



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

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

N° :

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

Etude expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux de construction : Cas du mortier allégés par des billes de polystyrène

Présenté par :

CHAIMA KEBIR

Soutenu le: 30/ 06/ 2025

devant le jury composé de:

I.TABET	MCA	Université de Skikda	Président
N. SOTEHI	MCA	Université de Skikda	Rapporteur
K. DHIF	MAA	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

REMERCIEMENTS

Le présent travail a été effectué au Laboratoire de Physique Energétique, Université Mentouri de Constantine.

*Je remercie en première lieu **ALLAH** le tout puissant qui a permis de réaliser de travail*

*Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement Dr **N. SOTEHI** maitre de conférences au département de physique, pour m'avoir guidé et m'encouragé tout au long de ce mémoire, pour ses conseils et pour ses aides appréciables, qui ont enrichi ce travail.*

*Je remercie vivement les membres de mon jury d'avoir accepté de juger ce travail et en particulier Dr **I. TABET** maitre de conférences au département de physique, pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury.*

*Un grand merci également à M^{me} **K. DHIF** maitre assistant au département de physique, pour avoir accepté de juger ce travail.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*A **ma mère** « qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui est toujours disponible pour m'aider, je lui confirme mon attachement et mon profond respect.*

*A **mon père**, qui est toujours disponible pour me soutenir et pour que je puisse arriver à ce stade.*

*A **mes deux frères**.*

*A **ma tante maternelle** qui a toujours été un soutien pour moi.*

*A **mes chères amies**, qui m'ont aidé et soutenue dans les moments difficiles ...*

*A tous **mes amis de ma promotion**.*

Et à tous ceux que j'ai connus durant mon cycle d'étude.



Nomenclatures

Lettres Latins

C : coefficient global de déperdition thermique à travers la boîte	$W \cdot K^{-1}$
C_p : chaleur massique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
e : épaisseur de l'échantillon	m
h_c : coefficient d'échange par convection	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
m : masse	kg
R : résistance chauffante	Ω
S : surface d'échantillon	m^2
T : température	K
t : temps	s
V : tension aux bornes du film chauffant de résistance	volt

Lettres grecques :

α : Diffusivité thermique	$m^2 \cdot s^{-1}$
λ : conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ : masse volumique	$kg \cdot m^{-3}$
\dot{q} : flux thermique	W
φ : densité de flux thermique	$W \cdot m^{-2}$
ε : porosité totale du matériau	%
ω : teneur volumique en eau	%
τ : tortuosité	

Nomenclatures

Indices

a : ambiance de la salle

b : ambiance intérieure de la boîte

c : face chaude

f : face froide

g : phase gazeuse

l : phase liquide

s : solide

th : thermique

v : vapeur

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Nomenclatures	III
Liste de figure.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les matériaux de construction

Introduction.....	5
I.1. Les matériaux de construction.....	5
I.1.1. Définition et classification.....	5
I.1.1.1. Définition.....	5
I.1.1.2. Classification des matériaux de construction	5
I.1.2. Domaine d'utilisation des matériaux de construction	7
I.1.3. Les matériaux traditionnels vs Les matériaux innovants.....	7
I.1.4. Critères de choix des matériaux de construction	8
I.2. Les propriétés thermophysiques des matériaux	8
I.2.1. Conductivité thermique.....	8
I.2.2. Diffusivité thermique.....	8
I.2.3. Effusivité thermique	9
I.2.4. La résistance thermique.....	9
I.2.5. La capacité thermique	9
Conclusion.....	10

Chapitre II : Technique de mesure et caractérisation thermophysique des matériaux

Introduction.....	12
II.1. Les méthodes expérimentales.....	12
II.1.1. Les méthodes en régime permanent.....	12
II.1.1.1. La méthode de la plaque chaude gardée.....	12
II.1.1.2. La méthode des boîtes	13
II.1.2. Les méthodes en régime transitoire.....	14
II.1.2.1. Méthode du fil chaud.....	14
II.1.2.2. Méthode du hot disk.....	15
II.1.2.3. La méthode flash.....	16

Sommaire

II.2. Les méthodes analytiques.....	17
II.2.1. Modèle de Parker	17
II.2.2. Modèle de Dégiovanni.....	18
Conclusion.....	21

Chapitre III : Etude expérimentale des propriétés thermophysiques d'un matériau de construction.

Introduction.....	23
III.1. Présentation des matériaux étudiés.....	23
III.1.1. Le ciment.....	24
III.1.2. Le sable.....	25
III.1.3. Les billes de polystyrène.....	25
III.2. Mesures expérimentales.....	26
III.2.1. Mesure expérimentale de l'humidité.....	26
III.2.2. Mesure expérimentale des propriétés thermophysiques.....	27
III.2.2.1. Description du dispositif utilisé.....	27
III.2.2.2. Détermination expérimentale de la conductivité thermique.....	28
III.2.2.3. Détermination expérimentale de la diffusivité thermique.....	29
Conclusion.....	30

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction.....	32
IV.1. Masse volumique.....	32
IV.2. Conductivité thermique.....	33
IV.2.1. Influence de la teneur en eau.....	33
IV.2.2. Influence de la masse volumique.....	35
IV.2.3. Influence du dosage de polystyrène.....	36
IV.2.4. Influence du diamètre des billes de polystyrène.....	37
IV.3. Diffusivité thermique.....	38
IV.3.1. Influence de la teneur en eau.....	38
IV.3.2. Influence de la masse volumique.....	39
IV.3.2. Influence du dosage de polystyrène.....	40
IV.3.4. Influence du diamètre des billes de polystyrène.....	41
IV.4. Résistance thermique.....	42
IV.4.1. Influence de la teneur en eau.....	42

Sommaire

IV.4.2. Influence du diamètre des billes de polystyrène.....	42
IV.5. Effusivité thermique.....	43
IV.5.1. Influence de la masse volumique	43
IV.5.2. Influence du dosage de polystyrène.....	44
IV.5.3. Influence du diamètre des billes de polystyrène.....	45
Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques.....	51
Annexe	54
Résumé	
Abstract	
الملخص	

Liste des figures

Figure I.1 : Classification des matériaux de construction.....	5
Figure II.1 : Schéma de principe plaque chaude gardée.....	12
Figure II.2 : Schéma de principe méthode des boîtes.....	13
Figure II.3 : Le principe de mesure à l'aide d'un fil chaud.....	14
Figure II.4 : Vue d'une sonde de type fil chaud.....	14
Figure II.5 : Schéma de la méthode Hot Disk.....	16
Figure II.6 : Principe de la méthode flash.....	17
Figure II.7 : Définition des temps, $t_{1/3}$, $t_{1/2}$, $t_{2/3}$, $t_{5/6}$ et t_{max} , utilisés dans les modèles analytiques de Parker et Dégiovanni.....	18
Figure III.1 : Mélange de mortier.....	23
Figure III.2 : Le ciment.....	24
Figure III.3 : Echantillon de sable.....	25
Figure III.4 : Les billes de polystyrène.....	25
Figure III.5 : Cellule de mesure par la méthode des boîtes.....	27
Figure III.6 : Coupe d'une boîte pour mesures de diffusivité thermique et position du Flash.....	30
Figure IV.1 : Variation de la masse volumique en fonction du diamètres de billes de polystyrène.....	33
Figure IV.2 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.....	34
Figure IV.3 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon MT (a) et de l'échantillon MP25 (b) en fonction de la teneur en eau.....	35
Figure IV.4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.....	36
Figure IV.5 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage de polystyrène.....	37
Figure IV.6 : Variation de la conductivité thermique en fonction du diamètres de billes de polystyrène	37
Figure IV.7 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau.....	38
Figure IV.8 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la masse volumique.....	39
Figure IV.9 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage de polystyrène	40

Liste des figures

Figure IV.10 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du diamètres de billes de polystyrène.....	41
Figure IV.11 : Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en eau.....	42
Figure IV.12 : Variation de la résistance thermique en fonction du diamètres de billes de polystyrène	34
Figure IV.13 : Variation de l'effusivité thermique en fonction de la masse volumique.....	44
Figure IV.14 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du dosage de polystyrène	45
Figure IV.15 : Variation de l'effusivité thermique en fonction du diamètres de billes de polystyrène	45
FigureA.1 : Description géométrique d'un milieu poreux.....	54
FigureA.2 : Milieu poreux non consolidé.....	55
Figure A.3 : Milieu poreux consolidé.....	55

Liste des tableaux

Tableau III.1 : Composition des échantillons étudiés.....	26
Tableau IV. 1 : Masse volumique des échantillons de béton de polystyrène.....	35
Tableau IV.2 : Conductivité thermique à l'état sec et saturé en fonction de la masse volumique	39

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par une conscience croissante des enjeux liés à l'efficacité énergétique et à la durabilité environnementale, le secteur du bâtiment représente l'un des domaines les plus concernés. En effet, la consommation énergétique importante des bâtiments, notamment pour le chauffage et la climatisation, incite à concevoir des matériaux de construction offrant de meilleures performances thermiques.

Parmi les solutions développées ces dernières années, l'intégration de matériaux légers et isolants, tels que les billes de polystyrène expansé (EPS) dans les mortiers, constitue une voie prometteuse. Ce type de matériau permet à la fois de réduire la masse volumique du mortier et d'améliorer son isolation thermique grâce à la faible conductivité thermique du polystyrène et à sa capacité à introduire de l'air dans la matrice.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés récemment à cette thématique. C'est le cas notamment de A. M.K. Almusaw [1], qui a évalué les propriétés thermiques et mécaniques d'un mortier allégé par du polystyrène recyclé. Ses résultats ont montré une diminution notable de la conductivité thermique avec l'augmentation du taux de polystyrène. R. Shabbar et ses collaborateurs [2] ont, quant à eux, comparé différents types de billes de polystyrène (vierges et recyclées), et confirmé l'impact positif de ce matériau sur les performances thermiques du mortier. En Algérie, N. Sotehi et al. [3] ont également mené une étude sur des bétons légers incorporant du liège et des billes de polystyrène, et ont obtenu des résultats similaires à ceux mentionnés ci-dessus, confirmant l'intérêt de ce type d'ajout dans un contexte local.

Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique et vise à étudier expérimentalement les propriétés thermophysiques d'un mortier allégé par des billes de polystyrène, à l'aide de la méthode des boîtes. L'objectif est d'analyser l'influence de l'ajout de polystyrène sur la conductivité et la diffusivité thermiques du matériau.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le chapitre I présente un aperçu général des matériaux de construction et de leurs principales propriétés ;

Introduction générale

Le chapitre II décrit les différentes méthodes de mesure des propriétés thermophysiques des matériaux ;

Le chapitre III est consacré à l'étude expérimentale du mortier allégé selon la méthode des boîtes ;

Enfin, le chapitre IV expose et discute les résultats obtenus, en les comparant notamment aux travaux précédents.

Ce travail vise ainsi à contribuer à la recherche sur les matériaux de construction à haute performance thermique, dans la perspective de solutions plus économiques, légères et respectueuses de l'environnement.

CHAPITRE I : Généralités sur les matériaux de construction

Introduction

Les matériaux de construction jouent un rôle crucial dans la performance thermique des bâtiments. Dans ce chapitre, nous offrirons tout d'abord une synthèse bibliographique sur les matériaux de construction et nous aborderons leur classification et leurs propriétés thermophysiques.

I.1. Les matériaux de construction

I.1.1. Définition et classification

I.1.1.1. Définition

On considère comme matériaux de construction tous les éléments utilisés pour la réalisation des structures en béton armé, en maçonnerie ou en métal. Ils englobent aussi les matériaux naturels (tels que le bois et la pierre) et synthétiques (comme les plastiques et composites), couramment utilisés dans le secteur des travaux publics (routes, ponts, aéroports, barrages, tunnels, etc.) ainsi que dans les initiatives d'infrastructure et de développement urbain [4].

I.1.1.2. Classification des matériaux de construction

On distingue généralement trois catégories bien établies de matériaux de construction :

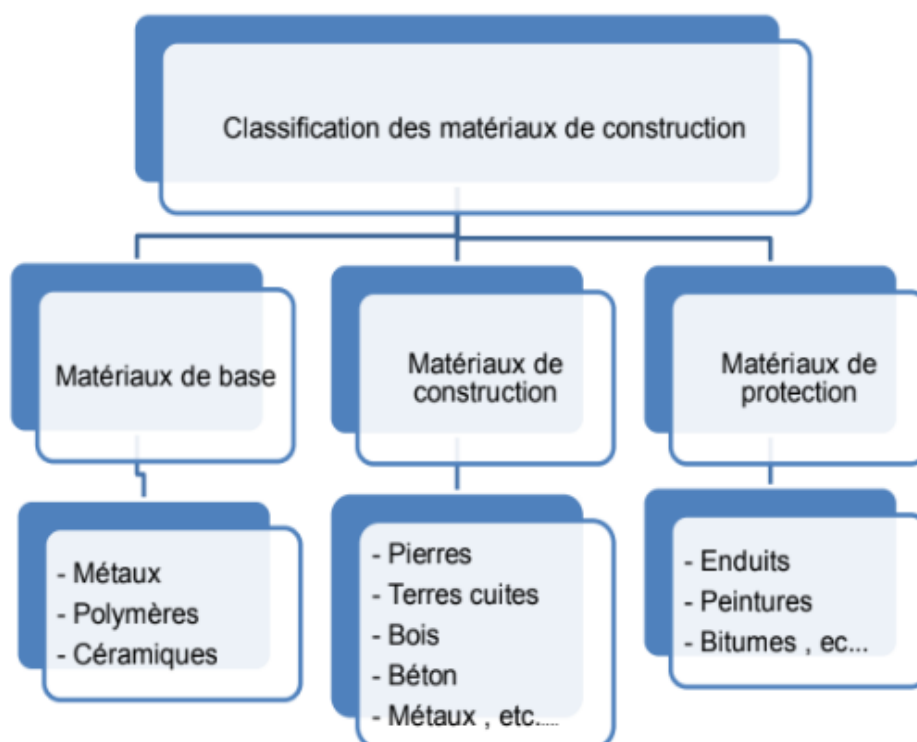


Figure I.1 : Classification des matériaux de construction [5].

1.1.1.2.1 Classification scientifique

Dans le domaine de la science des matériaux, les matériaux sont catégorisés en fonction de leur composition et de leur structure de la manière suivante [5] :

- Alliages et métaux : Les métaux sont composés d'un ou plusieurs éléments métalliques (par exemple, le fer, l'aluminium, le cuivre, le titane, l'or, le nickel) et souvent aussi d'éléments non métalliques (par exemple, le carbone, l'azote, l'oxygène) en quantités relativement faibles [6].

- Céramique : Les céramiques sont des matériaux constitués d'éléments à la fois métalliques et non métalliques, généralement composés d'oxydes, de nitrures et de carbures. Les matériaux céramiques habituels incluent l'oxyde d'aluminium, le dioxyde de silicium, le carbure de silicium, le nitrure de silicium et ce que certains désignent comme les céramiques conventionnelles, constituées de minéraux argileux (comme la porcelaine), ainsi que du ciment et du verre. Sur le plan de la mécanique, les matériaux en céramique présentent une rigidité et une résistance notables ; ces caractéristiques rivalisent avec celles des métaux [6].

- Polymères : Les plastiques et les caoutchoucs familiers sont inclus dans la catégorie des polymères. Un certain nombre de ces composés organiques ont une composition chimique qui repose sur le carbone, l'hydrogène et d'autres éléments non métalliques (tels que O, N et Si). De surcroît, ils ont des structures moléculaires très étendues, généralement en chaîne, dont le squelette est fréquemment composé d'atomes de carbone. On peut citer plusieurs polymères populaires et identifiables, tels que le polyéthylène (PE), le nylon, le poly (chlorure de vinyle) (PVC), le polycarbonate (PC), le polystyrène (PS) et le caoutchouc silicone. Ces matériaux ont souvent une densité réduite, tandis que leurs propriétés mécaniques diffèrent généralement de celles des matériaux métalliques et céramiques : ils manquent de rigidité et de résistance [6].

1.1.1.2.2. Matériaux de base et produits

- Matériaux de base (matière première) : Pierre, Métaux ; Bois, Argiles, Calcaire, ...etc.

- Matériaux produits (composites) : le ciment, alliages, béton, briques etc.... [5]

1.1.1.2.3. Classification pratique

Dans le domaine de la construction, les matériaux sont catégorisés en fonction de leur usage et de leurs caractéristiques principales comme suit :

- Matériaux résistants : Substance qui a la capacité de supporter des charges (poids propre, surcharge, séisme). Les matériaux fréquemment utilisés incluent la pierre, la terre cuite, le bois, le béton et le métal.
- Matériaux de protection : Matière dont les caractéristiques couvrent le matériau de construction principal et qui disposent de propriétés assurant une protection contre des éléments extérieurs tels que : Par exemples : revêtements, peintures, bitume, etc. [5]

I.1.2. Domaine d'utilisation des matériaux de construction

Dans le secteur du bâtiment, les matériaux de construction jouent un rôle fondamental. Ils sont utilisés pour:

- Assurer la structure porteuse des ouvrages (matériaux de portage) ;
- Garantir l'isolation sous différentes formes : thermique, acoustique, ou contre les rayonnements nucléaires ;
- Réaliser les finitions et la décoration, en contribuant à l'esthétique et au confort des espaces;
- Assurer l'étanchéité, en protégeant les bâtiments contre l'humidité, l'eau et l'air ;
- Offrir une protection face aux divers risques, notamment les incendies.

Avec les enjeux actuels liés à l'efficacité énergétique, au bien-être et à la santé des occupants, le domaine des matériaux de construction connaît un essor considérable en termes de recherche, d'innovation et de production [13].

I.1.3. Les matériaux traditionnels vs les matériaux innovants

I.1.3.1. Les matériaux traditionnels

Les matériaux traditionnels, comme les matières synthétiques, non durables ou nocives, exercent une forte influence sur l'environnement. Ils cherchent à atteindre des buts pratiques, esthétiques et financiers, mais omettent fréquemment de prendre en compte les enjeux environnementaux et sociaux. Les matériaux classiques englobent les peintures et finitions à base de vinyle, polyester, nylon, acrylique, PVC, formaldéhyde et plomb [7].

I.1.3.2. Les matériaux innovants

Les matériaux innovants représentent une combinaison de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris individuellement. Ils présentent de nombreuses caractéristiques en comparaison aux matériaux traditionnels : une solidité mécanique élevée, une flexibilité importante, une mise en place facile sans fixation mécanique,

une résistance appréciable à la corrosion et au feu, une étanchéité supérieure face au gel-dégel, un besoin d'entretien inexistant, un gain de temps lors de leur installation ainsi qu'une légèreté remarquable (20 % de la densité de l'acier), ce qui les rend parfaits pour rénover les structures anciennes. Leur principal défaut demeure leur coût excessif, restreignant leur utilisation à des secteurs spécifiques tels que la restauration du patrimoine et les travaux d'art [8].

I.1.4. Critères de choix des matériaux de construction

Le choix des matériaux doit être fondé sur différents critères, dont [9] :

- Les propriétés mécaniques (résistance à la corrosion, à la traction, à la déformation et aux chocs).
- Propriétés thermiques (résistance thermique et conductivité).
- L'impact écologique.
- L'esthétique.

I.2. Les propriétés thermophysique des matériaux de construction

Les propriétés thermo-physiques d'un matériau définissent son comportement et sa réponse à un changement de température. Les évaluations du flux de chaleur, des densités de flux, ainsi que des propriétés thermo-physiques comme la conductivité ou la diffusivité thermique, sont cruciales dans l'analyse des procédés thermiques. Elles offrent la possibilité d'anticiper la façon dont le matériau se comportera dans un environnement spécifique [10].

I.2.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une propriété physique qui exprime la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Elle correspond à la quantité de chaleur traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur, lorsque la différence de température entre ses deux faces est d'un kelvin. Un matériau ayant une conductivité thermique élevée laisse passer la chaleur plus facilement, ce qui signifie qu'il isole moins bien. La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau et de la température, mais d'autres facteurs comme l'humidité et la pression peuvent également l'influencer [11].

I.2.2. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une propriété physique qui mesure la capacité d'un matériau à faire circuler une variation de température d'un point à un autre en son sein. Elle est généralement notée par les lettres a , D , ou la lettre grecque α (alpha) [11] :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (I.1)$$

Avec :

a : la diffusivité thermique du matériau (m^2/s).

λ : la conductivité thermique du matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

ρ : la masse volumique du matériau ($kg.m^{-3}$).

c_p : la capacité thermique massique du matériau ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).

I.2.3. Effusivité thermique

L'effusivité thermique décrit la capacité d'un matériau à modifier sa température lorsqu'il reçoit un apport d'énergie thermique. Deux processus se déroulent simultanément : l'énergie est localement absorbée en fonction de la capacité thermique du matériau et cette même énergie est diffusée vers les zones adjacentes en lien avec la conductivité thermique du matériau.

$$E = \sqrt{\lambda\rho c_p} \quad (I.2)$$

Un matériau ayant une effusivité importante (comme le métal ou la faïence) absorbe rapidement une grande quantité d'énergie sans que sa surface ne s'échauffe considérablement. Par contre, un matériau à faible effusivité (tel que le bois ou la moquette) se chauffe rapidement en surface, mais retient peu de chaleur.

Elle s'exprime, dans le Système international d'unités, en $J.K^{-1}.m^{-2}.S^{-1/2}$

I.2.4. La résistance thermique :

On utilise la résistance thermique pour mesurer l'efficacité isolante des matériaux en fonction de leur épaisseur spécifique. Elle est exprimée en $m^2.K.m^{-1}$ et se rapporte à l'épaisseur et à la conductivité thermique par l'équation ci-dessous :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (I.3)$$

Plus la résistance thermique d'une paroi est importante, meilleur est son isolation. Cet élément est employé dans les applications d'isolation thermique, notamment dans le domaine de la construction.

I.2.5. La capacité thermique :

La capacité thermique d'un matériau se réfère à l'énergie nécessaire pour élever sa température d'un degré.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (I.4)$$

En pratique, on utilise plus fréquemment la capacité thermique massique, notée : c en minuscule, qui s'exprime en joules par kelvin et par kilogramme ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$).

$$c = \frac{C}{m} \quad (I.5)$$

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général des matériaux de construction, en mettant l'accent sur leur classification, leurs domaines d'utilisation et les critères de choix les plus pertinents. Une attention particulière a été portée aux propriétés thermophysiques, telles que la conductivité, la diffusivité, l'effusivité, la résistance et la capacité thermique, qui jouent un rôle déterminant dans le comportement thermique des matériaux. Cette base théorique est essentielle pour comprendre les performances des matériaux étudiés dans les chapitres suivants, notamment dans le cadre de l'amélioration de l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment.

CHAPITRE II : Techniques de mesure des propriétés thermophysique des matériaux

Introduction

Ce chapitre présente les principales méthodes expérimentales et analytiques utilisées pour mesurer les propriétés thermophysiques des matériaux de construction essentielles pour évaluer leur comportement thermique. Ces techniques permettent de mesurer des grandeurs clés comme la conductivité thermique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique, en utilisant des principes variés allant de l'application d'un flux thermique stable à des impulsions de chaleur brèves. Ces mesures sont indispensables pour optimiser la performance énergétique et la durabilité des matériaux dans le secteur du bâtiment.

II.1. Les méthodes expérimentales

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les propriétés thermophysiques, on peut les classer en fonction du régime de fonctionnement : mesures en régime permanent ou mesures en régime transitoire.

II.1.1. Les méthodes en régime permanent

II.1.1.1. Méthode de la plaque chaude gardée

La méthode de la plaque chaude gardée est une technique de mesure utilisée pour déterminer la conductivité thermique d'un matériau isolant [12]. Son schéma de principe est représenté sur la figure :

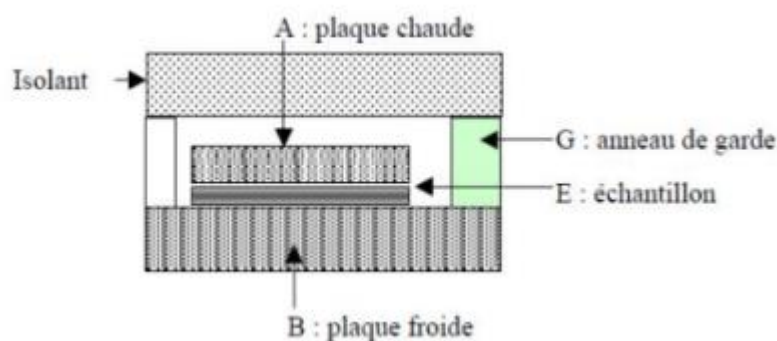


Figure II.1 : Schéma de principe plaque chaude gardée [13].

Le principe de ce montage repose sur le maintien d'une différence de température ΔT entre deux plaques planes, A et B, maintenues respectivement à des températures constantes T_A et T_B . Un échantillon du matériau, solide et peu conducteur, est placé entre ces plaques. Lorsque

l'équilibre thermique est atteint, les capteurs mesurent la différence de température aux faces de l'échantillon, ce qui permet de calculer directement sa conductivité thermique [12,13]. Soit e l'épaisseur de l'échantillon et q le flux thermique en régime permanent par unité de surface, transféré d'une plaque à l'autre. La conductivité thermique λ du matériau est donnée par la relation :

$$\lambda = \frac{e \cdot q}{\Delta T} \quad (\text{II.1})$$

❖ **Avantages :**

- Mesure directe et absolue de la conductivité thermique.
- Grande précision, particulièrement adaptée aux matériaux isolants.

❖ **Inconvénients :**

- Durée de mesure longue : l'attente de l'équilibre thermique peut durer plusieurs heures.
- Sensibilité aux pertes thermiques : des précautions rigoureuses sont nécessaires pour assurer la fiabilité des résultats [12, 13].

II.1.1.2. La méthode des boîtes

La méthode des boîtes est une méthode de mesure utilisée pour déterminer la conductivité thermique, il s'agit de réaliser un écoulement de chaleur unidirectionnel à travers un échantillon de matériau à tester, en effectuant les mesures après obtention du régime permanent [13, 14].

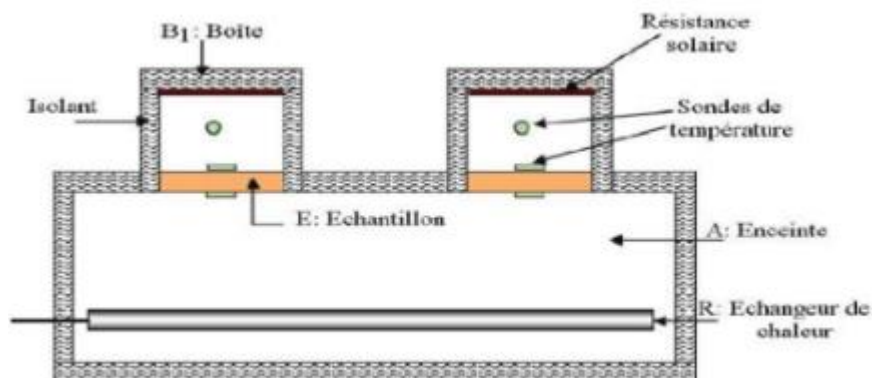


Figure II.2 : Schéma de principe méthode des boîtes [13].

L'enceinte A est conservée à une température inférieure aux deux boîtes par le biais d'un échangeur de chaleur à basse température R. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes génèrent un gradient thermique à travers l'échantillon E. On mesure les températures des faces supérieure et inférieure de l'échantillon E ainsi que le flux de chaleur provenant de la résistance

chauffante. Ces données permettent de déterminer les propriétés thermiques de l'échantillon. Nous déduisons que l'état stationnaire est atteint en stabilisant les températures TC et TF de la face chaude et froide de l'échantillon. Il faut de 4 à 7 heures pour atteindre le niveau requis [15].

$$\lambda = \frac{e}{A(T_c - T_f)} \left[\frac{V^2}{R} - C (T_b - T_a) \right] \tag{II.2}$$

❖ **Avantages**

La méthode des boîtes se distingue par sa simplicité de mise en œuvre et a fait l'objet de nombreuses études. La précision des résultats obtenus est équivalente à celle des autres méthodes.

❖ **Inconvénients**

A des températures élevées, la précision des résultats diminue [13].

II.1.2. Les méthodes en régime transitoire

II.1.2.1 Méthode du fil chaud

Il s'agit de la méthode la plus connue (norme ISO 8894) et la plus largement utilisée dans le secteur industriel. A l'origine conçue pour mesurer la conductivité thermique des liquides, elle a ensuite été adaptée à la caractérisation des solides isolants à haute température [13].

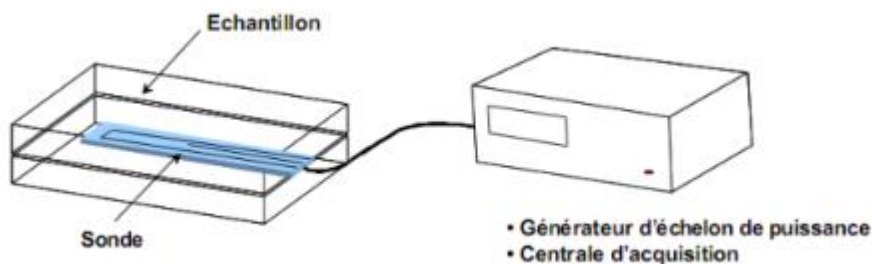


Figure II.3 : Le principe de mesure à l'aide d'un fil chaud [14].



Figure II.4 : Vue d'une sonde de type fil chaud [15].

Cette méthode permet d'évaluer la conductivité thermique d'un matériau à partir de l'évolution de la température enregistrée par un thermocouple situé à proximité d'un fil résistif. La sonde (figure II.4), composée du fil résistif et du thermocouple, est intégrée dans un support isolant en kapton et placée entre deux échantillons du matériau à caractériser [14].

❖ **Avantages :**

- Méthode simple à mettre en œuvre.
- Temps de mesure relativement court.
- Applicable à une grande variété de matériaux : solides, liquides et matériaux pulvérulents.
- Possibilité d'extension aux matériaux conducteurs en mesurant et modélisant la température à une distance donnée du centre du fil [13].

❖ **Inconvénients :**

Contraintes liées à la taille des échantillons disponibles, limitant parfois l'applicabilité de la méthode [13].

II.1.2.2. Méthode du hot disk

La méthode Hot Disk est une technique robuste permettant la mesure simultanée et absolue de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique d'un matériau. Elle s'adapte à une grande variété de matériaux, indépendamment de leur nature ou de leur état. Le dispositif expérimental est simple : une sonde composée d'une résistance thermique est placée entre deux parties identiques de l'échantillon à étudier. Cette sonde joue un double rôle, agissant à la fois comme source de chaleur et capteur de température. Lorsqu'une puissance constante est appliquée pendant un temps limité, elle provoque un léger échauffement du matériau. Cette élévation de température entraîne une variation de la résistance électrique de la sonde, détectée avec une grande précision à l'aide d'un pont de Wheatstone. L'analyse des données obtenues durant cette phase transitoire permet d'estimer les propriétés thermo-physiques du matériau. La méthode repose sur un modèle théorique représentant la sonde comme des anneaux sources concentriques, et prend en compte la profondeur de pénétration du flux thermique, un facteur déterminant pour la précision des mesures [11, 13], et définie par l'équation suivante :

$$d_{pen} = C_1 \sqrt{t_{exp} \lambda} \quad (II.3)$$

Où :

C_1 : est une constante.

t_{exp} : est la durée l'excitation thermique.

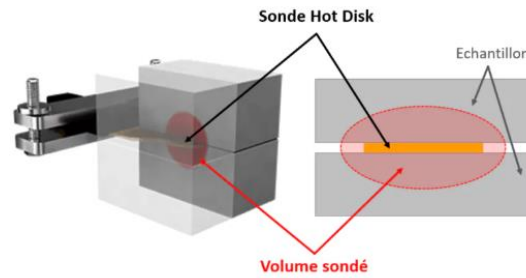


Figure II.5 : Schéma de la méthode Hot Disk [11].

❖ **Avantages :**

- Aucune partie de l'élément chauffant n'est exposée aux effets de bords liés aux pertes latérales.
- La sonde est entièrement intégrée au cœur du matériau, assurant une mesure plus homogène.
- Permet une mesure directe et absolue de la conductivité thermique
- Applicable à une grande variété de matériaux (solides, liquides, composites, etc.).
- Mesure à la fois la conductivité et la diffusivité thermiques [13].

❖ **Inconvénients :**

- La petite taille de la sonde Hot Disk peut rendre le montage délicat.
- Les connexions filaires d'alimentation peuvent introduire des perturbations thermiques.
- Ces perturbations peuvent entraîner un biais dans la modélisation de la température et affecter la précision des résultats [13].

II.1.2.3. La méthode flash

La méthode flash laser, développée par Parker, présente deux avantages majeurs : la mesure s'effectue rapidement et les échantillons utilisés peuvent être de petite taille. Il s'agit d'une expérience en régime transitoire permettant la caractérisation de la diffusivité thermique des matériaux. Cette méthode impulsionnelle consiste à appliquer une impulsion thermique brève sur la face avant d'un échantillon. La chaleur ainsi absorbée diffuse à travers le matériau, et la diffusivité thermique est déterminée par l'analyse de l'évolution de la température sur la face arrière de l'échantillon (appelée **thermogramme**). L'évolution de cette température peut être modélisée analytiquement [13].

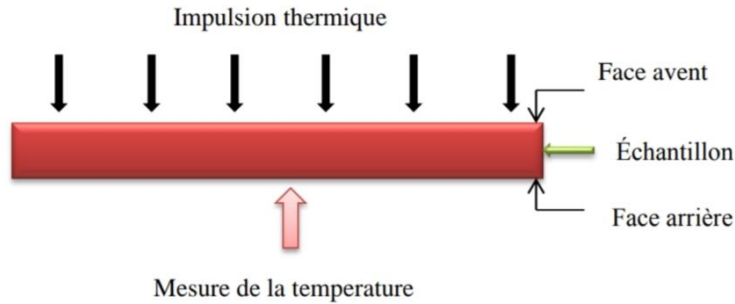


Figure II.6 : Principe de la méthode flash [13].

❖ **Avantage :**

Malgré cette limitation, la méthode flash présente un avantage majeur : elle est la seule technique permettant de caractériser les matériaux à très haute température tout en assurant un bon contrôle de la température du matériau pendant l’expérience [13].

❖ **Inconvénients :**

La méthode flash n’est pas bien adaptée à l’étude de la diffusivité thermique des matériaux poreux. En effet, le flash envoyé sur la face avant n’est pas entièrement absorbé à la surface du matériau, ce qui peut fausser les mesures [13].

II.2. Les méthodes analytiques

II.2.1. Modèle de Parker

Ce modèle considère un disque parfaitement isolé, de rayon R et d’épaisseur e . Au départ, l’échantillon reçoit une impulsion d’énergie de très courte durée, avec une absorption de chaleur qui se fait uniformément à la surface. On suppose que les coefficients d’échange thermique sont nuls sur toutes les faces, et que la propagation de la chaleur se fait selon l’axe optique. Dans ce cas, la température de la face arrière, exprimée en coordonnées réduites [16], est décrite par l’équation suivante (II.4) :

$$T^* = 1 + 2 \sum_n^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \Omega) \tag{II.4}$$

Ou n est un entier naturel, e : est l’épaisseur de l’échantillon, t est le temps, Ω et T^* sont respectivement le temps et la température réduits et sont définis par les relations suivantes :

$$T^*(e, t) = \frac{T(e,t) - T_0}{T_{max} - T_0} \tag{II.5}$$

$$\Omega = \frac{\pi^2 a \cdot t}{e^2} \tag{II.6}$$

Où :

T_0 : Est la température initiale.

T_{max} :Est la température maximale atteinte.

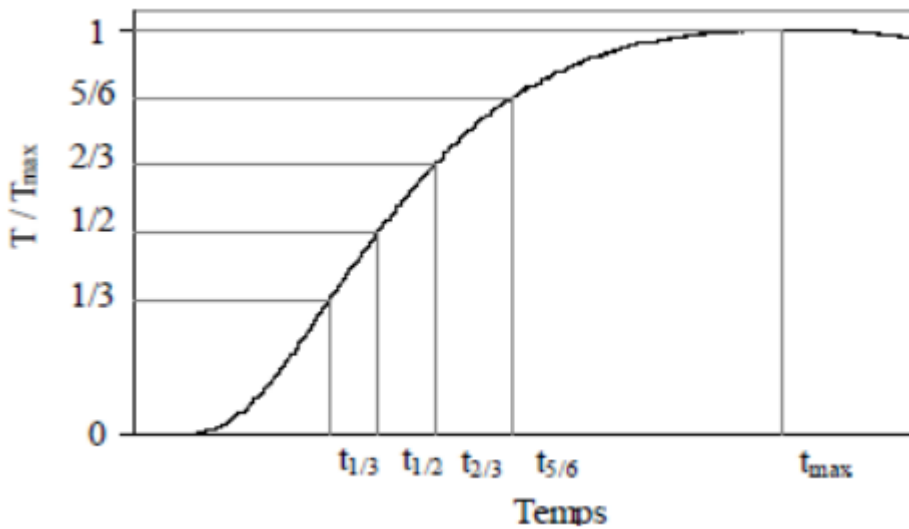


Figure II.7 : Définition des temps, $t_{1/3}$, $t_{1/2}$, $t_{2/3}$, $t_{5/6}$ et t_{max} , utilisés dans les modèles analytiques de Parker et Dégiovanni [16].

La diffusivité thermique peut être déterminée à partir de l'épaisseur de l'échantillon et du temps de demi-montée ($t_{1/2}$), c'est-à-dire le temps de nécessaire pour que la température atteigne la moitié de la température maximale ($T_{max/2}$) [16].

II.2.2. Modèle de Dégiovanni

La méthode de Degiovanni, également appelée méthode des temps partiels, est une approche analytique utilisée pour déterminer la diffusivité thermique d'un matériau. Elle se distingue par le fait qu'elle ne repose sur aucune hypothèse particulière concernant les flux thermiques aux surfaces de l'échantillon. Les pertes thermiques y sont considérées comme uniformément réparties sur toutes les faces. Cette méthode s'appuie exclusivement sur les enregistrements expérimentaux de la température, sans nécessiter de modélisation complexe des conditions aux limites. Elle repose sur une formulation en variables réduites, telles que la température, l'espace et le temps adimensionnés. La température est alors exprimée à l'aide de séries doubles qui

dépendent de fonctions de Bessel, des coefficients d'échange thermique sur les différentes faces de l'échantillon (notés h_0 , h_e et h_R), ainsi que des nombres de Biot, qui traduisent l'influence des échanges thermiques en surface par rapport à la conduction interne, [17] soit :

$$h_0 \neq h_e \neq h_R$$

En notant h_0 , h_e et h_R les coefficients d'échange thermique respectivement sur les faces avant, arrière et latérales ($x = 0$, $x = e$ et $r = R$). La distribution de température en coordonnées réduites s'écrit comme suit :

$$\theta^*(x^*, r, t^*) = \sum_n \sum_p A_{np} F_n(x^*) G_p(r^*) \exp(-v_{np}t^*) \quad (II.7)$$

$$A_{np} = \frac{4\alpha_n^2 (\alpha_n^2 + B_{ie}^2)}{(\alpha_n^2 + B_{i0}^2)(\alpha_n^2 + B_{ie}^2) + (B_{i0} + B_{ie})(\alpha_n^2 + B_{i0}B_{ie})} X \frac{B_{iR}R^*}{(B_{iR}^2 R^{*2} + \infty_p^2) J_0(\infty_p)} \quad (II.8)$$

$$F_n(x^*) = \cos \alpha_n x^* + \frac{B_{i0}}{\alpha_n} \sin \alpha_n x^* \quad (II.9)$$

$$G_p = J_0\left(\frac{x_p r^*}{R^*}\right) \quad (II.10)$$

$$v_{np} = \alpha_n^2 + \frac{\infty_p^2}{R^{*2}} \quad (II.11)$$

Où α_0 et ∞_p sont respectivement solutions des équations transcendentes :

$$\text{Tng}\alpha = \frac{\alpha(B_{i0} + B_{ie})}{(\alpha^2 - B_{i0}B_{ie})} \quad (II.12)$$

$$\infty J_1(\infty) = B_{i0} R^* J_0(\infty) \quad (II.13)$$

Où J_0 et J_1 sont les fonctions de Bessel de première espèce d'ordre 0 et 1.

Les variables réduites sont définies par :

$$x^* = \frac{x}{e} \qquad r^* = \frac{r}{e} \qquad R^* = \frac{R}{e} \qquad (II.14)$$

Nombre de fourrier: $t^* = \frac{at}{e}$;

Température réduite : $\theta^* = \frac{\rho c e (T-T_0)}{Q}$;

Nombre de Biot face avant : $B_{i_0} = \frac{h_0 e}{\lambda}$;

Nombre de Biot face arrière: $B_{i_e} = \frac{h_e e}{\lambda}$;

Nombre de Biot face latérale: $B_{i_r} = \frac{h_r e}{\lambda}$.

Le thermogramme étant relevé en un point $x=e$ ($x^*=1$) la température en ce point apparaît sous forme:

$$\theta^*(1, r^*, t^*) = \sum_n \sum_p f(B_{i_0}, B_{i_e}, B_{i_r}, r^*, R^*) \exp(-v_{np} t^*) \qquad (II.15)$$

Cette relation dépend alors de cinq paramètres : $B_{i_0}, B_{i_e}, B_{i_r}, r^*, R^*$

Les deux paramètres géométriques peuvent être mesurés en pratique. S'il n'existe pas de difficulté particulière pour R^* , il n'en est pas de même pour r^* , qui correspond à la position du thermomètre et dont la valeur précise reste inconnue.

En effet, il n'est pas possible de confronter directement les thermogrammes expérimentaux aux courbes théoriques. Il devient alors nécessaire de comparer des courbes normalisées issues du modèle [17].

$$\frac{\theta^*}{\theta^*_{max}} = f^*(t^*) \qquad (II.16)$$

Où θ^*_{max} est la température réduite maximale.

Avec les thermogrammes expérimentaux normalisés :

$$\frac{T-T_0}{T_{max}-T_0} = f(t) \qquad (II.17)$$

Où T_{max} est la température maximale atteinte.

Nous introduisons le temps particulier t_{α}^* ; correspondant à α fois l'élévation maximale de température, réduite (θ_{\max}^*) et à partir de rapport de temps $\frac{t_{\alpha}^*}{t_{5/6}^*}$ calculés à partir du modèle et des rapports de temps expérimentaux. Nous avons :

$$t'_{1/3} = \frac{t_{1/3}^*}{t_{5/6}^*} = \frac{t_{1/3}}{t_{5/6}} f(t_{5/6}^*) \quad (\text{II.18})$$

$$t'_{1/2} = \frac{t_{1/2}^*}{t_{5/6}^*} = \frac{t_{1/2}}{t_{5/6}} f(t_{5/6}^*) \quad (\text{II.19})$$

$$t'_{2/3} = \frac{t_{2/3}^*}{t_{5/6}^*} = \frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} f(t_{5/6}^*) \quad (\text{II.20})$$

La diffusivité est alors donnée par : $a = \frac{a1+a2+a3}{3}$

Avec :

$$a1 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} (1,15t_{5/6} - 1.25 t_{2/3}) \quad (\text{II.21})$$

$$a2 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} (0.761t_{5/6} - 0.926 t_{1/2}) \quad (\text{II.22})$$

$$a3 = \frac{e^2}{t_{5/6}^2} (0.618t_{5/6} - 0.862 t_{1/3}) \quad (\text{II.23})$$

Conclusion

La détermination des propriétés thermophysiques des matériaux peut se faire selon plusieurs méthodes expérimentales. Certains utilisent le régime permanent, caractérisé par une température stable dans le temps, tandis que d'autres exploitent le régime transitoire, où la température varie avec le temps. Ces méthodes permettent de déterminer des grandeurs telles que la diffusivité thermique, la conductivité thermique et d'autres propriétés importantes.

Dans notre travail nous avons choisi la méthode des boites qui permet de la mesure en régime permanent et transitoire pour déterminer la conductivité et la diffusivité thermique de notre matériau.

CHAPITRE III : Etude expérimentale des propriétés thermophysiques d'un matériau de construction.

Introduction

De nombreuses méthodes expérimentales permettent d'évaluer les propriétés thermophysiques. Parmi celles-ci, la méthode des boîtes a été retenue pour sa simplicité de mise en œuvre et sa fiabilité. Ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux employés pour concevoir les échantillons analysés dans le cadre de notre étude. Les choix des matériaux ont été faits en tenant compte de leurs propriétés spécifiques et de leur disponibilité. Par ailleurs, il décrit les campagnes de mesures expérimentales menées pour déterminer les propriétés thermophysiques. Ces campagnes ont été réalisées dans des conditions contrôlées afin de garantir la précision des résultats obtenus. L'ensemble de ces démarches vise à assurer une meilleure compréhension du comportement thermique des matériaux étudiés.

III.1. Présentation des matériaux étudiés

Le choix des matériaux utilisés dans le domaine de la construction constitue une solution essentielle pour réduire la consommation d'énergie, en raison de leur rôle crucial dans l'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments. De nos jours, une large gamme de matériaux, qu'ils soient traditionnels ou innovants, est disponible à cet effet. Parmi les matériaux modernes les plus couramment utilisés, le « mortier » occupe une place importante grâce à ses multiples propriétés et à la possibilité d'améliorer ses performances par l'ajout de certains composants.

Dans ce contexte, notre étude s'est focalisée sur l'incorporation de « billes de polystyrène ». Dans la composition du mortier. L'objectif est d'analyser l'effet de cet ajout sur les propriétés thermophysiques du matériau, telles que la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la densité et la capacité thermique. Ces modifications visent à concevoir un mortier à meilleur pouvoir isolant, contribuant ainsi à une réduction significative des besoins énergétiques dans les bâtiments et à une amélioration globale de leur performance thermique. Le mortier est un mélange composé d'un liant (comme le ciment ou la chaux), de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Il sert à lier, sceller, enduire ou réparer des éléments de construction. Il se différencie du béton par l'absence de gravillons dans sa composition [18].



FigureIII.1 : Mélange de mortier [18].

Le mortier fait partie des matériaux utilisés en construction, en raison de ses avantages techniques et économiques [18] :

- Le mortier doit bien coller aux supports (briques, pierres, etc.) pour assurer la cohésion de l'ensemble
- Il doit avoir une bonne résistance à la compression (et parfois à la traction) selon l'usage.
- Le mortier doit être facile à mélanger, appliquer et travailler.
- Il doit résister aux agressions extérieures (eau, gel, produits chimiques...) sans se détériorer.
- Il doit limiter les retraites pour éviter les fissures après durcissement.
- Il doit être compatible avec la nature et les propriétés du support (porosité, absorption...).
- Le temps de durcissement doit être adapté au rythme du chantier.
- La taille et la qualité du sable influencent la texture et la performance du mortier.
- L'eau doit être dosée avec précision pour garantir à la fois maniabilité et résistance.

III.1.1. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique obtenu par le broyage du clinker, lui-même produit par le refroidissement d'un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à une température de 1450 à 1550 °C. Il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau, en transformant une pâte initialement fluide en un solide pratiquement insoluble, grâce à l'hydratation de certains composés minéraux comme les silicates et aluminates de calcium [18].



FigureIII.2 : Le ciment [18].

III.1.2. Le sable

Le sable est le composant du squelette granulaire ayant l'influence la plus importante sur les propriétés du mortier. Il joue un rôle essentiel en limitant les variations de volume, la chaleur dégagée, ainsi que le coût de production des bétons. Il doit être propre et exempt de substances nuisibles [18].



FigureIII.3 : Echantillon de sable [18].

III.1.3. Les billes de polystyrène

Les billes de polystyrène expansé (PSE) sont de petites perles légères utilisées pour isoler les murs creux. Grâce à leur composition majoritairement faite d'air, elles assurent une isolation thermique performante. Injectées avec un liant, elles remplissent uniformément la cavité sans provoquer de ponts thermiques. Elles sont résistantes à l'humidité, stables dans le temps, recyclables, faciles à mettre en œuvre sans travaux lourds, et permettent des économies d'énergie notables à un coût accessible [19].



FigureIII.4 : Les billes de polystyrène [20].

Dans ce mémoire, la quantité de billes de polystyrène ajoutée correspond à une fraction massique de la masse totale du mortier. Les proportions de fibres (P/C) examinées sont de 0, 0,5, 1,5 et 2,5 %. La matrice utilisée est constituée de mortier de sable (0/4) et d'eau. Le tableau Présente les différents mélanges analysés.

Les échantillons testés seront référencés comme suit :

MT : Mortier de référence (sans billes de polystyrène) ;

MP : Mortier de polystyrène ;

Ciment (kg)	450			
Sable (0/4) (kg)	1350			
Eau (l)	225			
E/C	0.5			
P/C	0%	0.5%	1.5%	2.5%
Masse du polystyrène (kg)	0	2.25	6.75	11.25
Désignation	MT	MP5	MP15	MP25

Tableau III.1 : Composition des échantillons étudiés.

III.2. Mesures expérimentales

III.2.1. Mesure expérimentale de l'humidité

Dans la pratique, il existe plusieurs techniques pour mesurer la teneur en eau. Parmi celles-ci, on trouve la mesure de l'humidité par résonance magnétique (RMN), la méthode neutronique, l'absorption de particules, ainsi que les méthodes électriques.

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé la méthode des pesées successives pour mesurer l'humidité. Cette méthode consiste à immerger un échantillon dans une enceinte remplie d'eau à température ambiante, jusqu'à ce que sa masse ne change plus. Cet état correspond à l'état de saturation.

L'état sec, quant à lui, est obtenu par séchage dans une étuve ventilée jusqu'à stabilisation de la masse. Pour obtenir différentes teneurs en eau, les échantillons sont immergés dans l'eau pendant des durées déterminées [13].

- **La teneur en eau massique**

$$\omega\% = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

Avec :

m_h : Masse humide

m_s : Masse sèche

- **La teneur en eau volumique :**

$$\omega_v \% = \frac{\text{masse volumique sèche}}{1000} \times \omega$$

- **Degré de saturation :**

$$S_r = \frac{V_l}{V_p} = \frac{V_l}{\varepsilon V_a}$$

III.2.2. Mesure expérimentale des propriétés thermophysiques

III.2.2.1. Description du dispositif utilisé

La méthode des boîtes utilisée au laboratoire est un dispositif permettant de déterminer, à l'aide d'une seule cellule de mesure, l'ensemble des caractéristiques thermophysiques internes des matériaux. Cette méthode permet d'estimer la conductivité thermique des matériaux en régime permanent, en s'appuyant sur un bilan énergétique du système. La technique dite « des boîtes » se caractérise par une mise en œuvre très simple, et a été largement abordée dans plusieurs publications. La précision obtenue est comparable à celle des méthodes traditionnelles. Elle fait appel à des échantillons de dimensions significatives et présentes plusieurs atouts notables :

- Méthode rapide, offrant une bonne précision dans des conditions proches de l'usage réel,
- Possibilité de réaliser deux mesures distinctes en parallèle dans un même environnement expérimental,
- Capacité à mesurer des matériaux présentant un certain taux d'humidité,
- Compatible avec tous les types de matériaux utilisés dans les domaines industriel et du bâtiment, à l'exception des métaux, qu'ils soient sous forme solide, granulaire, pulvérulente ou liquide [21].



Figure III.5 : Cellule de mesure par la méthode des boîtes [21].

Le montage expérimental utilisé dans cette étude est composé des éléments suivants :

❖ Capacité isotherme A

Il s'agit d'une enceinte fortement isolée thermiquement à l'aide de panneaux de Styrodur. Cette enceinte représente l'ambiance froide du système, maintenue à une température constante de $T = 0 \text{ °C} \pm 0.1 \text{ °C}$. Le maintien de cette température est assuré par un échangeur thermique installé à la base de la capacité, à l'intérieur duquel circule un fluide frigorigène composé d'eau glycolée. Ce fluide est refroidi et mis en circulation à l'aide d'un cryostat.

❖ Boîtes chaudes

Ce sont des boîtes fabriquées en contreplaqué, dont l'intérieur est également isolé avec du Styrodur. Chaque boîte contient un film chauffant qui simule l'ambiance chaude. L'échantillon à tester est placé entre ces deux ambiances, c'est-à-dire entre la boîte chaude et la capacité froide.

❖ Capteurs de température

La mesure des températures est réalisée à l'aide de thermosondes en platine, réputées pour leur précision. Dans chaque boîte chaude, trois sondes sont installées : deux sondes de surface, l'une côté chaud (T_c) et l'autre côté froid (T_f) de l'échantillon ; une sonde d'ambiance intérieure, notée (T_b), placée dans l'air de la boîte. Une quatrième sonde, appelée (T_a) est commune aux deux boîtes. Elle est placée dans la pièce et mesure la température ambiante du local.

❖ Console de mesure

Il s'agit d'une centrale d'acquisition dotée de plusieurs voies de mesure (dans notre cas, 12 fils de connexion). Elle permet de collecter les données en temps réel et de les visualiser directement sur des afficheurs numériques intégrés.

❖ Échantillons

Les échantillons testés doivent avoir une forme parallélépipédique à base carrée, avec des dimensions précises : 27 cm de côté pour la base et une épaisseur variante entre 2 cm et 7 cm. Chaque échantillon dispose naturellement d'une face exposée à la chaleur (face chaude) et d'une face exposée au froid (face froide), permettant l'étude du comportement thermique du matériau placé entre les deux ambiances [13].

III.2.2.2. Détermination expérimentale de la conductivité thermique

La méthode des boîtes, est une méthode de mesure la conductivité thermique en régime permanent. Une fois l'état stationnaire atteint, le système reçoit l'énergie (\dot{q}) fournie par

dissipation thermique dans la résistance par effet de Joule, cette énergie est dissipée en partie à travers les parois de la boîte (\dot{q}_1), et à travers l'échantillon (\dot{q}_2). On obtient donc :

$$\dot{q} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad (\text{III.1})$$

➤ La puissance émise par le film :

$$\dot{q} = \frac{V^2}{R} \quad (\text{III.2})$$

➤ La puissance échangée entre l'intérieur et l'extérieur de la boîte :

$$\dot{q}_1 = C(T_b - T_a) \quad (\text{III.3})$$

➤ Le flux de conduction à travers l'échantillon :

$$\dot{q}_2 = \frac{\lambda s}{e} (T_c - T_f) \quad (\text{III.4})$$

Cela permet de déduire que :

$$\lambda = \frac{e}{s(T_c - T_f)} (C(T_b - T_a)) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

C : Coefficient global de déperdition thermique de la boîte [W/K] ;

S : surface utile de l'échantillon [m²] ;

V : Tension appliquée aux bornes de la résistance [V] ;

R : valeur de la résistance chauffante [Ω] ;

e : épaisseur de l'échantillon [m].

III.2.2.3. Détermination expérimentale de la diffusivité thermique

Le dispositif expérimental employé pour mesurer la diffusivité thermique est similaire à celui décrit précédemment (Fig. III.3), à la différence près que les parois internes de la boîte B sont réfléchissantes, et que l'intérieur du couvercle est équipé d'une source de rayonnement thermique (lampe à incandescence de 1000 W). L'échantillon, de forme parallélépipédique, est placé à l'intérieur de la boîte B. Un minuteur permet de contrôler avec précision la durée d'activation de la lampe. Cette durée dépend de l'épaisseur de l'échantillon ainsi que de la nature du matériau [23][13].

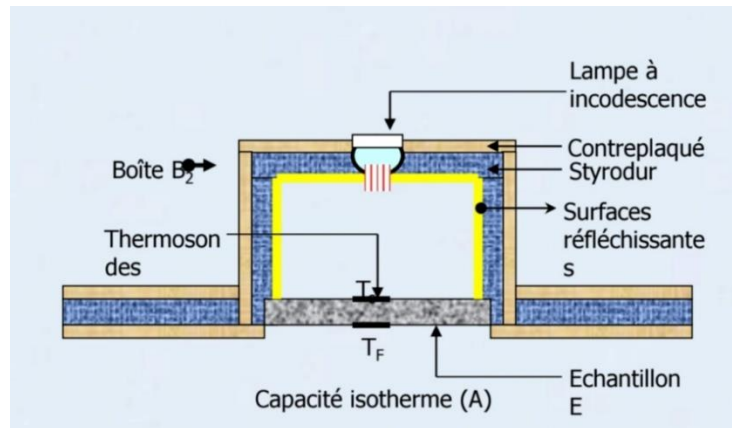


Figure III.6 : Coupe d'une boîte pour mesures de diffusivité thermique et position du Flash [23].

La détermination de la diffusivité thermique s'effectue par l'interprétation du thermogramme enregistré sur la face opposée à l'irradiation, en appliquant le modèle théorique de Dégiovanni.

Conclusion

La connaissance des paramètres thermo physiques des matériaux constitue aujourd'hui une exigence essentielle dans le domaine du développement, notamment en ce qui concerne la conception et la réalisation d'infrastructures performantes. Ces données permettent en effet d'optimiser le choix des matériaux en fonction de leurs capacités d'isolation thermique et de leur comportement face aux variations de température.

Le recours à la méthode des boîtes a été retenu non seulement en raison de ses avantages techniques tels que la simplicité de mise en œuvre, la fiabilité et la précision des mesures mais aussi parce que ce dispositif est disponible au sein de notre laboratoire. Cette disponibilité a grandement facilité la réalisation des essais expérimentaux, en permettant des mesures efficaces et maîtrisées des propriétés thermophysiques des échantillons étudiés.

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

Introduction

Le comportement hygrothermique des matériaux de construction suscite un intérêt croissant, notamment pour améliorer l'isolation des bâtiments. Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus sur les échantillons testés : masse volumique, conductivité et diffusivité thermiques, ainsi que les valeurs calculées de la résistance thermique et de l'effusivité thermique.

IV.1. Masse volumique

Les résultats expérimentaux relatifs à l'évolution de la masse volumique en fonction du pourcentage de billes de polystyrène incorporées dans les échantillons sont présentés dans le tableau IV.1 :

<i>Désignation</i>	<i>MT</i>	<i>MP5</i>	<i>MP15</i>	<i>MP25</i>
ρ (kg/m ³)	2167	2008	1722	1421
ρ / ρ_{MT} (%)	100	93	79	66

Tableau IV.1 : Masse volumique des échantillons de mortier de polystyrène.

On remarque une diminution de la masse volumique à mesure que le pourcentage de polystyrène augmente, ce qui indique une relation inverse entre ces deux paramètres. En effet, l'ajout de 0.5 % de polystyrène fait passer la masse volumique de 2167 kg/m³ à 2008 kg/m³ ce qui correspond à une diminution de 7%. De même, pour un ajout de 1.5 %, elle chute de 2008kg/m³ à 1722 kg/m³ ce qui correspond à une diminution de 14 % et pour 2.5 % nous remarquons une diminution significative, elle atteint 1421 kg/m³ ce qui correspond à une diminution de 17%. Cette diminution s'explique par le fait que plus on ajoute de polystyrène, plus le matériau devient léger, en raison de la très faible densité du polystyrène, ce qui réduit la masse volumique globale du mélange. De plus, l'effet du diamètre des billes de polystyrène est également clairement perceptible (figure IV.1), où on remarque une diminution systématique de la masse volumique des mortiers allégés à mesure que le pourcentage de billes de polystyrène augmente, pour un même taux d'incorporation, les mortiers contenant des billes de 4 mm présentent une masse volumique plus faible que ceux contenant des billes de 2,5 mm ou 1.5mm. Cela est dû à la capacité accrue des grosses billes à générer des vides plus importants dans la matrice, augmentant ainsi la porosité globale du matériau. En résumé, la double influence du pourcentage et du diamètre des billes de polystyrène agit en synergie pour diminuer la masse volumique. Ce comportement représente un avantage important dans la

conception de matériaux de construction allégés, visant à améliorer les performances thermiques tout en réduisant la charge structurelle.

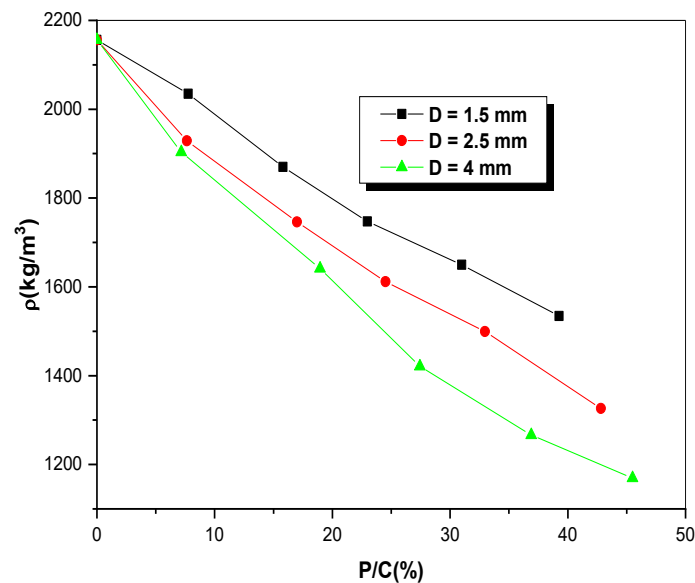


Figure IV.1 : Variation de la masse volumique en fonction du diamètre de billes de polystyrène.

IV.2. Conductivité thermique

IV.2.1. Influence de la teneur en eau

Les résultats de mesure de la conductivité thermique apparente des mortiers contenant du polystyrène, en fonction de la teneur en eau volumique, sont illustrées dans la figure IV.2. On observe, pour l'ensemble des formulations (MT, MP5, MP15 et MP25), une augmentation progressive de la conductivité thermique avec l'élévation de la teneur en eau. Cette tendance s'explique par le fait que l'eau a une conductivité thermique plus élevée que celle de l'air, et comme l'eau remplace l'air dans les pores au cours de l'humidification, il s'ensuit une augmentation de la conductivité thermique du mortier. Nous pouvons remarquer aussi que l'allure de toutes les courbes est similaire, et pour bien analyser l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau, nous prendrons le cas des échantillons MT (figure IV.3.a) et MP25 (figure IV.3.b). L'analyse de ces graphes permet de distinguer trois domaines principaux :

- Domaine à faible teneur en eau : ($0\% < \omega_v < 4\%$), la conductivité thermique augmente légèrement parce que le matériau reste majoritairement sec et l'air occupe encore la plupart des pores, limitant ainsi l'impact de l'humidité.
- Domaine à moyenne teneur en eau : ($4\% < \omega_v < 10\%$), la conductivité thermique croît plus rapidement, car l'eau commence à occuper une part significative de la porosité, réduisant l'efficacité thermique, surtout dans les mortiers allégés.
- Domaine à très forte teneur en eau : ($10\% < \omega_v < 16\%$), les valeurs de conductivité thermique atteignent un plateau élevé, signe que le matériau est proche de la saturation.

Par ailleurs, l'introduction de billes de polystyrène entraîne une diminution notable de la conductivité thermique à toutes les teneurs en eau, en raison de la faible conductivité thermique du polystyrène et de l'allègement global de la structure du mortier. Ainsi, le mortier (MT) présente les valeurs de conductivité thermique les plus élevées, tandis que le mortier contenant 2.5 % de polystyrène (MP25) affiche les plus faibles. Ce comportement met en évidence non seulement l'intérêt des billes de polystyrène pour améliorer l'isolation thermique des mortiers, mais aussi la nécessité de maîtriser la teneur en eau pour préserver leurs performances thermiques.

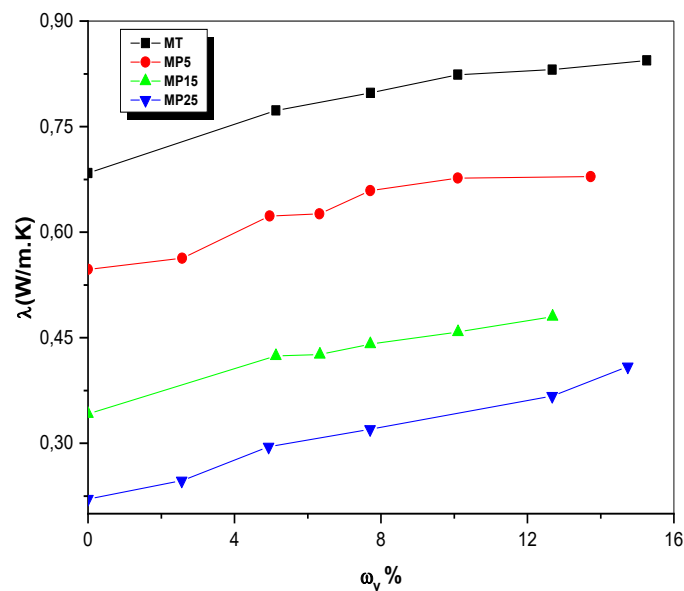


Figure IV.2 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau.

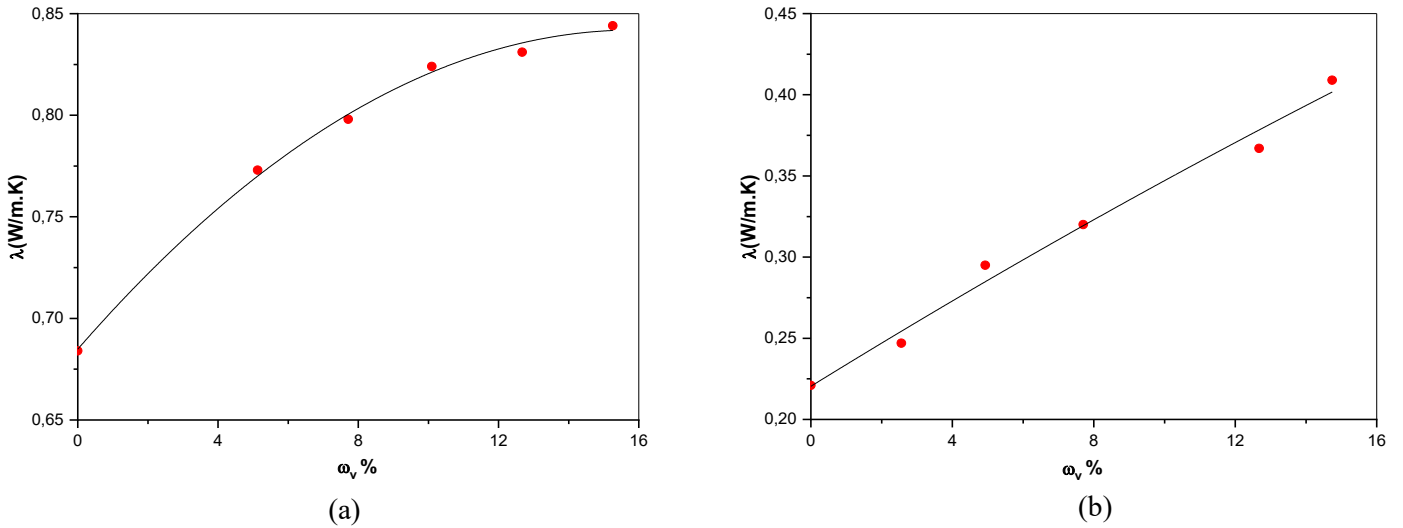


Figure IV.3 : Variation de la conductivité thermique de l'échantillon MT (a) et de l'échantillon MP25 (b) en fonction de la teneur en eau.

IV.2.2. Influence de la masse volumique

Dans ce qui suit, nous mettons en évidence l'influence de la masse volumique sur la conductivité thermique des échantillons testés. Les résultats correspondants sont rassemblés dans le tableau IV.2 et représentés graphiquement dans la figure IV.5 :

Désignation		MT	MP5	MP15	MP25
ρ (kg /m ³)		2167	2008	1722	1421
λ (W/m.K)	λ_{sec}	0.684	0.547	0.342	0.221
	λ_{sat}	0.844	0.679	0.480	0.409

Tableau IV.2 : Conductivité thermique à l'état sec et saturé en fonction de la masse volumique.

Les mesures de la conductivité thermique des échantillons élaborés à base de mortier ainsi que ceux à mortier de polystyrène à pourcentages différents montrent clairement l'influence de la masse volumique sur le pouvoir isolant de ces trois échantillons (MT, MP5, MP15 et MP25). On observe globalement une augmentation de la conductivité thermique avec l'augmentation de la masse volumique, aussi bien pour les échantillons secs que saturés. Cette augmentation

s'explique par le fait que les matériaux les plus denses possèdent une structure plus compacte et plus continue, ce qui entraîne une diminution de la proportion de pores remplis d'air. De plus, à densité constante, les valeurs de conductivité thermique mesurées à l'état saturé sont plus élevées que celles mesurées à l'état sec. Ce phénomène est attribué à la substitution de l'air ($\lambda \approx 0,026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) dans les pores par de l'eau ($\lambda \approx 0,6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), ce qui augmente significativement la conductivité thermique globale du matériau. Par exemple, pour une masse volumique de 2200 kg/m^3 , la conductivité thermique passe d'environ $0,65 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ à l'état sec à près de $0,85 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ à l'état saturé, soit une augmentation d'environ 30 %. Cela souligne l'importance du choix de la formulation et du contrôle des conditions d'humidité pour optimiser le comportement thermique selon l'usage souhaité

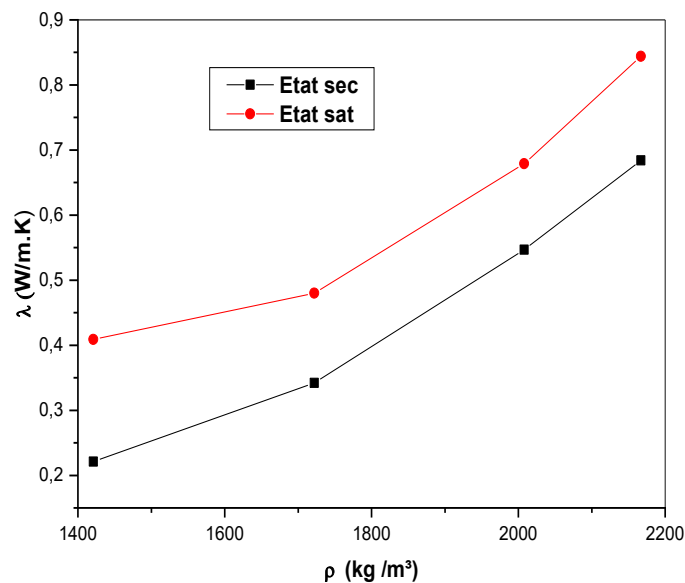


Figure IV.4 : Variation de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique.

IV.2.3. Influence du dosage de polystyrène

La figure IV.5 présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction du pourcentage de polystyrène ajouté au mortier. Cette courbe met en évidence l'effet significatif du dosage en billes de polystyrène sur les performances thermiques du matériau, où l'examen de ces résultats indique que la conductivité thermique décroît en fonction de l'augmentation du dosage de polystyrène, et il est clair que la conductivité thermique à l'état saturé est supérieure à celle de l'état sec. Cela s'explique par le fait que l'ajout progressif de billes de polystyrène réduit la conductivité thermique du mortier, grâce à leur nature isolante, leur faible densité et leur capacité à introduire de l'air, ce qui améliore les performances thermiques du matériau

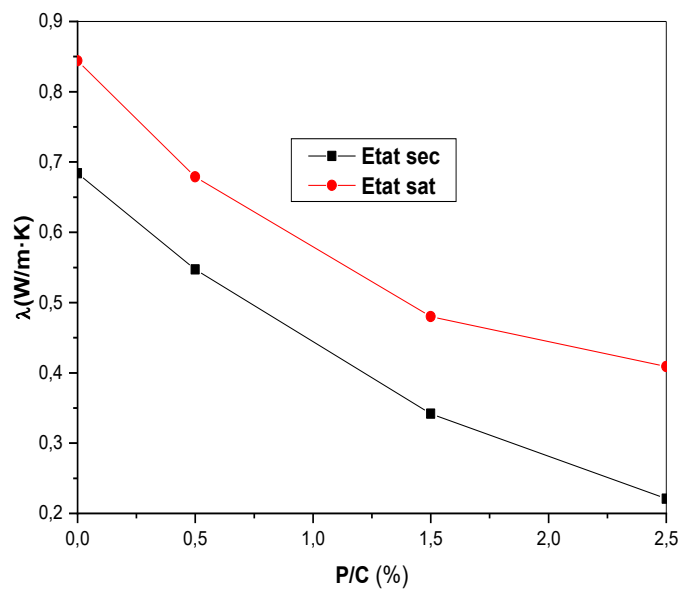


Figure IV.5 : Variation de la conductivité thermique en fonction du dosage de polystyrène.

IV.2.4. Influence du diamètre de billes de polystyrène

Les graphes représentant la variation de la conductivité thermique des échantillons testés pour différents diamètres de billes de polystyrène fournis par la figure IV-6.

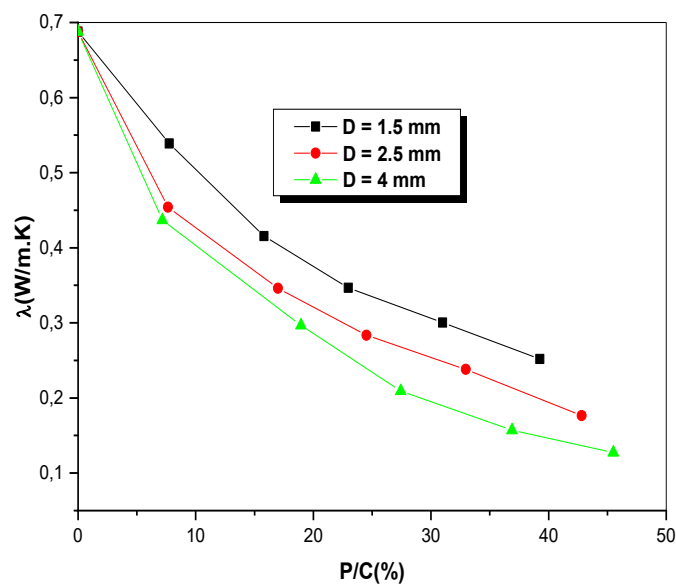


Figure IV.6 : Variation de la conductivité thermique en fonction du diamètre de billes de polystyrène.

Il apparaît clairement que la conductivité thermique diminue nettement avec l'augmentation du diamètre de billes tel que les échantillons à plus grand diamètre de billes de polystyrène présentent des valeurs plus faibles de conductivité et ce pour tous les dosages de polystyrène. Ce comportement est attribué à la nature isolante du polystyrène, qui contient des vides d'air limitant le transfert thermique ; soulignant l'effet bénéfique de la taille des billes de polystyrène sur les performances thermiques du matériau.

IV.3. Diffusivité thermique

Dans cette section, nous exposons les résultats relatifs à la diffusivité thermique des matériaux analysés, en suivant la même méthodologie que celle utilisée pour l'étude de la conductivité thermique.

IV.3.1. Influence de la teneur en eau

Les résultats obtenus concernant la diffusivité thermique des divers mortiers de polystyrène, en fonction de la teneur en eau volumique, sont présentés dans la figure IV.7 :

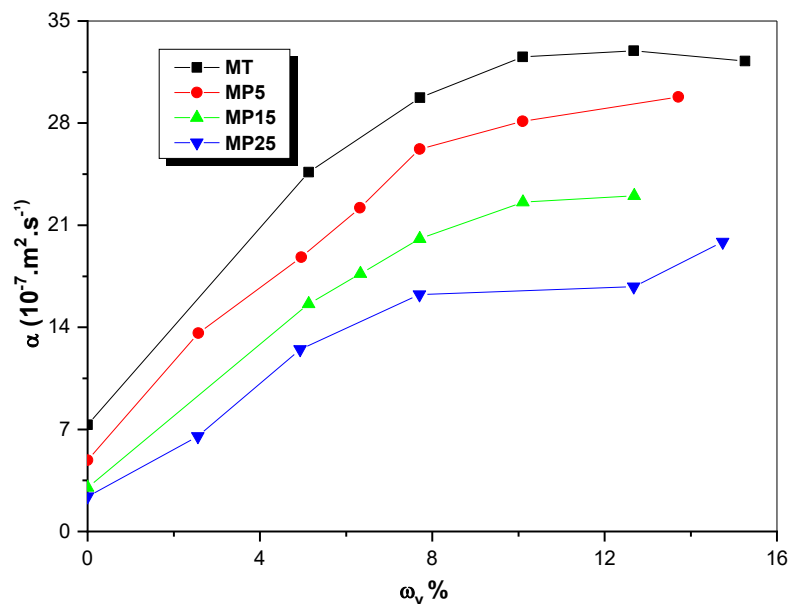


Figure IV.7 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la teneur en eau.

Les courbes obtenues présentent une forme générale très proche de celle observée pour la conductivité thermique, indiquant une augmentation de la diffusivité thermique avec l'accroissement de la teneur en eau. Cette évolution s'explique par la présence de l'eau dans les pores du matériau, qui facilite la transmission de l'énergie thermique en remplaçant l'air, moins conducteur. Pour le mortier témoin (MT), cette augmentation est marquée et continue sur toute

la plage de teneur en eau étudiée, atteignant un maximum d'environ $31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Toutefois, pour les formulations contenant du polystyrène, notamment MP15 et MP25, la croissance de la diffusivité thermique est moins significative. Cela s'explique par le caractère isolant du polystyrène, sa faible conductivité thermique ainsi que sa capacité à introduire de l'air dans la matrice du mortier, réduisant ainsi la propagation de la chaleur.

IV.3.2. Influence de la masse volumique

Le tableau IV.3 ainsi que la figure IV.8 présentent les résultats expérimentaux illustrant l'évolution de la diffusivité thermique en fonction de la masse volumique pour deux états hygrométriques distincts du matériau : l'état sec) et l'état saturé.

Désignation		MT	MP5	MP15	MP25
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$		2167	2008	1722	1421
$\alpha \text{ (} 10^{-7} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$\alpha \text{ sec}$	7.308	4.887	3.022	2.396
	$\alpha \text{ sat}$	32.965	29.788	23.024	19.859

Tableau IV.3 : Diffusivité thermique des échantillons étudié.

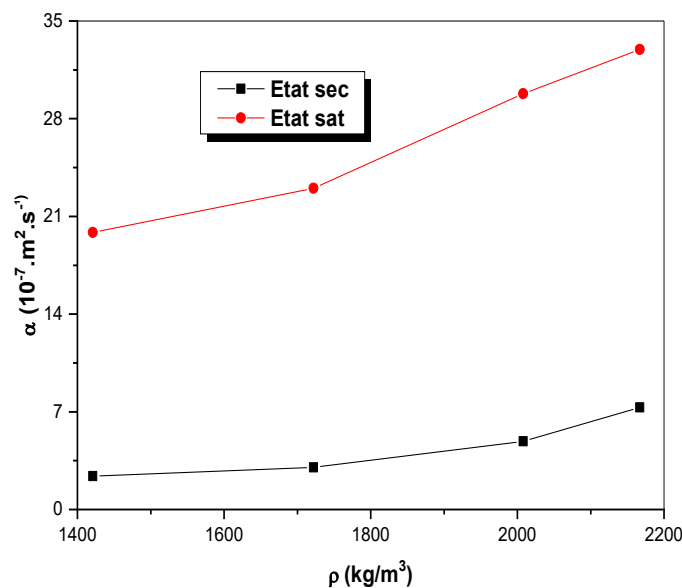


Figure IV.8 : Variation de la diffusivité thermique en fonction de la masse volumique.

L'analyse de ces résultats met en évidence une augmentation globale de la diffusivité thermique en fonction de la masse volumique, aussi bien à l'état sec qu'à l'état saturé. Cette tendance traduit l'influence directe de la densité du matériau sur sa capacité à diffuser la chaleur. Plus la masse volumique est élevée, plus la structure du matériau est compacte, favorisant ainsi un meilleur transfert thermique. On observe également que cette augmentation de la diffusivité est beaucoup plus marquée à l'état saturé, en raison de la présence d'eau dans les pores, qui possède une conductivité thermique plus élevée que l'air. Ainsi, la diffusivité thermique croît d'autant plus que la masse volumique est importante, et cet effet est amplifié en milieu saturé

IV.3.3. Influence du dosage de polystyrène

L'influence de l'incorporation des billes de polystyrène sur la diffusivité thermique du mortier étudiée, sont représentés dans la figure IV.9

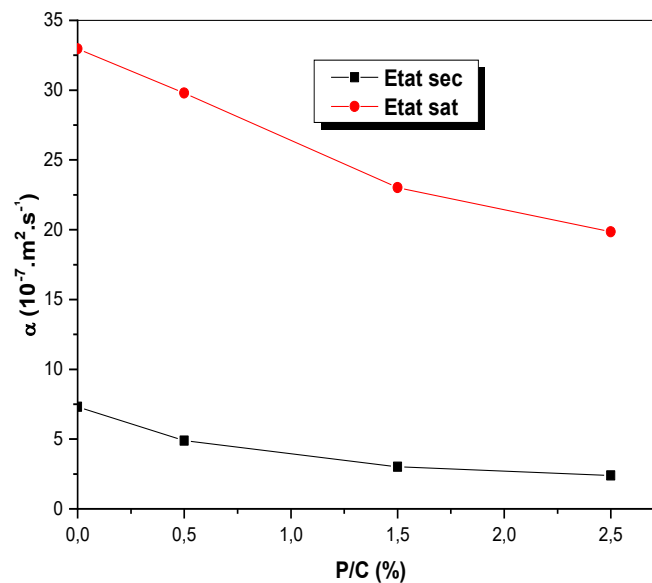


Figure IV.9 : Variation de la diffusivité thermique en fonction du dosage de polystyrène.

On observe tout d'abord que, pour les deux états, la diffusivité thermique décroît de manière continue avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène. Cette diminution peut s'expliquer par la faible conductivité thermique intrinsèque du polystyrène, qui agit comme un isolant thermique au sein de la matrice. Ainsi, plus le dosage de polystyrène est élevé, plus la capacité du matériau à transmettre la chaleur diminue. La comparaison entre les deux courbes montre un écart significatif entre les valeurs de diffusivité thermique en état sec et en état saturé. Pour un même pourcentage de polystyrène, la diffusivité thermique est systématiquement plus élevée en état saturé. Cela peut être attribué à la présence d'eau dans les pores du matériau, qui

améliore la transmission de la chaleur. De plus, la pente de décroissance est plus marquée pour l'état saturé que pour l'état sec. Cela signifie que l'impact du polystyrène sur la diffusivité thermique est plus significatif en présence d'eau. Cette observation suggère que l'effet isolant du polystyrène est accentué lorsqu'il est combiné avec une phase fluide, probablement en raison d'une modification de la structure poreuse ou d'une altération du comportement de l'eau dans le matériau.

IV.3.4. Influence du diamètre de billes de polystyrène

La figure IV.12 présente l'évolution de la diffusivité thermique en fonction du pourcentage de billes de polystyrène incorporées dans le mortier, pour trois diamètres distincts : 1.5 mm, 2.5 mm et 4 mm. Il apparaît nettement une diminution de la diffusivité thermique avec l'augmentation de diamètre de billes de polystyrène. Plus précisément, les échantillons contenant des billes de 4 mm présentent les valeurs de diffusivité les plus faibles pour un même pourcentage de polystyrène. Cela peut s'expliquer par la formation de zones plus importantes de discontinuité thermique autour des grosses billes, perturbant davantage le transfert de chaleur. A partir d'un certain seuil ($P/C > 20\%$), les courbes tendent à se rapprocher, ce qui suggère que l'effet du diamètre devient moins significatif à haute teneur en polystyrène, où le comportement thermique global est surtout régi par la présence dominante de la phase isolante.

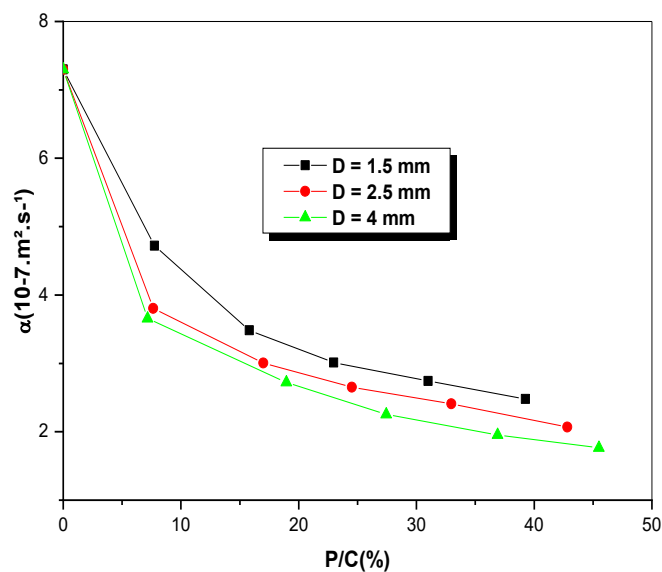


Figure IV.10 : Variation de la diffusivité thermique en fonction diamètre de billes de polystyrène.

IV.4. Résistance thermique

Nous présentons dans cette partie, les résultats concernant la résistance thermique des matériaux étudiés.

IV.4.1. Influence de la teneur en eau

On remarque une diminution progressive de la résistance thermique en fonction de l'augmentation de la teneur en eau volumique, ce qui influe négativement sur le pouvoir isolant du matériau. Par ailleurs, on remarque que le mortier contenant 25 % de billes de polystyrène (MP25) présente la plus forte résistance thermique pour toutes les teneurs en eau testées, tandis que le mortier témoin (MT), sans polystyrène, affiche les plus faibles valeurs. Cela confirme que l'ajout de billes de polystyrène améliore considérablement les performances thermiques du mortier, bien que cet effet soit atténué en milieu humide.

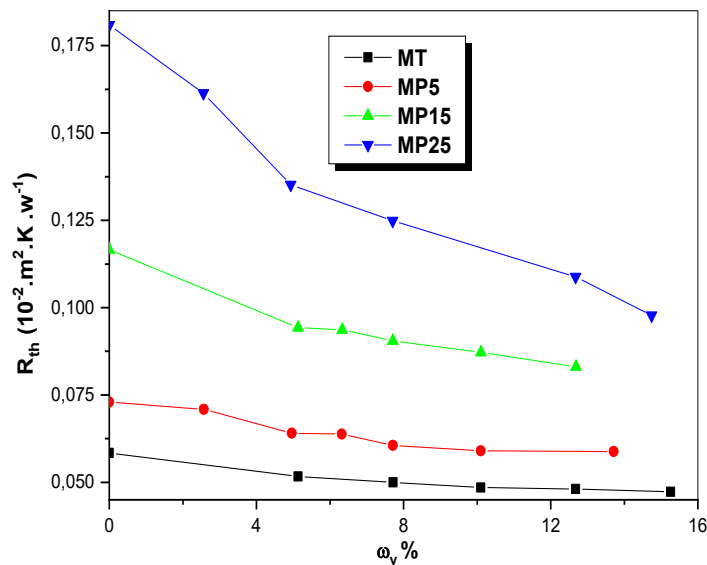


Figure IV.11 : Variation de la résistance thermique en fonction de la teneur en eau.

IV.4.2. Influence du diamètre de billes de polystyrène

Afin d'analyser l'effet du diamètre des billes de polystyrène sur la résistance thermique du matériau, nous présentons la variation de en fonction du rapport pour différents diamètres.

Il apparaît nettement une augmentation de la résistance thermique avec l'augmentation du rapport P/C, et ce pour tous les diamètres étudiés. Toutefois, cette augmentation est plus marquée pour les diamètres plus grands. En effet, les échantillons contenant des billes de 4 mm présentent les valeurs de résistance thermique les plus élevées, suivis par ceux de 2.5 mm puis de 1.5 mm. Ceci s'explique par le fait que les billes de plus grand diamètre engendrent une

structure plus poreuse, piégeant davantage d'air, ce qui améliore les propriétés isolantes du matériau. Ainsi, l'augmentation du diamètre des billes contribue significativement à l'amélioration du pouvoir isolant du mortier allégé.

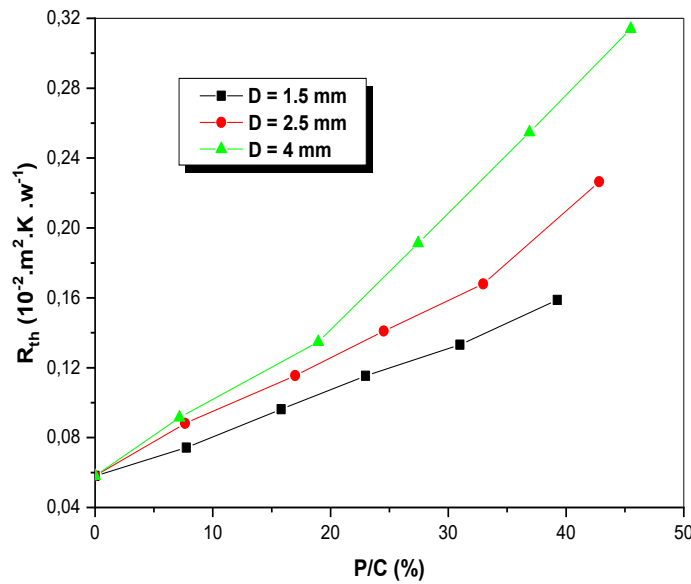


Figure IV.12 : Variation de la résistance thermique en fonction du diamètre de billes de polystyrène.

IV.5. Effusivité thermique

Un autre paramètre qui permet de caractériser les propriétés thermique des matériaux est l'effusivité thermique qui représente la capacité d'un matériau à résister (en température) à une perturbation

IV.5.1. Influence de la masse volumique

Les courbes de la figure IV.13 montre clairement que l'effusivité thermique augmente avec l'accroissement de la masse volumique, que ce soit à l'état sec ou saturé. Cette tendance s'explique par le fait que l'effusivité thermique dépend directement de la densité du matériau. Plus le matériau est dense, plus sa capacité à échanger de la chaleur avec son environnement est élevée. On remarque également que, pour une même valeur de masse volumique, les valeurs d'effusivité thermique à l'état saturé sont inférieures à celles à l'état sec. Cela peut sembler contre-intuitif, mais s'explique par la diminution de l'effusivité thermique liée à la présence d'eau, qui ralentit le transfert de chaleur dans le matériau.

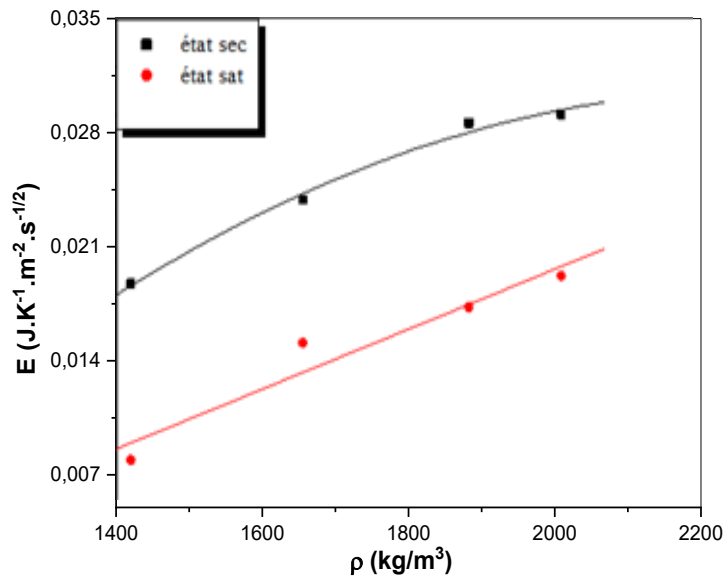


Figure IV.13 : Variation de l'effusivité thermique en fonction de la masse volumique.

IV.5.2. Influence du dosage de polystyrène

Afin d'analyser le comportement thermophysique des matériaux composites en fonction de leur composition, la figure IV.14 illustre l'évolution de l'effusivité thermique en fonction du pourcentage de polystyrène, à l'état sec et à l'état saturé.

L'analyse de cette courbe permet de démontrer que l'augmentation du pourcentage de polystyrène diminue l'effusivité thermique du matériau, avec un effet plus marqué à l'état sec. Cette décroissance peut s'expliquer par la faible effusivité thermique intrinsèque du polystyrène par rapport aux autres constituants du matériau. En effet, en augmentant la teneur en polystyrène, on introduit davantage de matière à faible conductivité thermique et à faible capacité thermique massique, ce qui entraîne une baisse globale de l'effusivité du composite.

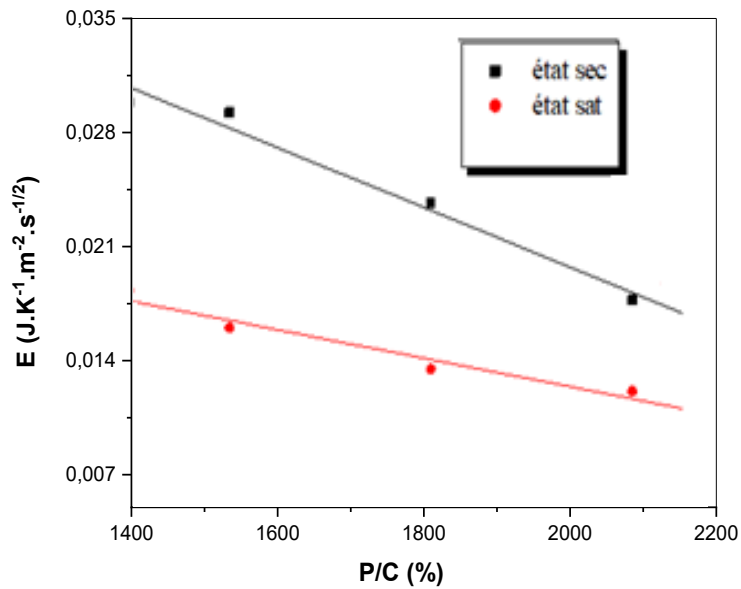


Figure IV.14 : Variation de l’effusivité thermique en fonction du dosage de polystyrène.

IV.5.3 Influence du diamètre de billes de polystyrène

Afin de mieux comprendre l’impact de la granulométrie des billes de polystyrène sur les propriétés thermophysiques, nous présentons ci-dessous l’évolution de l’effusivité thermique en fonction du pourcentage de polystyrène pour différents diamètres.

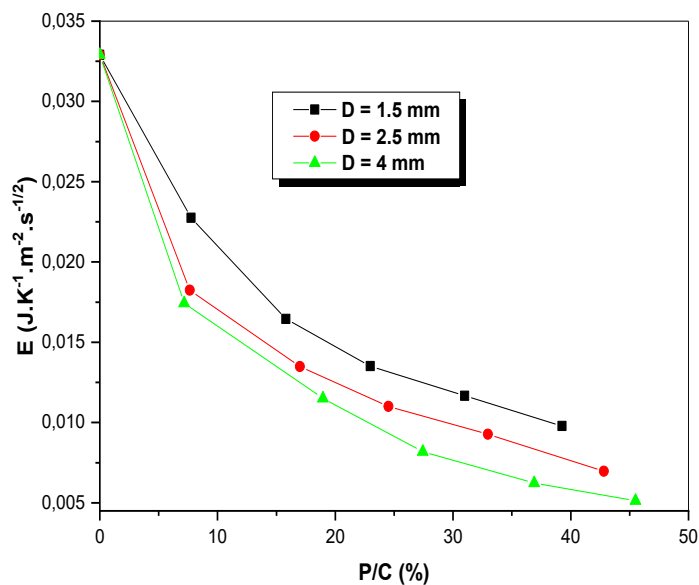


Figure IV.15 : Variation de l’effusivité thermique en fonction du diamètre billes de polystyrène.

On observe de manière générale un décroissement de l'effusivité thermique avec l'augmentation du diamètre quel que soit le diamètre le dosage du polystyrène. Cette diminution est attribuée à la réduction de la conductivité thermique induite par l'incorporation des billes de polystyrène, connues pour leur faible conductivité thermique, aussi les billes de plus grand diamètre créent des zones de discontinuités thermiques plus importantes, ce qui limite davantage le transfert de chaleur dans le matériau. Ainsi, les échantillons contenant des billes de 4 mm présentent les valeurs les plus faibles d'effusivité thermique, traduisant un meilleur pouvoir isolant. Ce comportement met en évidence l'intérêt de l'optimisation de la taille des inclusions dans la formulation des matériaux isolants à base de mortier allégé.

Conclusion

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce travail démontrent clairement l'influence des paramètres physiques et microstructuraux sur les performances thermiques du mortier modifié par des billes de polystyrène.

L'humidité se révèle être un facteur déterminant dans le comportement thermique du matériau, une faible teneur en eau entraîne une diminution de la résistance thermique. Ainsi, plus l'humidité est élevée, plus la résistance thermique diminue, réduisant l'efficacité isolante du mortier.

Par ailleurs, le diamètre des billes de polystyrène influe directement sur la résistance thermique, les échantillons contenant des billes de plus grand diamètre (4 mm) présentent une résistance thermique plus élevée que ceux intégrant des billes plus petites (1.5 mm ou 2.5 mm), en raison d'une structure plus poreuse et moins dense, ce qui limite le transfert thermique.

Concernant l'effusivité thermique, il a été observé qu'elle diminue avec la masse volumique, ce qui est cohérent avec le caractère léger du mortier modifié. De plus, une augmentation du pourcentage de billes de polystyrène réduit également l'effusivité, en diminuant simultanément la densité et la capacité du matériau à absorber la chaleur. Le diamètre des billes joue aussi un rôle, les billes plus grosses accentuent la porosité, réduisant ainsi l'effusivité thermique. Ce comportement confirme le caractère plus isolant du mortier à structure plus ouverte.

En somme, l'optimisation de la performance thermique du mortier passe par un contrôle précis de la teneur en eau, du diamètre des billes, et de leurs pourcentages. Ces paramètres permettent de moduler la conductivité, la résistance et l'effusivité thermiques, en vue d'adapter le matériau aux exigences de l'isolation thermique dans le bâtiment.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générales

Actuellement, le secteur du bâtiment est l'un des plus grands consommateurs d'énergie dans le monde. Il devient donc essentiel d'améliorer la performance thermique des matériaux utilisés dans la construction. Le mortier, largement utilisé pour ses propriétés mécaniques, peut être modifié afin d'améliorer ses qualités isolantes.

Dans notre travail, nous avons étudié un mortier allégé par l'ajout des billes de polystyrène, un matériau léger et isolant. L'objectif principal était de caractériser les propriétés thermophysiques de ce mortier à travers une série de mesures expérimentales.

Un travail expérimental a été mis en place pour évaluer la conductivité thermique, la diffusivité thermique, en fonction de plusieurs paramètres : la masse volumique, la teneur en eau, le taux de polystyrène ainsi que le diamètre des billes, tandis que la résistance thermique et l'effusivité thermique sont évaluées par calcul.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer plusieurs conclusions scientifiques importantes :

- L'augmentation du dosage en billes de polystyrène provoque une diminution progressive de la masse volumique du mortier, ce qui améliore son pouvoir isolant.
- La présence d'eau, même en faible quantité, réduit sensiblement la capacité isolante du matériau.
- Le polystyrène a un effet bénéfique sur la réduction de la conductivité et de la diffusivité thermiques du mortier.
- L'effet du diamètre des billes n'est pas négligeable : il influence la structure interne du matériau et donc ses propriétés thermiques.
- La résistance thermique du mortier varie significativement en fonction de la teneur en eau et du diamètre des billes de polystyrène, mettant en évidence la nécessité de maîtriser ces paramètres pour optimiser les performances isolantes.
- L'effusivité thermique, quant à elle, est fortement influencée par la masse volumique, le pourcentage de polystyrène incorporé ainsi que le diamètre des billes, ce qui impacte la sensation de confort thermique du matériau.

Ce travail met en évidence l'intérêt de l'usage du polystyrène expansé comme agent d'allègement et d'amélioration thermique pour le mortier de construction. Il ouvre la voie à des matériaux plus efficaces, plus légers et mieux adaptés aux exigences de la construction durable.

Perspectives

Ce travail peut servir de base pour de futures recherches visant à développer des matériaux de construction plus performants. Il serait intéressant d'étudier :

- Le comportement à long terme de ces mortiers face aux cycles humidité-séchage ou gel-dégel ;
- La résistance mécanique de ces matériaux allégés, pour garantir un bon compromis entre isolation et performance structurelle ;
- L'intégration d'autres types de matériaux biosourcés ou recyclés en complément du polystyrène ;
- La modélisation numérique des propriétés thermophysiques, afin de prédire leur comportement dans des conditions réelles.

Ainsi, ce travail ouvre des perspectives prometteuses pour la mise au point de solutions durables et économes en énergie dans le domaine de la construction.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographiques

- [1] **Almusaw, A. M. K.** Evaluation des propriétés thermiques et mécaniques du mortier de ciment contenant des déchets de polystyrène expansé. *Journal of Bulding Engineering*, 43, 102874, (2021).
- [2] **Shabbar, R., Almusawi, A. M., & Taher, J.K.** Investigation into the mechanical and thermal properties of lightweight mortar using commercial beads or recycled expanded polysryrene. *Construction and Bulding Materials*, 406, 130641, (2024).
- [3] **Sotehi, N., TABET, I., Chaker, A.** Combined experimental and numerical characterization of thermal properties of lightweight concretes used in construction. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, Volume 42/2, pp. 245 – 258, (2018).
- [4] **Boubekeur, T.** Matériaux de construction 01. *cour* centre universitaire de Tissemsilt ,*Institu des sciences et technologies* , (2017).
- [5] **Sirat, A.** Matériaux de construction. *polycopié pédagogique*, université des sciences et technologie -Oran , (2024).
- [6] **Callister, W. D, Rethuisch, D. G.** Materials science and engineering. An introduction. *John Wiley & sons*, (2018).
- [7] **Green, D.** Matériaux de construction traditionnels ou durable : cout et performances . *Sigma earth*, (2024).
- [8] Des matériaux innovants pour la réhabilitation et renforcement des ouvrages de construction. https://www.reflexions.uliege.be/cms/c_409319/fr/des-matériaux-innovants-pour-la-rehabilitation-et-le-renfoncement-des-ouvrages-de-construction, (Consulté le 17 avril 2025).
- [9] Le choix des matériaux de construction. *Constructeurpro*, <https://www.constructeur.pro/choix-materiaux-de-construction/>, (2017).
- [10] **Oucif, M.** Etude et analyse du comportement thermophysique des structure composites. *Mémoire de master* Université de Badji Mokhtar, (2020).
- [11] Propriétés thermiques - Définition. *THERMOCONCEPT*, <https://www.thermoconcept-sarl.com/documents/proprietes-thermiques/>. (Consulté le 14 mars 2025).
- [12] Qu'est-ce que la méthode de la plaque chauffante protégée? - Linseis., <https://www.linseis.com/fr/methodes-danalyse-thermique/quest-ce-que-la-methode-de-la-plaque-chauffante-protegee/>, (2024).

Référence bibliographiques

- [13] **Geussoum, I.** Etude expérimentale des propriétés thermophysique des matériaux de construction : Ces du béton allégés avec du liège. *Mémoire de Master* Université 20 Août 1955 – Skikda, (2016).
- [14] **Bendahir, F., Elfodda, Kh.** Caractérisation thermophysiques des matériaux locaux à base d'argile. *Mémoire de Master Université*, Ahmed Draia – Adrar, (2016).
- [15] **Bendir, A. Djendli, I.** Etude des propriétés thermophysique des milieux poreux : Application aux Béton". *Mémoire de Master* Université 20 Août 1955 – Skikda, (2020).
- [16] **Aurélié, M.** Caractéristiques thermophysiques des matériaux à base d'argile: évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400 C°. *Thèse de doctorat*, Université de Limoges (2008).
- [17] **Léon, V. M.** Contribution à l'étude des caractéristiques thermophysiques des matériaux locaux : Application aux Kapok". *Thèse de doctorat*, Université Cheikh Anta Diop de Dakar (2008).
- [18] Généralités sur les mortiers (S.d). *Document technique*, à partir de fichier PDF Chapitre -I.pdf <https://dspace.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/117004/1//chapitre%20/.pdf>, (Consulté le 30 mai 2025).
- [19] Billes de polystyrène pour l'isolation de murs creux : Avantages et prix, Isolation - [expert.be](https://www.isolation-espert.be), <https://WWW.isolation-espert.be/isolation-mur-creux/billes-pse>, (Consulté le 8 juin 2025).
- [20] Quels sont EPS Perles ? Guide ultime des billes de polystyrène expansé, www.google.com, <https://www.google.com/imgres?q=billes+de+polystyr%C3%A8ne+expans%C3%A9&imgurl=http://epssole.com/wp-content/uploads/2024/04/eps-beads-for-making-food-box.webp&imgrefurl=https://epssole.com/fr/quelles-sont-eps-perles/&docid=Ry6NGq9xmrf-8M&tbnid=W0uSZIUu42d-ZM&vet=12ahUKEwjUuc2soIOAxWDTqQEHU6aBAYQM3oFCIEBEAA..i&w=800&h=800&hcb=2&ved=2ahUKEwjUuc2soIOAxWDTqQEHU6aBAYQM3oFCIEBEAA&sfr=vfe&source=sh/x/im/can/1>, (Consulté le 26 juin 2025).
- [21] **Sothi, N.** "Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation". *Thèse de doctorat*, Université Mentouri- Canstantine, (2010).
- [22] **Bessenouei, M. Z.** , Approches théoriques de la conductivité thermiques apparante du matériau composite à base de plâtre et polystyrène expansé, *Revue des Énergies renouvelables*, CDER, Algérie.

Référence bibliographiques

[23] **Bouradi, A.** Métrologie des propriétés thermophysique. *Cours*, Université Abdelmalek Essaadi
- Maroc.

ANNEXE : Milieux poreux

A.1. Définition

Un milieu poreux est un matériau solide (ou matrice) contenant des vides ou des cavités par lesquels un liquide peut circuler. Ces cavités, appelées pores, peuvent être connectées entre elles ou non. De nombreux matériaux poreux existent aussi bien dans la nature que dans l'industrie. Ce type de milieu se distingue principalement par deux propriétés microscopiques liées entre elles : la porosité et la perméabilité. Ces deux caractéristiques sont des grandeurs macroscopiques, c'est-à-dire qu'elles sont évaluées sur un volume englobant un grand nombre d'éléments microscopiques constituant le matériau poreux [23].

A.2. Exemples sur les milieux poreux

A.2.1. Milieux poreux naturels

Dans la nature, les milieux poreux les plus couramment exploités sont les roches et les sols. L'exploration géologique des sous-sols a permis de classer les différentes couches géologiques en fonction de leur perméabilité à l'écoulement des fluides. Par ailleurs, la compaction géologique peut entraîner une diminution de la porosité au sein de ces couches [23].

A.2.2. Milieux poreux techniques

Lors de la fabrication du béton et du ciment, une certaine porosité est indispensable afin de permettre un séchage lent et progressif, garantissant ainsi un matériau solide. Toutefois, cette porosité, lorsqu'elle est fine, peut parfois être accompagnée d'un réseau de microfissures qui affaiblit le béton. La porosité optimale d'un béton performant se situe généralement entre 6 % et 10 % [23].

A.2.3. Description géométrique

Les milieux poreux présentent une géométrie complexe, généralement révélée à l'aide de mesures tomographiques [23].

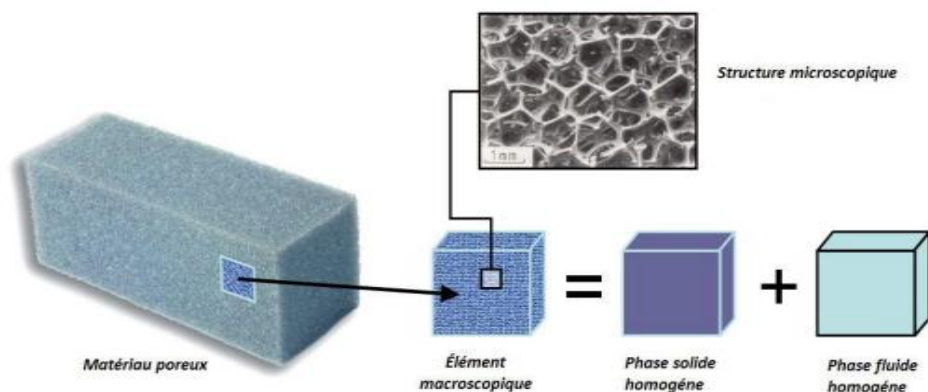


Figure A.1 : Description géométrique d'un milieu poreux [23].

A.3. Classifications des milieux poreux

Les milieux poreux présentent une grande diversité, notamment en ce qui concerne la structure géométrique définissant l'espace poral. La matrice solide d'un milieu poreux peut être [23] :

A.3.1. Milieu poreux non consolidé

Dans ce type de milieu, la phase solide est constituée de grains ou de fibres. On peut citer à titre d'exemples les graviers, sables, limons, billes de verre ou d'acier, ainsi que divers autres matériaux. Les billes de verre sont souvent utilisées dans les laboratoires de recherche pour étudier les phénomènes de transfert au sein des milieux poreux [23].



Figure A.2 : Milieu poreux non consolidé [23].

A.3.2. Milieu poreux consolidé

Dans l'état consolidé, la matrice solide est compacte et ne peut être décomposée ni en grains ni en fibres. Parmi les exemples représentatifs, on trouve les roches calcaires, les grès, les argiles, le bois, les poudres frittées ainsi que les tissus à base organique [23].



Figure A.3 : Milieu poreux consolidé [23].

A.4. Propriétés du milieu poreux

Les phénomènes observés dans les milieux poreux sont influencés par la géométrie de la matrice. Celle-ci est donc décrite à l'aide de plusieurs grandeurs moyennes, qu'elles soient géométriques ou statistiques. On peut notamment citer [12] :

A.4.1. La porosité

La porosité correspond au rapport entre le volume des pores (espaces vides) et le volume total du milieu poreux.

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume totale du milieu poreux}} \quad (\text{A.1})$$

A.4.2. Perméabilité

La perméabilité exprime la capacité d'un fluide à s'écouler à travers un milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. Représentée par la lettre K, elle dépend uniquement de la porosité ainsi que de la géométrie de la matrice solide. La relation de Kozeny–Carman permet d'estimer la perméabilité K dans le cas d'un milieu poreux non consolidé, composé d'éléments identiques présentant une géométrie simple :

$$k = \frac{d^2 \varepsilon^2}{36 c_0 (1 - \varepsilon)^2} \quad (\text{A.2})$$

Avec :

d: est une dimension caractéristique des éléments constituant la matrice poreuse,

c_0 : est une constante dépendant de la forme des grains.

A.4.3. Densité

La densité globale ρ_b représente le rapport entre la masse totale du matériau m_T sur le volume totale V_T (eau, air et solide) :

$$\rho_b = \frac{m_T}{V_T} \quad (\text{A.3})$$

Il existe une relation entre la densité globale d'un matériau et sa porosité :

► Dans le cas d'un matériau saturé en eau (c'est-à-dire lorsque les pores sont entièrement remplis de fluide), cette relation est exprimée par (Lefebvre, 2003) :

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s - \rho_f} \quad (\text{A.4})$$

Avec :

ρ_s : densité du solide ;

ρ_b : densité globale ;

ρ_f : densité globale du fluide.

Cette expression permet d'estimer la porosité à partir de la densité globale mesurée pour un matériau saturé en eau.

► Dans le cas d'un matériau sec, où les pores sont remplis d'air (dont la masse est négligeable), la densité globale du matériau, notée ρ_b sec, est utilisée. La relation entre la porosité et la densité globale dans ce cas est donnée par :

$$\rho_{bsec} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \quad (\text{A.5})$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bsec}}{\rho_s} \quad (\text{A.6})$$

A.4.4. La surface spécifique

La surface spécifique est définie comme le rapport entre la surface totale des interfaces solide-pore, notée A_{sf} , et le volume de l'échantillon, noté V .

$$\alpha = \frac{A_{sf}}{V} \quad (\text{A.7})$$

Cette grandeur, dont l'unité est celle de l'inverse d'une longueur, joue un rôle essentiel dans les phénomènes d'adsorption. Comme pour la porosité, on distingue parfois la surface spécifique accessible de la surface spécifique totale, cette dernière incluant l'aire des parois des cavités fermées (comme dans le cas du coke) [12].

A.4.5. Tortuosité

La tortuosité est généralement exprimée à l'aide d'une équation de la forme suivante :

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L}\right)^2 \quad (\text{A.8})$$

Il s'agit du rapport entre la longueur moyenne réelle L_e des trajectoires suivies par le fluide dans l'échantillon et la longueur L de ce dernier. Cette grandeur a une signification physique claire lorsqu'on modélise l'espace poreux par un réseau de capillaires. En revanche, son interprétation devient moins évidente dans le cas des milieux poreux réels.

Résumé

Dans un contexte de transition énergétique, l'amélioration des performances thermiques des matériaux de construction devient une nécessité. Ce travail de recherche vise à étudier expérimentalement les propriétés thermophysiques (à savoir la masse volumique, la conductivité thermique, la diffusivité thermique, la résistance thermique et l'effusivité thermique) d'un mortier allégé par l'incorporation de billes de polystyrène expansé. Les mesures ont été réalisées selon la méthode des boîtes, en faisant varier la teneur en eau, le pourcentage de polystyrène et le diamètre des billes de polystyrène.

Les résultats montrent que l'ajout de polystyrène réduit la masse volumique et améliore les capacités isolantes du matériau. La conductivité thermique diminue avec l'augmentation du taux de polystyrène et la diminution de la masse volumique. La diffusivité thermique croît globalement avec l'augmentation de la masse volumique et varie selon le diamètre des billes. La résistance thermique s'améliore lorsque la teneur en eau diminue et que le diamètre des billes est plus petit. Enfin, l'effusivité thermique décroît avec la réduction de la masse volumique, l'augmentation du taux de polystyrène et la diminution du diamètre des billes. Ce travail ouvre ainsi la voie à l'élaboration de matériaux plus légers, plus performants thermiquement, et adaptés aux exigences de la construction durable.

Mots-clés : matériaux de construction, mortier allégé, polystyrène expansé, conductivité thermique, diffusivité thermique, résistance thermique, effusivité thermique, isolation.

ملخص

في سياق التحول الطاقوي، أصبح تحسين الأداء الحراري لمواد البناء ضرورة ملحة. يهدف هذا العمل البحثي إلى دراسة الخصائص الحرارية الفيزيائية لملاط خفيف تم تدعيمه بكريات من البوليسترين الموسع، وذلك من خلال قياسات تجريبية. تشمل هذه الخصائص: الكتلة الحجمية، الناقلية الحرارية، الانتشارية الحرارية، المقاومة الحرارية، والفعالية الحرارية. تم إجراء القياسات باستخدام طريقة الصناديق، مع تغيير نسبة الرطوبة، نسبة البوليسترين، وقطر كريات البوليسترين.

أظهرت النتائج أن إضافة البوليسترين تؤدي إلى انخفاض الكتلة الحجمية وتحسين القدرة العازلة للمادة. تقل الناقلية الحرارية مع زيادة نسبة البوليسترين وانخفاض الكتلة الحجمية. أما الانتشارية الحرارية فتزداد بشكل عام مع ارتفاع الكتلة الحجمية وتتأثر أيضاً بقطر الكريات. وتحسن المقاومة الحرارية عند انخفاض محتوى الرطوبة وتقليل قطر الكريات. كما تنخفض الفعالية الحرارية عند انخفاض الكتلة الحجمية، وارتفاع نسبة البوليسترين، وتقليل القطر. يفتح هذا العمل آفاقاً لتطوير مواد بناء خفيفة، عازلة وملائمة لمتطلبات البناء المستدام.

الكلمات المفتاحية: مواد البناء، ملاط خفيف، بوليسترين موسع، الناقلية الحرارية، الانتشارية الحرارية، المقاومة الحرارية، الفعالية الحرارية، العزل الحراري

Abstract

In the context of the energy transition, improving the thermal performance of construction materials has become a necessity. This research aims to experimentally study the thermophysical properties (namely bulk density, thermal conductivity, thermal diffusivity, thermal resistance, and thermal effusivity) of a lightweight mortar incorporating expanded polystyrene beads. Measurements were carried out using the guarded hot boxes method, by varying the water content, polystyrene percentage, and bead diameter.

The results show that the addition of polystyrene reduces the bulk density and enhances the insulating capacity of the material. Thermal conductivity decreases with higher polystyrene content and lower bulk density. Thermal diffusivity generally increases with higher bulk density and is also influenced by the bead diameter. Thermal resistance improves when the water content is reduced and the bead diameter is smaller. Moreover, thermal effusivity decreases with lower bulk density, increased polystyrene content, and smaller bead diameter. This work paves the way for the development of lighter, better-insulating materials that meet the demands of sustainable construction.

Keywords : construction materials, lightweight mortar, expanded polystyrene, thermal conductivity, thermal diffusivity, thermal resistance, thermal effusivity, insulation.