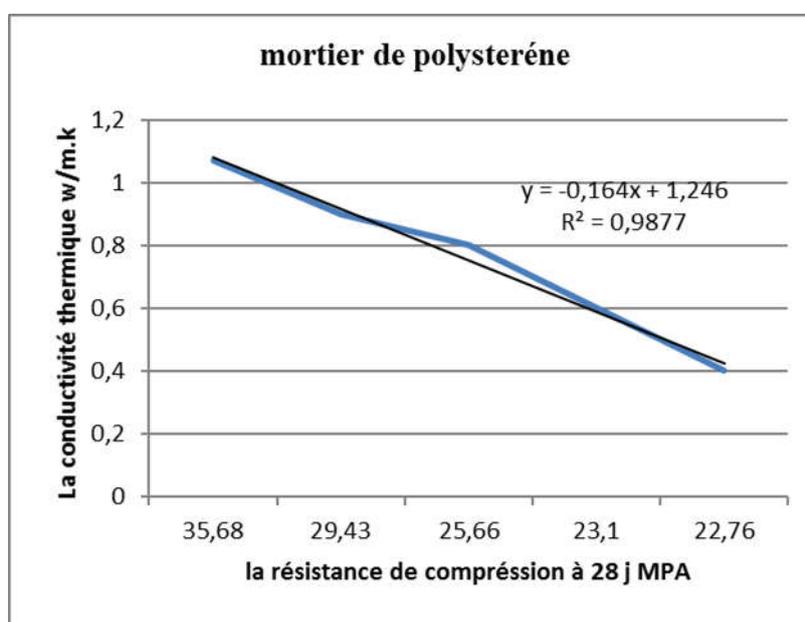
**Figure IV.84.** La variation de masse volumique en fonction de la résistance à la compression (PAL)

- **Interprétation des résultats**

La courbe montre une tendance ascendante, indiquant que la masse volumique du mortier de polystyrène augmente avec l'augmentation de la résistance à la compression. Plus précisément, lorsque la résistance à la compression augmente de 22,76 MPa à 35,68 MPa, la masse volumique passe d'environ 1,5 g/cm<sup>3</sup> à 2,3 g/cm<sup>3</sup>. Il existe une relation positive entre la résistance à la compression et la masse volumique pour le mortier de polystyrène. Cela signifie que plus le matériau est dense, plus il a tendance à être résistant à la compression. Également pour la courbe de mortier de la poudre d'aluminium.

#### IV.3.2.9. La variation de la résistance à la compression après 28 j en fonction de la conductivité thermique

La figure suivante représente la variation de la résistance à la compression après 28 j en fonction de la conductivité thermique.



**Figure IV.85.** La variation de la résistance à la compression après 28 j en fonction de la conductivité thermique

- **Interprétation**

La courbe montre une tendance générale à la baisse et une tendance décroissante de la conductivité thermique à mesure que la résistance à la compression diminue. Cela signifie qu'à des résistances de compression plus faibles, le mortier de polystyrène devient moins conducteur thermiquement donc il existe une corrélation entre la réduction de la résistance à la compression et l'amélioration de l'isolation thermique

Un mortier témoin avec une résistance à la compression plus élevée semble être un meilleur conducteur thermique.

Inversement, un mortier de différents pourcentages de polystyrène avec une résistance à la compression plus faible offre une meilleure isolation thermique (conductivité thermique plus faible).

#### IV.3.2.10. La variation de la masse volumique après 28 j en fonction de la conductivité thermique

La figure suivante représente la variation de la masse volumique en fonction de la conductivité thermique.

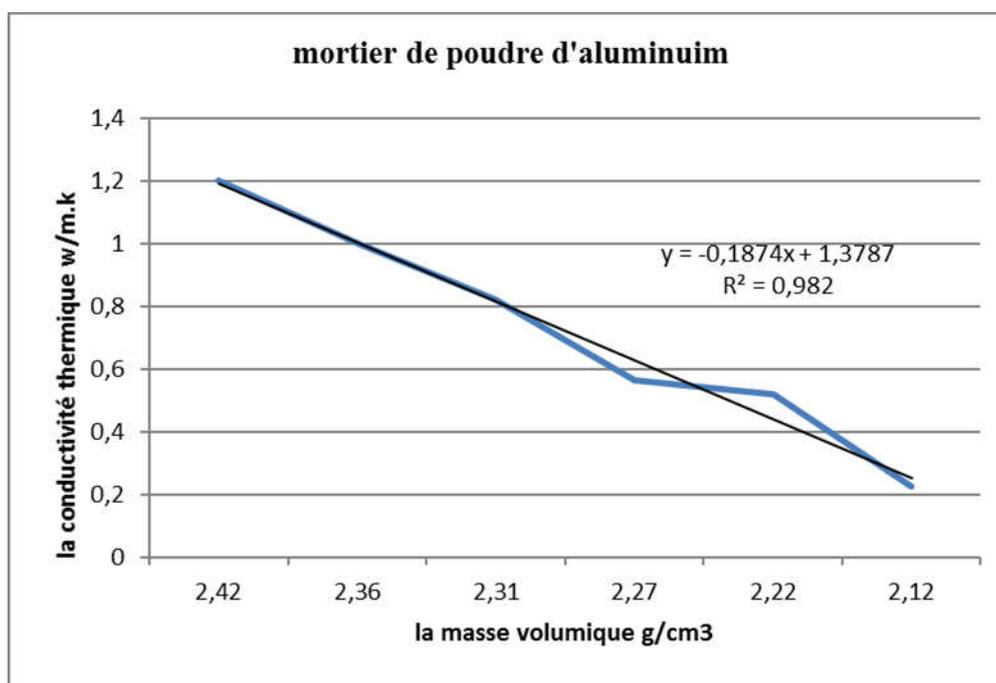


Figure IV.86. La variation de la masse volumique en fonction de la conductivité thermique

- **Interprétation**

La courbe montre une tendance générale à la baisse, indiquant qu'il existe une corrélation entre la réduction de la masse volumique et l'amélioration de l'isolation thermique.

On observe une diminution de la conductivité thermique à mesure que la masse volumique diminue. Cela signifie que les échantillons de mortier de poudre d'aluminium qui sont moins denses ont une meilleure isolation thermique (plus faible conductivité thermique).

#### IV.3. Conclusion

Les différentes expériences menées sur les mortiers durcis ont été exposées dans ce chapitre, ainsi que les résultats d'une étude expérimentale sur les formulations de mortiers légers à base de polystyrène et de poudre d'aluminium.

Selon les résultats obtenus lors des tests de masse volumique, d'absorption et de flexion et de compression, l'augmentation du taux de deux types de granulats légers (granulats de polystyrène) dans le mortier entraîne une réduction des caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers allégés. Pour un pourcentage de substitution de sable par les granulats léger (polystyrène) de 10 à 20 %, les résultats sont acceptables par contre pour un dosage supérieur à 30% on remarque une chute rapide des caractéristiques physico-mécaniques. Même chose a été observée pour les mortiers à base de la poudre d'aluminium de 2 à 2.2%, cependant les résultats restent acceptables par rapport aux exigences des normes.

Les meilleurs résultats obtenus pour les propriétés physiques, mécaniques et thermiques pour les deux types de mortier peuvent être résumer comme suit :

- **La masse volumique :** le mortier substitué à 40 % de polystyrène c'est lui qui nous a donné la valeur la plus faible à 7j et 28 j qui sont respectivement **1.76 -1.74 g/cm<sup>3</sup>** et le mortier contenant du 2.8 % de la poudre d'aluminium c'est lui qui nous a donné la valeur la plus faible à 7j et 28 j qui respectivement **2.21-2.12 g/cm<sup>3</sup>** ;
- **La résistance à la compression :** les mortiers substitués à 10 et 20 % de polystyrène ce sont ceux qui ont une résistance à 28 j la plus élevée par rapport aux autres variantes avec les valeurs suivantes **29.43 et 25.66 MPa**, également pour les mortiers contenant du 2 et 2.2 % de la poudre d'aluminium les résistances à la compression à 28 j sont respectivement **19.45 et 19.20 MPa** ;
- **La conductivité thermique :** le mortier substitué à 40 % de polystyrène nous a donné la plus faible valeur de conductivité thermique qui est  **$\lambda = 0.4 \text{ w /m.k}$** . Le mortier contenant du 2.8 % de la poudre d'aluminium nous a donné la plus faible valeur de  **$\lambda = 0.227 \text{ w /m.k}$**  par rapport aux autres mortiers, donc c'est le meilleur mortier en terme d'isolation thermique.

## **Conclusion Générale**

### Conclusion générale

Cette étude est basée sur l'élaboration et la caractérisation physico-mécaniques et thermiques de mortiers légers à base de granulats légers comme le polystyrène expansé et de mortiers cellulaires utilisant de la poudre d'aluminium. Ces matériaux représentent des avancées significatives dans le domaine des matériaux de construction.

Les meilleurs résultats obtenus pour les propriétés physiques, mécaniques et thermiques pour les deux types de mortier peuvent être résumer comme suit :

- **La masse volumique :** le mortier substitué à 40 % de polystyrène c'est lui qui nous a donné la valeur la plus faible à 7j et 28 j qui sont respectivement **1.76 -1.74 g/cm<sup>3</sup>** et le mortier contenant du 2.8 % de la poudre d'aluminium c'est lui qui nous a donné la valeur la plus faible à 7j et 28 j qui respectivement **2.21-2.12 g/cm<sup>3</sup>** ;
- **La résistance à la compression :** les mortiers substitués à 10 et 20 % de polystyrène ce sont ceux qui ont une résistance à 28 j la plus élevée par rapport aux autres variantes avec les valeurs suivantes **29.43 et 25.66 MPa**, également pour les mortiers contenant du 2 et 2.2 % de la poudre d'aluminium les résistances à la compression à 28 j sont respectivement **19.45 et 19.20 MPa** ;
- **La conductivité thermique :** le mortier substitué à 40 % de polystyrène nous a donné la plus faible valeur de conductivité thermique qui est  **$\lambda = 0.4 \text{ w /m.k}$** . Le mortier contenant du 2.8 % de la poudre d'aluminium nous a donné la plus faible valeur de  **$\lambda = 0.227 \text{ w /m.k}$**  par rapport aux autres mortiers, donc c'est le meilleur mortier en terme d'isolation thermique.

Les conclusions que nous avons tirées de notre étude expérimentale sont les suivantes :

- ❖ Le polystyrène expansé, utilisé comme granulat léger, confère au mortier une densité réduite et de bonnes propriétés isolantes. En garantissant une certaine solidité mécanique. Les propriétés physico-mécaniques de ce type de mortier comprennent une facilité d'utilisation, une conductivité thermique faible et une résistance à la compression appropriée pour des applications non structurelles.
- ❖ D'autre part, le mortier cellulaire à base de poudre d'aluminium utilise la réaction chimique entre la poudre d'aluminium, la chaux et l'eau pour générer des bulles d'hydrogène, créant ainsi une structure alvéolaire. Cette structure alvéolaire confère au matériau une densité très faible et une excellente isolation thermique, malgré une diminution de la résistance mécanique, mais ce dernier reste acceptable par rapport aux exigences des normes en vigueur.

- ❖ L'augmentation du dosage en poudre d'aluminium entraîne une augmentation de la porosité, ce qui rend ce mortier plus isolant thermiquement.

### **Les perspectives :**

- ❖ Il est intéressant d'examiner l'isolation thermique et acoustique de ces types de mortiers, ce qui nécessite de compléter cette étude en effectuant des tests de conductivité thermique directe et d'isolation acoustique.
- ❖ Les mortiers légers doivent être caractérisés à l'aide d'essais de DRX et de microscope électrique à balayage (MEB).

## **Références bibliographiques**

### Références bibliographiques

- [1] G.G. Amoroso, D. Bacatselos, Recherche d'un béton léger à base de polystyrène expansé facile à mettre en œuvre, *Materials and Structures*, Volume : 12, Issue : 71, 1979. Pages : 385 – 392.
- [2] Gllaoui B., Cours de bétons innovants 2, deuxième année master matériaux en Génie Civil disponible à l'adresse : « [elearning-facst.univ-bouira.dz](http://elearning-facst.univ-bouira.dz) », université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, consulté en ligne le 05/03/2024.
- [3] Maçonnerie-façades/ciment-chaux-sable-graviers-et-granulats légers-liants, disponible à l'adresse URL : <https://www.systemed.fr/5846.html>, consulté en ligne le 17/03/2024.
- [4] Boutouata Sabrina et Haouam Chaima, Etude de l'influence des ajouts des adjuvants et le mode de séchage sur la résistance du béton, Mémoire de master université de Tébessa ,2020.
- [5] KodurV.K.R, Tenue au feu des éléments de structure en béton haute résistance, *Solution constructive* ; no. 31, 1999. DOI : <https://doi.org/10.4224/40002912>
- [6] Mohellebi Samira née Bouaziz, Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hydro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites. Thèse de Doctorat de l'université de Tizi-Ouzou, 2014.
- [7] M. Berredjem Layachi, Cours de Technologie des Matériaux de Construction 1, disponible à l'adresse :« [elearning-facst.univ-annaba.dz](http://elearning-facst.univ-annaba.dz) » université Badji Mokhtar de Annaba, consulté en ligne le 27/05/2024.
- [8] Yahiaoui Khalil, Sadki Mohamed, Propriétés de mortier auto plaçant à base de différents types du sable, Mémoire de Master, Université de Djelfa, 2017.
- [9] Philippe Souchu, le sable pour la construction, disponible à l'adresse URL : <http://doc.lerm.fr/>, consulté en ligne le 20/03/2024.
- [10] Nour Linda, Etude de comportement d'un mortier adjuvanté à base de sable préparé, Mémoire de Master, Université de Msila, 2019.
- [11] Naamaoui née Haddadou Naima, Elaboration et caractérisation de béton auto plaçant fibré avec ajout de poudre de marbre, Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, 2015.
- [12] Saidi Khadidja, Etude d'un mortier au laitier granulé renforcé par des fibres de jute, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf de Msila, 2017.
- [13] Sibasyliainbeavogui, les mortiers, disponible à l'adresse URL :<https://www.academia.edu/33383678/>, consultée en ligne le 02/04/2024.
- [14] Bruno Yvan, Mortier de maçonnerie, publié en ligne le lundi 27 mars 2017, disponible à l'adresse URL : <https://maconnerie.bilp.fr/guide-general/ouvrage/element/mortier>, consultée en ligne le 14/04/2024.
- [15] MAANSER Roumaissa « Valorisation du liège expansé dans la composition des « mortiers » mémoire master, Université Biskra ,2020.
- [16] Bouali Khaled, Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de brique réfractaires, Thèse de doctorat, Université de Boumerdes, 2015.
- [17] Benali Redha, Etude du comportement mécanique et rhéologique de la pâte du ciment, mortier et béton avec différentes fibres. Mémoire de Master, Université Mohamed khaidar de Biskra, 2010.

- [18] Le Hung Nguyen, Béton de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique. Thèse de Doctorat, Université Cergy-Pontoise, 2013.
- [19] Chabane Sari, Amel-zoulikha, Classification d'une variété de matériaux dans l'amélioration de l'isolation thermique d'un bâtiment, disponible à l'adresse URL: <http://hdl.handle.net/stdbumam/356>, consultée en ligne le 12/05/2024.
- [20] Christian R et Roy Inc., Les matériaux d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment, Mémoire. OCTOBRE 2013.
- [21] Sotehi Nassima, Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de L'isolation. Thèse de doctorat, Université frères Mentouri-Constantine, 2010.
- [22] Abderabi Rabah, Caractérisation d'un béton ordinaire à Base des billes de polystyrène expansé, Mémoire de Master, Université Ziane Achour de Djelfa, 2020.
- [23] Knauf, le polystyrène- expansé-l'isolant-écologique- par excellence, disponible à l'adresse URL :[http:// www.knauf.fr/qui-sommes-nous/blog/](http://www.knauf.fr/qui-sommes-nous/blog/), consultée en ligne le 29/04/2024.
- [24] Mon kit Isolation, polystyrène-expansé blanc, disponible à l'adresse URL :<https://monkitisolayion.com.Isolant.72-704html>, consultée en ligne le 29/04/2024.
- [25] Carrel, P., Louvigne, M., et Malaval, R. 1982. Le polystyrène expansé. Le bâtiment bâtir, Avril 1982 : 28–34.
- [26] Ferrer M, Bétons légers isolants à base de billes de polystyrène. Thèse de doctorat. Université de Clermont Ferrand, 1985.
- [27] BREMNER T.W et HOLM.T.A «Performance recorde for High strength structural light weight concrete » 2000
- [28] John Newman et Ban Sengchoo, Advanced Concrete Technology, Department of Civil Engineering Imperial College, London School of the Built Environment Napier University Edinburgh, 2003.
- [29]Williams Pauchet, Techniques du bâtiment : Connaître les matériaux de la construction, Techniques ingénieur, disponible à l'adresse URL : [https:// www.techniques-ingenieur.fr](https://www.techniques-ingenieur.fr), consultée en ligne le 10/05/2024.
- [30] Shink M, Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers, Thèse de doctorat, Université Laval Québec, 2003.
- [31] Commission RILEM des Béton Légers Terminologie et Définitions. Matériels and structures 3, 60–69 (1970). <https://doi.org/10.1007/BF02475110>
- [32]Le guide de maçonnerie, les bétons, part1generalites/matériel/matériaux/béton/granulats-légers disponible à l'adresse URL : <https://maconnerie.bilp.fr/général/>, consultée en ligne le 13/05/2024.
- [33] Benzina Ahlem et Hachem Nafissa, Etude de l'influence des granulats pouzzolaniques sur les caractéristiques mécaniques des bétons légers. Mémoire de Master, Université Ain-Temouchent, 2018.
- [34] Arnauld M.et Virlogeux M., Granulats et béton légers, Paris : F075007 (coll « Pressesde l'école nationale des Ponts et chaussées » n°522 ,1986.
- [35] Jean Blévoitet Perchat Jean, Béton armé - Règles BAEL - Bétons de granulats légers artificiels, Techniques de l'Ingénieur, 10 février 1983.

- [36] Herihiri Ouided, Formulation et caractérisation des bétons légers, Mémoire de Master, Université de Biskra, 2010.
- [37] Rahmouni Imen, Optimisation de la formulation des bétons d'éco-granulats obtenus par carbonatation accélérée des déchets d'incinérateurs, Thèse de Doctorat, Université de Picardie Jules Verne, 2019.
- [38] Agnes Zambonetal, Formulation et comportement d'un béton allégé à base de sédiments marins, Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2015.
- [39] Miloudi D., Formulation et caractérisation de bétons légers à base de liège naturel, Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2015.
- [40] Peter L. et al, Guide pratique du béton : Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, 2015.
- [41] Contant M., Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux, Projet d'application présenté à l'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'Université du Québec Édition. Montréal 14, 2000.
- [42] Agoumimelcha Ahmed et Ouannoughi Billal, Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage. Mémoire de Master, Université de Médéa, 2017.
- [43] Bederina M., Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat de l'ENP d'Alger, 2007.
- [44] NF EN 1097-3, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac (apparente) et de la porosité inter granulaire, Normes européenne, août 1998.
- [45] NF EN 1097-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, janvier 2014.
- [46] NF EN 933-1, Normes françaises et européennes, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, Décembre 2012.
- [47] NFP 18-540, Normes françaises Granulats - Définitions, conformité, spécifications, 1997.
- [48] NF EN 933-8, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable, mars 2012.
- [49] NA 442/2013, Norme Algérienne, Ciment, Composition spécifications et critères de conformité des ciments, 2005.
- [50] EN196-3, Normes Européennes, Méthodes d'essai des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité, 2017.
- [51] NF EN 934-2, Normes françaises et européennes, Adjuvants pour bétons, mortier et coulis- Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage, 2012.
- [52] NF P 18-440, Normes françaises, Masse Volumique du Béton Frais, 1999.
- [53] EN 196-1, Normes européennes, Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances, 2016.