

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
جامعة عين تموشنت - بلحاج بوشعيب
Université Ain Témouchent– Belhadj Bouchaib



Faculté des sciences et de Technologie
Département de Genie mécanique

Projet de Fin d'étude

Pour obtenir le Diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Energétique
Thème :

**Étude numérique de la position du matériau à changement de phase (MCP) dans une brique
pour l'amélioration de l'inertie thermique des bâtiment**

Realisé par:

- BENMANSOUR Khadidja.
- RAMDANI Nour elhouda .

Pr. BOUAFIA Farida
Pr. NEHARI Taieb
Dr.SALAH hichem
Pr. E. BOUNIF Abdelhamid

Présidente
Encadrant
Co-encadrant
Examineur

UATBB
UATBB
UATBB
UATBB

Année universitaire :2025/2026

Remerciment

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir la
santé et la volonté d'entamer et de terminer ce
mémoire*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas riche et
n'aurait pas pu avoir le jours sans l'aide et
l'encadrement de Pr NEHARI Taieb et Mr HADJADJ
Mohammed ,on le remercie pour la qualité de son
encadrement exceptionnel, pour sa patience ,sa
rigueur et sa disponibilité durant notre préparation
de ce mémoire .*

*Nos remerciements s'adresse également à tous
nos professeurs pour leurs générations et la
grande patience dont ils ont su faire preuve malgré
leurs charges académique et professionnelles
Merci à tous .*

Dédicace

*Je tiens c'est avec grande plaisir que je dédie ce modeste
travail :*

A l'être le plus cher de ma vie , ma mère

A celui qui m'a fait de moi une femme , mon père .

*Pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon
instruction et mon bien être رحمه الله*

*A mes chers frères ,et spécialement mourad
pour leur soutiens moraux et leurs dévouements que ce travail
soit l'accomplissements de vos vœux tant allégués et le fruit de
votre soutien .*

A mes chères sœurs

A ma chère soeur Iness Merci pour votre soutien et votre aide financière et morale.

*A ma petite soeur Farah et ma meilleure amie Houda , merci de me soutenir et
d'être avec moi depuis que je suis jeune .*

*En témoignage de mon affection fraternelle, je vous souhaite
une vie pleine de bonheur.*

A ma chère binôme, Houda

*Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout
au long de ce projet.*

À mes chères amies

Qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre.

*À mes Mes tantes et les femmes de mes frères et ma cousine chehrazed
pour leur soutiens .*

Benmansour khadidja .

Dédicace

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières a mon égard,
de me soutenir*

et de m'épaule pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes frères, Zair ,Mohamed ,Said,Marouane

A mes chères sœurs ,Ilhem ,Rania,Fedoua.

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long
de mes études.*

A ma chère binôme,Khadidja Pour son entente

A ma moitié Fatima pour l'aider

*Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs
infinies.*

A mes chères amies, Abir,Chaima,Souhila .

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille .

Ramdani Nour El Houda

Résumé :

Ce mémoire présente une étude numérique de l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les cavités d'une brique creuse en terre cuite, dans le but d'améliorer l'inertie thermique des bâtiments en climat chaud. Le modèle numérique développé sous Ansys-Fluent repose sur la méthode enthalpie-porosité pour simuler les phénomènes de fusion et de solidification. Six configurations ont été étudiées en faisant varier le type de MCP (acide caprique, RT-27, RT-42) et sa position par rapport à l'air et à l'isolant EPS. Les résultats montrent que l'acide caprique intégré directement dans toutes les cavités de la brique offre les meilleures performances thermiques, avec une réduction significative du flux de chaleur entrant et un déphasage maximal du pic de température. Toute couche d'air intermédiaire dégrade fortement l'efficacité, tandis que la combinaison MCP/EPS s'avère supérieure à EPS/MCP.

Mots-clés : Matériau à changement de phase, inertie thermique, brique creuse, Ansys-Fluent, acide caprique, confort thermique.

Abstract

This dissertation presents a numerical study of the integration of phase change materials (PCM) into the cavities of a hollow fired-clay brick, aiming to improve the thermal inertia of buildings in hot climates. The numerical model developed with Ansys-Fluent is based on the enthalpy-porosity method to simulate melting and solidification phenomena. Six configurations were studied by varying the PCM type (capric acid, RT-27, RT-42) and its position relative to air and EPS insulation. Results show that capric acid directly integrated into all brick cavities offers the best thermal performance, with a significant reduction in incoming heat flux and maximum time-lag of the temperature peak. Any intermediate air layer severely degrades efficiency, while the PCM/EPS combination proves superior to EPS/PCM.

Keywords: Phase change material, thermal inertia, hollow brick, Ansys-Fluent, capric acid, thermal comfort.

ملخص

تُقدّم هذه المذكرة دراسةً عدديةً لدمج مواد تغيير الطور (MCP) في تجاويف طوبة مجوفة من الطين المحروق، بهدف تحسين الجمود الحراري للمباني في المناطق ذات المناخ الحار. يعتمد النموذج العددي المطوّر ببرنامج Ansys-Fluent على طريقة الإنثالبي-المسامية لمحاكاة ظاهرتي الذوبان والتصلب. دُرست ست تهيئات بتغيير نوع مادة تغيير الطور (حمض الكابريك، RT-27، RT-42) وموضعها بالنسبة للهواء وعازل EPS. أظهرت النتائج أن حمض الكابريك المدمج مباشرةً في جميع تجاويف الطوبة يوفر أفضل

أداء حراري، مع تخفيض ملحوظ للتدفق الحراري الداخل وأقصى إزاحة زمنية لذروة درجة الحرارة. كما تُضعف أي طبقة هواء وسيطة الكفاءة بشكل كبير، في حين تتفوق تهيئة MCP/EPS على ترتيب EPS/MCP.

Ansys-Fluent، حمض الكابريك، الراحة الحرارية

الكلمات المفتاحية : مادة تغيير الطور، الجمود الحراري، الطوبة المجوفة، أنسييس فلويانت ،كابريك أسيد ،الراحة الحرارية .

Table des matières :

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I

Généralités sur les bâtiments, confort thermique et rôle de l'inertie thermique dans la régulation énergétique des parois

Introduction :	4
1. Modes de transfert de chaleur dans les parois des bâtiments et leur impact sur la stabilité thermique :	4
1.1. Conduction thermique à travers les murs et les matériaux de construction :	5
1.1.1. Fondements physiques de la conduction thermique dans les matériaux de construction :	6
1.1.2. Conductivité thermique des matériaux et influence de la microstructure :	6
1.1.3. Résistance thermique et conduction dans les parois multicouches :	7
1.1.4. Conduction thermique, capacité calorifique et inertie thermique :	7
1.2. Convection dans l'air intérieur et à la surface des murs :	8
1.2.1. Principe physique de la convection thermique :	8
1.2.2. Convection naturelle et convection forcée dans les bâtiments :	9
1.2.3. Échanges convectifs à la surface intérieure des murs :	9
1.2.4. Convection extérieure et interaction avec les conditions climatiques :	9
1.3. Rayonnement thermique des surfaces et interaction avec l'environnement :	10
1.3.1. Principes physiques du rayonnement thermique :	10
1.3.2. Rayonnement thermique à l'intérieur des bâtiments :	11
1.3.3. Rayonnement extérieur et interaction avec l'environnement climatique :	11
1.4. Effet combiné des différents modes de transfert de chaleur :	12
1.4.1. Interaction conduction–convection–rayonnement dans les parois des bâtiments	12

1.4.2.Comportement thermique dynamique des parois sous sollicitations variables	12
1.4.3.Influence de l'effet combiné sur l'inertie thermique des bâtiments :	13
2. Notion d'inertie thermique :	14
2.1. Définition et principes fondamentaux de l'inertie thermique :	14
2.2. Comparaison entre matériaux à faible et forte inertie thermique :	14
2.3. Impact sur le retard thermique et le déphasage des variations de température :	15
2.4. Relation entre inertie thermique et efficacité énergétique des bâtiments :	16
3.Influence des matériaux de construction sur la performance thermique des parois :	16
3.1. Comparaison entre matériaux légers et matériaux lourds : capacité de stockage thermique :	17
3.2. Effet de la densité, de la conductivité thermique et de la capacité calorifique spécifique:	17
3.3. Influence de l'épaisseur et de la composition des murs sur l'inertie thermique :	19
3.4. Effet de l'épaisseur sur le déphasage thermique :	19
3.5. Facteur d'amortissement des parois :	20
3.6. Influence de la composition multicouche des murs :	20
3.7. Analyse comparative des matériaux traditionnels et modernes.....	20
4.Concept de confort thermique dans les bâtiments et critères d'évaluation selon les normes internationales :	21
4.1. Définition du confort thermique et facteurs influents :	21
4.2. Facteurs environnementaux :	21
4.3. Facteurs individuels	22
4.4. Normes internationales et recommandations (ISO, ASHRAE) :	22
4.5. L'approche analytique : les indices PMV et PPD :	23
4.6. L'inconfort thermique local :	24
4.7. L'approche adaptative :	25
4.8. Importance du confort thermique pour les occupants et la performance énergétique :	25
Conclusion :	26

Chapitre II

Matériaux à changement de phase (MCP)

Introduction :	29
1.Définition et Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase (MCP) :	29
1.1.1.Définition Fondamentale :	29
1.1.2.Principe Physique de la Transition de Phase :	30
1.1.3.Contexte Historique et Développement :	31
1.1.4.Domaines d'Application Les MCP trouvent des applications dans des secteurs variés :	31
1.4. Absorption de la Chaleur Lors de la Fusion et Restitution Lors de la Solidification.....	34
1.5. Sensibilité des MCP aux Variations de Température et Comportement Thermique :	35
1.5.1. Critères de Sélection et Plage de Température	35
1.5.2. Stabilité Cyclique et Durabilité	35
1.5.3. Phénomènes Critiques et Limites Opérationnelles.....	35
2.Classification des Matériaux à Changement de Phase (MCP) et Caractéristiques Principales :	36
2.1. Matériaux Organiques : Cires, Acides Gras, Alcoolols.....	36
2.1.1. Généralités sur les MCP Organiques.....	36
2.1.2. Les Paraffines (Cires)	36
2.1.3.Les Acides Gras.....	37
2.1.4.Les Alcoolols et Polyols	38
2.2. Matériaux Inorganiques : Sels Hydratés, Solutions Salines.....	38
2.2.1.Les Sels Hydratés	38
2.2.2. Mécanisme de Fusion des Sels Hydratés.....	38
2.2.3. Avantages et Inconvénients des Sels Hydratés.....	39
2.2.4. Solutions Salines et MCP Métalliques :	39
2.3. Matériaux Eutectiques : Mélanges Optimisés pour des Températures de Fusion Spécifiques :	40

2.3.1. Définition et Principe des Mélanges Eutectiques	40
2.3.2. Diagramme de Phase et Point Eutectique.....	40
2.3.3. Exemples de MCP Eutectiques	40
2.3.4. Avantages des MCP Eutectiques.....	41
3. Propriétés Thermophysiques des MCP et Critères de Sélection pour l'Intégration dans les Bâtiments	41
3.1. Température de Fusion et Solidification Adaptée au Climat	41
3.1.1. Critère Fondamental de Sélection	41
3.1.2. Adéquation avec les Conditions Climatiques.....	42
3.1.3. Hystérésis Thermique :.....	42
3.2. Capacité de Stockage Thermique (Chaleur Latente).....	42
3.2.1. Importance de la Chaleur Latente.....	42
3.2.2. Valeurs Typiques et Exigences.....	42
3.2.3. Densité Énergétique Volumique.....	43
3.3. Conductivité Thermique et Stabilité Chimique et Mécanique	43
3.3.1. Conductivité Thermique :.....	43
3.3.2. Techniques d'Amélioration de la Conductivité	43
3.3.3. Stabilité Chimique et Compatibilité	44
3.3.4. Stabilité Mécanique	44
3.4. Durabilité et Performances à Long Terme	45
3.4.1. Stabilité Cyclique	45
3.4.2. Facteurs de Dégradation	45
3.4.3. Critères de Sélection pour une Application Durable	46
4. Techniques d'Intégration des MCP dans les Matériaux de Construction :.....	46
4.1. Micro-Encapsulation et Incorporation Directe dans les Briques.....	46
4.1.1. Principe de la Micro-Encapsulation	46

4.1.2Incorporation Directe dans les Briques et Matrices Cimentaires	47
4.1.3. Avantages et Limites de l'Incorporation Directe	47
4.2. Utilisation de Panneaux Composites Préfabriqués Contenant des MCP:	48
4.2.1. Principe des Panneaux Composites	48
4.2.2. Projets Innovants : Exemple du Projet MF-RETROFIT	48
4.2.3. Autres Types de Panneaux Composites.....	48
4.3. Stratégies pour les Bâtiments Neufs et pour la Rénovation Énergétique	49
4.3.1. Intégration dans les Bâtiments Neufs	49
4.3.2. Stratégies pour la Rénovation Énergétique	49
4.3.3. Considérations Pratiques pour le Choix de la Technique.....	50
5. Avantages et Limites de l'Utilisation des MCP dans les Bâtiments	50
5.1. Réduction des Fluctuations Thermiques et Amélioration du Confort	50
5.1.1. Lissage des Variations de Température Intérieure	50
5.1.2. Amélioration du Confort Thermique.....	51
5.2. Réduction de la consommation Énergétique et des besoins en chauffage / Climatisation....	51
5.2.1Économies d'Énergie Réalisées	51
5.2.2Mécanismes d'Économie d'Énergie	51
5.2.3Impact sur les Émissions de GES	52
5.3. Contraintes Techniques : Coût, Complexité d'Intégration, Compatibilité avec les Matériaux de Construction.....	52
5.3.1. Défis Économiques et de Coût	52
5.3.2. Défis Techniques et de Durabilité	52
5.3.3. Complexité d'Intégration et Manque de Standardisation.....	53
5.3.4. Considérations Environnementales	53
Conclusion :	54

Chapitre III

Modélisation numérique d'une brique intégrant un MCP

Introduction:	56
1.Équations générales :	56
1.1.Équation de continuité :	56
1.2.Équation de conservation de la quantité de mouvement :	57
1.3.Équation de conservation de l'énergie :	57
2.Description de model :	58
2.1.Équations gouvernantes :	61
2.2.Conditions initiales et aux limites:	63
2.3.Validation du modèle et procédure de résolution numérique :	63
2.4.Délai de décalage du pic de température :	64
Conclusion:	65

Chapitre IV

Étude comparative de l'influence de la position du MCP sur L'inertie thermique

Introduction :	67
1.Analyse des résultats :	67
1.1.Effet de l'étude de différents type de matériau à changement de phase dans brique:	67
1.2.Effet de l'étude de différents positions de MCP/AIR dans brique:	70
1.3.Effet de l'étude de différents positions de MCP/EPS dans brique:	71
Conclusion :	74
Conclusion générale	75
Références bibliographiques.....	79

Listes des figures :

Figure 1: Modes de transfert de chaleur[2].	5
Figure 2 Schéma de la conduction thermique .[4].	5
Figure 3: Schéma de la convection thermique[12].	8
Figure 4 :Transfert de chaleur par rayonnement .[16].	10
Figure 5: Cycle saisonnier moyen de la température journaliers de la surface [21]	13
Figure 6: Effet du déphasage thermique sur la température intérieure.[24].	15
Figure 7: Relation entre la conductivité thermique et la densité[28].	19
Figure 8: Matériaux micro-encapsulés qui respectent l'environnement de changement de phase de PCM pour le cycle de l'eau[38]	30
Figure 9 : Les différents modes de changements de phase[39].	31
Figure 10: Diagramme de phase[48]	40
Figure 11 Schéma du modèle physique de la brique creuse en terre cuite étudiée.	59
Figure 12: Les différents cas de Brique.	60
Figure 13 : Validation du modèle numérique – Comparaison des résultats[59].	64
Figure 14 : Variations de la température de surface intérieure pour différents types de MCP.	68
Figure 15 : Variations du flux de chaleur intérieur pour différents types de MCP.	69
Figure 16 : Température de la surface interne pour différentes positions de pcm/air.	70
Figure 17: Flux de chaleur de la surface interne pour différentes positions de pcm/air.	71
Figure 18: Température de la surface interne pour différentes positions de pcm/EPS.	72
Figure 19: Flux de chaleur de la surface interne pour différentes positions de pcm/eps.	73

Liste des tables :

Tableau 1 :comparaison entre les matériaux à forte et faible inertie [6], [23]	14
Tableau 2: Catégories d'environnement intérieur et plages de température opérative recommandées pour des activités sédentaires (bureaux)[33].	23
Tableau 3:Critères de conception pour l'inconfort thermique local selon l'EN 16798-1[34].....	24
Tableau 4:Propriétés thermophysiques de quelques paraffines courantes[44].....	36
Tableau 5:Propriétés des principaux acides gras utilisés comme MCP[44].....	37
Tableau 6:Propriétés des sels hydratés couramment utilisés[46]	38
Tableau 7:Exemples de mélanges eutectiques pour applications dans le bâtiment[47]	41
Tableau 8: Comparaison de la capacité de stockage MCP vs matériaux conventionnels[49]	43
Tableau 9:Compatibilité des MCP avec les matrices de construction[50]	44
Tableau 10 : Synthèse des critères de sélection des MCP pour l'intégration dans le bâtiments[51]	45
Tableau 11: Effet du taux d'incorporation de MCP sur les propriétés des mortiers[53]	47
Tableau 12: Caractéristiques des panneaux composites développés dans le projet MF- RETROFIT[54]	48
Tableau 13 :Comparaison des stratégies d'intégration des MCP pour la rénovation[56].....	50
Tableau 14:Impact des MCP sur les indicateurs de confort thermique[47]	51
Tableau 15:Synthèse des contraintes techniques des MCP dans le bâtiment[47], [57]	53
Tableau 16:les propriétés thermophysiques des briques, du matériau d'isolation et du MCP	60

Nomenclature

Lettres latines

Symbole	Désignation	Unité
Cp	Chaleur spécifique (capacité calorifique)	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
e	Épaisseur de la paroi	m
f	Fraction liquide du MCP	-
F	Force par unité de volume	$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
h	Enthalpie spécifique	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
h	Coefficient de transfert thermique par convection	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
ΔH	Enthalpie de fusion (chaleur latente)	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
k	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Lf	Chaleur latente de fusion	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
m	Masse	kg
P	Pression statique	Pa
P	Période de sollicitation thermique	s
q	Flux thermique surfacique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
Q	Quantité d'énergie thermique stockée ou libérée	J
R	Résistance thermique	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
S	Surface de transfert	m^2
T	Température	°C ou K
T _e	Température de l'environnement radiatif	K
Tf	Température du fluide environnant	K
T _l	Température liquidus du MCP	°C
T _s	Température solidus du MCP / surface	°C ou K
u _i	Composante de vitesse	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
V	Vecteur vitesse	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Lettres grecques

Symbole	Désignation	Unité
α	Diffusivité thermique ($\alpha = \lambda / \rho \cdot \text{Cp}$)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
β	Coefficient de dilatation thermique volumétrique	K^{-1}
ε	Émissivité de la surface	-
φ	Flux thermique / Déphasage thermique	W / h

λ	Conductivité thermique	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
ρ	Masse volumique	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Constante de Stefan–Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$)	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$
σ	Vecteur contrainte	Pa
τ	Instant d'apparition du pic de température	h

Indices et exposants

Indice	Désignation
(l)	Phase liquide
(s)	Phase solide
env	Environnement radiatif
f	Fluide
i, j	Indices de surface
max	Valeur maximale (pic)
n	Brique avec MCP
ref	Configuration de référence (sans MCP)
t	Brique traditionnelle (sans MCP)

Liste d'abréviation

Abréviation	Signification
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics (Dynamique des fluides numérique)
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
DR	Draught Rating (Indice d'inconfort par courant d'air)
EPS	Expanded Polystyrene (Polystyrène expansé)
GES	Gaz à Effet de Serre
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
ISO	International Organization for Standardization
MCP	Matériau à Changement de Phase
PCM	Phase Change Material (désignation anglophone des MCP)
PCS	Personalized Comfort Systems (Systèmes de confort personnalisés)

PEG	Polyéthylène Glycol
PMV	Predicted Mean Vote (Vote moyen prévisible)
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied (Pourcentage prévisible d'insatisfaits)
RT-27	Rubitherm 27 – paraffine commerciale de température de fusion 27°C
RT-42	Rubitherm 42 – paraffine commerciale de température de fusion 42°C
TIM	Thermal Insulation Material (Matériau d'isolation thermique)
Trm	Température radiante moyenne

Introduction générale

Introduction générale :

Le secteur du bâtiment occupe une place prépondérante dans la consommation énergétique mondiale et les émissions de gaz à effet de serre, représentant environ 40 % de l'énergie primaire. Face au changement climatique et à l'épuisement des ressources, améliorer la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments est devenu impératif. L'importance de ce secteur s'étend également à l'impact direct sur la santé et la productivité des occupants, qui passent plus de 80 % de leur temps à l'intérieur. Ainsi, l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue un défi majeur.

L'enveloppe du bâtiment, composée des murs, toitures et planchers, est l'interface avec l'environnement extérieur. D'énormes quantités d'énergie traversent ces parois selon trois mécanismes couplés : la conduction, la convection et le rayonnement. Cette interaction complexe rend l'analyse thermique délicate. Dans les bâtiments légers traditionnels, ces phénomènes entraînent des fluctuations importantes de la température intérieure, créant un inconfort et une surconsommation d'énergie.

Face à la dépendance aux solutions actives, la nature offre le modèle des solutions passives, au cœur duquel se trouve l'inertie thermique. Les matériaux denses (béton, pierre, brique pleine) absorbent et restituent la chaleur lentement, créant un déphasage thermique (retard du pic de chaleur) et un amortissement (réduction de son amplitude). Ce principe, utilisé depuis des millénaires dans l'architecture traditionnelle saharienne et méditerranéenne, a été abandonné avec les matériaux modernes légers, entraînant une augmentation des coûts de climatisation.

Pour moderniser ce concept, les matériaux à changement de phase (MCP) représentent une avancée révolutionnaire. Au lieu de stocker de la chaleur sensible, les MCP exploitent la chaleur latente de fusion. Un MCP absorbe 5 à 14 fois plus d'énergie qu'un matériau classique dans une plage de température très étroite autour de son point de fusion. Par exemple, un MCP fondant vers 26°C maintiendra la température du mur constante en été en absorbant la chaleur, puis la restituera la nuit en se solidifiant, se réinitialisant ainsi pour un nouveau cycle. Leur intégration dans les briques creuses promet d'améliorer considérablement l'inertie thermique des bâtiments modernes.

Introduction générale :

Malgré les énormes potentialités théoriques offertes par les matériaux à changement de phase, leur application pratique dans le secteur du bâtiment se heurte à des défis réels, car leurs performances dépendent de plusieurs facteurs tels que : leur température de fusion et son adéquation avec le climat local (comme le climat algérien), leur position optimale à l'intérieur du mur, et leur interaction avec les matériaux isolants comme la mousse de polystyrène expansé (EPS). À partir de ce constat, la problématique principale de ce mémoire peut être formulée dans la question suivante : Comment déterminer le type optimal de matériau à changement de phase et sa position à l'intérieur des cavités d'une brique creuse en terre cuite, afin d'obtenir une réduction maximale du flux thermique entrant et le meilleur déphasage du pic de température, et ainsi améliorer globalement la performance thermique du mur adaptée aux climats chauds ?

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire est divisé en quatre chapitres : le premier chapitre présente les bases théoriques du transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement), le concept d'inertie thermique (déphasage et amortissement) ainsi que les normes internationales du confort thermique (PMV et PPD) ; le deuxième chapitre est consacré aux matériaux à changement de phase, en définissant leur principe de fonctionnement basé sur la chaleur latente, leur classification en trois familles (organiques, inorganiques, eutectiques) et leurs techniques d'intégration dans la construction ; le troisième chapitre développe un modèle numérique sous Ansys-Fluent pour simuler une brique creuse en terre cuite à dix cavités, en présentant les équations gouvernantes, en adoptant la méthode enthalpie-porosité pour représenter la fusion et la solidification, en déterminant les conditions aux limites et en effectuant le choix du maillage ; enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'exécution du modèle sur six configurations différentes pour étudier l'effet du type de matériau à changement de phase (acide caprique, RT-27, RT-42), l'effet de sa position par rapport à l'air et l'effet de son intégration avec l'isolant EPS, en analysant l'évolution de la température de surface intérieure et du flux thermique traversant pour toutes les configurations.

CHAPITRE I

Généralités sur les bâtiments, confort thermique et rôle de l'inertie thermique dans la régulation énergétique des parois

Introduction

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de réduction de la consommation des bâtiments, la maîtrise des transferts thermiques à travers l'enveloppe constitue un enjeu majeur. Les parois des bâtiments représentent l'interface principale entre l'environnement extérieur et l'espace intérieur, et leur comportement thermique influence directement le confort des occupants ainsi que les besoins énergétiques en chauffage et en climatisation.

Les échanges thermiques au niveau des parois résultent de l'interaction simultanée des trois modes fondamentaux de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. L'analyse de ces mécanismes permet de comprendre la réponse thermique dynamique des bâtiments soumis à des sollicitations climatiques variables. Dans ce cadre, la notion d'inertie thermique joue un rôle central, puisqu'elle traduit la capacité des matériaux à stocker et restituer l'énergie thermique, contribuant ainsi à l'amortissement et au déphasage des variations de température.

Par ailleurs, l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments ne repose pas uniquement sur l'isolation thermique, mais également sur l'optimisation des propriétés thermophysiques des matériaux utilisés. L'intégration de matériaux innovants, notamment les matériaux à changement de phase (MCP), ouvre de nouvelles perspectives pour renforcer l'inertie thermique et améliorer la stabilité thermique intérieure.

Ainsi, ce chapitre a pour objectif de présenter les fondements théoriques relatifs aux modes de transfert de chaleur dans les parois des bâtiments, à la notion d'inertie thermique et à l'influence des propriétés des matériaux sur la performance énergétique et le confort thermique. Il constitue la base scientifique nécessaire à la compréhension des chapitres suivants consacrés à l'intégration et à l'évaluation des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des bâtiments.

1. Modes de transfert de chaleur dans les parois des bâtiments et leur impact sur la stabilité thermique

Les parois des bâtiments constituent l'interface principale entre l'environnement extérieur et l'espace intérieur. Elles sont le siège de plusieurs modes de transfert thermique qui déterminent le

comportement thermique global du bâtiment et influencent directement la stabilité de la température intérieure ainsi que le confort des occupants[1].

Les trois mécanismes fondamentaux de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement. Dans les parois des bâtiments, ces phénomènes agissent simultanément et de manière couplée, rendant l'analyse thermique complexe mais essentielle pour l'optimisation de la performance énergétique[1].

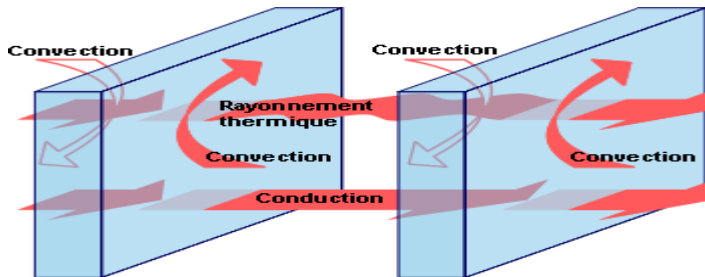


Figure.1: Modes de transfert de chaleur[2].

1.1. Conduction thermique à travers les murs et les matériaux de construction

La conduction thermique constitue le mode de transfert de chaleur prédominant au sein des parois solides des bâtiments. Elle joue un rôle central dans le comportement thermique de l'enveloppe du bâtiment et influence directement les pertes énergétiques, la stabilité thermique intérieure ainsi que la consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation. Une compréhension approfondie de ce mécanisme est indispensable pour optimiser la conception des parois, notamment dans le cadre de l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP)[3].

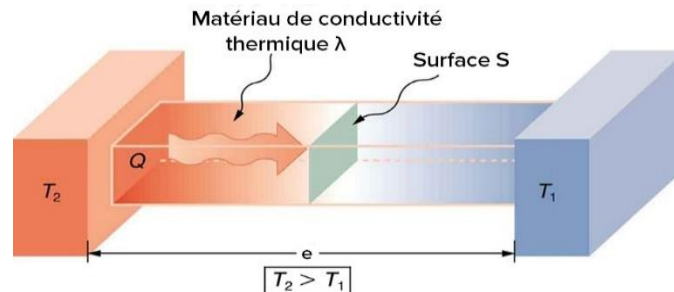


Figure 2 Schéma de la conduction thermique .[4]

1.1.1. Fondements physiques de la conduction thermique dans les matériaux de construction

La conduction thermique correspond au transfert d'énergie thermique résultant d'un gradient de température au sein d'un matériau solide. À l'échelle microscopique, ce phénomène est lié à l'agitation thermique des particules constituant le matériau, qui transmettent l'énergie de proche en proche sans déplacement macroscopique de matière[1].

Dans les bâtiments, la conduction thermique se manifeste principalement à travers les murs extérieurs, les planchers et les toitures. Ce mode de transfert est classiquement décrit par la loi de Fourier, qui constitue la base théorique de l'analyse et de la modélisation thermique des parois:

$$q = -\lambda \nabla T \quad (I.1)$$

Où q représente le flux thermique, λ la conductivité thermique du matériau et ∇T le gradient de température. Cette relation met en évidence le rôle déterminant des propriétés thermiques des matériaux dans la transmission de la chaleur[5].

1.1.2. Conductivité thermique des matériaux et influence de la microstructure

La conductivité thermique est un paramètre clé qui caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Elle dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature du matériau, sa densité, sa porosité et sa teneur en humidité [6]. Les matériaux de construction traditionnels tels que le béton, la pierre ou la brique pleine présentent généralement une conductivité thermique relativement élevée, favorisant ainsi la propagation de la chaleur à travers les parois[7].

À l'inverse, les matériaux isolants se distinguent par une faible conductivité thermique, ce qui limite les échanges thermiques par conduction. Dans les matériaux poreux, comme les briques creuses, la présence d'air emprisonné dans les pores contribue à réduire la conductivité thermique globale, bien que des phénomènes de conduction solide-air et de rayonnement interne puissent également intervenir[7].

1.1.3. Résistance thermique et conduction dans les parois multicouches

Les parois des bâtiments modernes sont souvent constituées de plusieurs couches de matériaux, chacune possédant des propriétés thermiques spécifiques. La conduction thermique dans ces parois est alors analysée à travers la notion de résistance thermique, définie par le rapport entre l'épaisseur du matériau et sa conductivité thermique :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (I.2)$$

La résistance thermique totale d'une paroi multicouche est obtenue par l'addition des résistances thermiques de chaque couche. Une résistance thermique élevée permet de réduire les flux de chaleur par conduction et contribue à l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment[9].

Toutefois, cette approche stationnaire ne permet pas de décrire de manière complète le comportement thermique réel des parois, en particulier lorsque celles-ci sont soumises à des sollicitations thermiques variables au cours du temps, comme les cycles jour/nuit[7] .

1.1.4. Conduction thermique, capacité calorifique et inertie thermique

En régime transitoire, la conduction thermique est étroitement liée à la capacité calorifique et à la masse volumique des matériaux. Ces paramètres déterminent la quantité d'énergie thermique pouvant être stockée dans le matériau et restituée ultérieurement [10]

Le comportement thermique transitoire des parois est décrit par l'équation de diffusion de la chaleur :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (I.3)$$

Cette équation met en évidence le rôle de la conduction thermique dans la propagation de la chaleur à travers les murs et dans le stockage thermique. Les matériaux à forte capacité thermique contribuent à une meilleure inertie thermique, permettant de limiter les variations rapides de température intérieure et d'améliorer le confort thermique.[11]

1.2. Convection dans l'air intérieur et à la surface des murs

La convection thermique constitue le deuxième mode fondamental de transfert de chaleur intervenant dans les bâtiments. Contrairement à la conduction, la convection implique un déplacement de fluide, en l'occurrence l'air intérieur ou extérieur, et joue un rôle déterminant dans les échanges thermiques entre les parois et l'environnement ambiant. Elle influence directement la température de surface des murs, la distribution de la chaleur dans les espaces intérieurs et, par conséquent, le confort thermique des occupants[1].

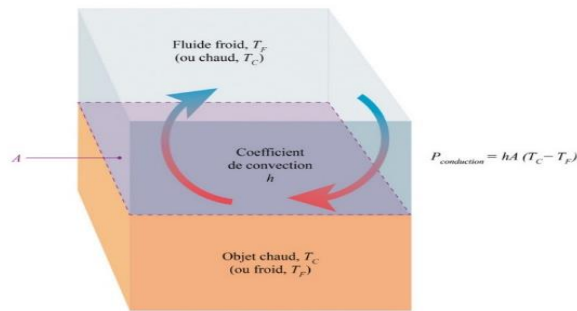


Figure 3: Schéma de la convection thermique[12]

1.2.1. Principe physique de la convection thermique

La convection thermique correspond au transfert de chaleur entre une surface solide et un fluide en mouvement. Ce phénomène résulte de l'action combinée : de la conduction thermique au voisinage immédiat de la surface, et du transport d'énergie par mouvement du fluide.[1]

Le flux thermique convectif est généralement exprimé par la loi de Newton du refroidissement :

$$q = h(T_s - T_f) \quad (I.4)$$

où :

- (q) est le flux thermique convectif (W/m²),
- (h) est le coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m²·K),
- (T_s) est la température de la surface du mur (K),

- (T_f) est la température du fluide environnant (air intérieur ou extérieur) (K).[13]

Le coefficient de convection (h) dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature de l'écoulement de l'air, les propriétés thermophysiques du fluide et la géométrie de la surface.

1.2.2. Convection naturelle et convection forcée dans les bâtiments

Dans les bâtiments, la convection peut être classée en deux catégories principales : la convection naturelle et la convection forcée. La convection naturelle est induite par les différences de densité de l'air causées par les gradients de température. La convection forcée, quant à elle, est provoquée par des dispositifs mécaniques tels que les systèmes de ventilation, de climatisation ou par l'action du vent sur les parois extérieures[14].

1.2.3. Échanges convectifs à la surface intérieure des murs

À l'intérieur des bâtiments, la convection intervient principalement au niveau des surfaces internes des murs, des plafonds et des planchers. Les échanges convectifs influencent directement la température de l'air intérieur et la perception du confort thermique par les occupants[9] .

Un coefficient de convection intérieure élevé favorise un échange thermique rapide entre les parois et l'air intérieur, ce qui peut conduire à :une augmentation des pertes de chaleur en période hivernale,ou une augmentation des apports thermiques en période estivale[9].

À l'inverse, une convection plus modérée permet de limiter les échanges thermiques rapides et contribue à une meilleure stabilité thermique intérieure, en particulier lorsque les parois possèdent une forte inertie thermique ou intègrent des matériaux à changement de phase[9].

1.2.4. Convection extérieure et interaction avec les conditions climatiques

La convection extérieure est fortement influencée par les conditions climatiques, notamment la vitesse et la direction du vent, la température extérieure et la rugosité des surfaces. Le vent intensifie les échanges convectifs à la surface externe des murs, augmentant ainsi les flux thermiques entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment[15].

Dans les régions soumises à des variations climatiques importantes, la convection extérieure peut accentuer les sollicitations thermiques des parois. Une conception inadéquate de l'enveloppe du bâtiment peut alors entraîner des fluctuations thermiques intérieures importantes, affectant le confort et augmentant la consommation énergétique [15].

1.3.Rayonnement thermique des surfaces et interaction avec l'environnement

Le rayonnement thermique constitue le troisième mode fondamental de transfert de chaleur intervenant dans les parois des bâtiments. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement ne nécessite aucun milieu matériel pour se propager. Il résulte de l'émission d'ondes électromagnétiques par toute surface dont la température est supérieure au zéro absolu. Dans le contexte des bâtiments, le rayonnement thermique joue un rôle important dans les échanges énergétiques entre les surfaces des parois, l'air intérieur, le ciel et l'environnement extérieur, influençant ainsi la stabilité thermique et le confort intérieur[9] .

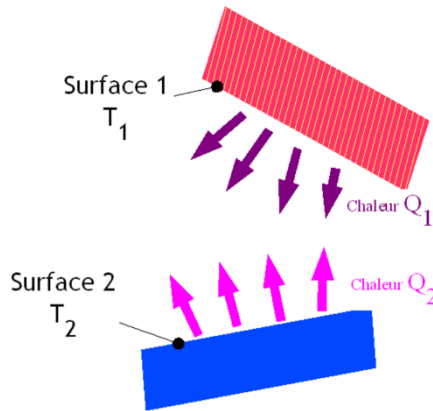


Figure.4 :Transfert de chaleur par rayonnement .[16]

1.3.1. Principes physiques du rayonnement thermique

Le rayonnement thermique est lié à l'énergie émise par les surfaces sous forme d'ondes électromagnétiques, principalement dans le domaine infrarouge pour les températures rencontrées dans les bâtiments. La puissance rayonnée par une surface est décrite par la loi de Stefan–Boltzmann[17], exprimée par :

$$qr = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{env}^4) \quad (I.5)$$

où :

- q_r est le flux thermique radiatif (W/m^2),
- ε est l'émissivité de la surface,
- σ est la constante de Stefan–Boltzmann (567 times $10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$),
- T_s est la température absolue de la surface (K),
- T_{env} est la température absolue de l'environnement radiatif (K).

L'émissivité dépend de la nature du matériau, de l'état de surface et de la longueur d'onde considérée. Les matériaux de construction courants présentent généralement des valeurs d'émissivité élevées, ce qui favorise les échanges radiatifs.

1.3.2. Rayonnement thermique à l'intérieur des bâtiments

À l'intérieur des bâtiments, le rayonnement thermique intervient principalement dans les échanges entre les surfaces internes des parois (murs, plafonds, planchers) et les occupants. Ces échanges influencent la température radiante moyenne, paramètre essentiel dans l'évaluation du confort thermique selon les normes internationales[18].

Même en présence d'une température de l'air intérieure stable, des différences importantes de température de surface peuvent générer une sensation d'inconfort thermique due aux échanges radiatifs asymétriques. Ainsi, le rayonnement thermique contribue de manière significative à la perception du confort, en complément des effets convectifs[18].

1.3.3. Rayonnement extérieur et interaction avec l'environnement climatique

À l'extérieur, les parois des bâtiments échangent de l'énergie par rayonnement avec le soleil, le ciel et les surfaces environnantes. Le rayonnement solaire incident constitue une source majeure de gains thermiques, notamment sur les façades exposées et les toitures[19].

En parallèle, les surfaces extérieures émettent un rayonnement thermique vers le ciel, phénomène particulièrement marqué durant la nuit. Ce rayonnement nocturne peut entraîner un refroidissement significatif des parois, influençant les conditions thermiques intérieures, en particulier dans les bâtiments à faible inertie thermique[19].

1.4.Effet combiné des différents modes de transfert de chaleur

Dans les conditions réelles de fonctionnement des bâtiments, les transferts thermiques par conduction, convection et rayonnement n'agissent jamais de manière isolée. Le comportement thermique global des parois résulte de l'interaction simultanée et couplée de ces trois mécanismes, rendant l'analyse thermique complexe mais indispensable pour une conception énergétique performante .[10]

L'étude de l'effet combiné des modes de transfert de chaleur est particulièrement importante pour comprendre la réponse thermique dynamique des parois, évaluer la stabilité de la température intérieure et analyser l'efficacité de solutions innovantes telles que l'intégration de matériaux à changement de phase (MCP)[10].

1.4.1. Interaction conduction–convection–rayonnement dans les parois des bâtiments

La conduction thermique gouverne le transfert de chaleur à l'intérieur des matériaux solides constituant les parois, tandis que la convection et le rayonnement interviennent principalement aux surfaces intérieure et extérieure du mur. Les échanges convectifs et radiatifs déterminent la température de surface, qui constitue une condition aux limites essentielle pour la conduction thermique à travers la paroi[20].

Ainsi, toute variation des conditions extérieures (température de l'air, vitesse du vent, rayonnement solaire) ou intérieures (température ambiante, ventilation) se répercute sur la conduction thermique à l'intérieur du mur. Ce couplage explique la sensibilité des parois aux sollicitations climatiques et l'importance d'une approche globale dans l'analyse thermique des bâtiments[20].

1.4.2. Comportement thermique dynamique des parois sous sollicitations variables

Les bâtiments sont soumis à des conditions thermiques non stationnaires, caractérisées par des cycles journaliers et saisonniers de température et de rayonnement. Dans ce contexte, l'effet combiné des transferts thermiques détermine la capacité des parois à amortir les variations thermiques et à retarder la propagation de la chaleur vers l'intérieur[10].

La conduction thermique contrôle la diffusion de la chaleur à travers le mur, tandis que la convection et le rayonnement modulent les flux thermiques aux interfaces. Une paroi bien conçue permet de réduire l'amplitude des variations de température intérieure grâce à un effet d'amortissement thermique et à un déphasage temporel, améliorant ainsi le confort thermique et réduisant les besoins énergétiques [10]

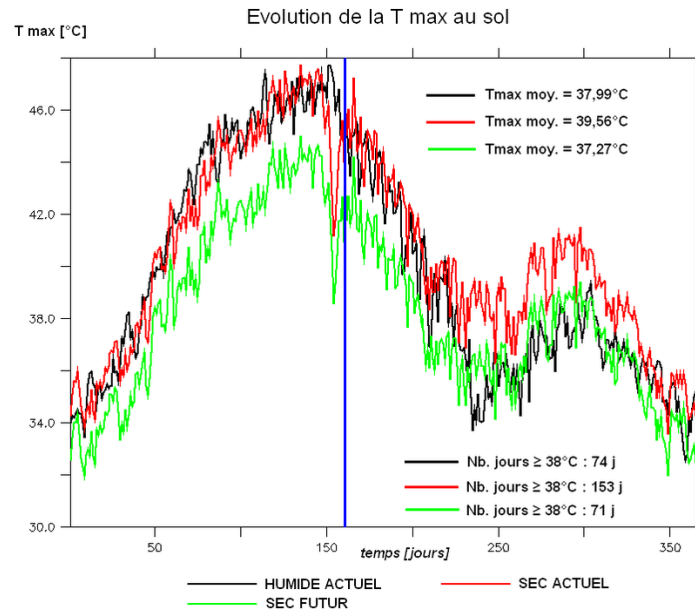


Figure.5: Cycle saisonnier moyen de la température journaliers de la surface [21] .

1.4.3. Influence de l'effet combiné sur l'inertie thermique des bâtiments

L'inertie thermique d'un bâtiment résulte directement de l'interaction entre les propriétés thermiques des matériaux et les modes de transfert de chaleur. Une forte inertie thermique permet aux parois d'absorber l'énergie thermique excédentaire pendant les périodes chaudes et de la restituer lorsque la température ambiante diminue[10] .

Dans ce cadre, la conduction thermique assure le stockage de l'énergie à l'intérieur des matériaux, tandis que la convection et le rayonnement contrôlent la vitesse à laquelle cette énergie est échangée avec l'environnement. L'équilibre entre ces mécanismes est déterminant pour atteindre une stabilité thermique optimale[10].

2. Notion d'inertie thermique

2.1. Définition et principes fondamentaux de l'inertie thermique

L'inertie thermique constitue l'une des propriétés fondamentales régissant le comportement dynamique des bâtiments soumis à des sollicitations climatiques variables. Elle se définit comme la capacité d'une paroi ou d'un ensemble constructif à s'opposer aux fluctuations de température en stockant puis en restituant progressivement l'énergie thermique. Ce phénomène physique, loin d'être une technologie active, représente une caractéristique intrinsèque des matériaux, agissant comme un régulateur passif face aux oscillations rapides du cycle diurne et des variations saisonnières [22].

L'effusivité thermique, exprimée par la relation[1] :

$$E = \lambda \cdot \rho \cdot cp \quad (I.6)$$

(où λ est la conductivité thermique, ρ la masse volumique et cp la chaleur spécifique), caractérise la vitesse à laquelle un matériau absorbe ou restitue la chaleur .

Parallèlement, la diffusivité thermique ($a = \lambda / (\rho \cdot cp)$) décrit la rapidité de propagation d'un front de chaleur à travers le matériau[1] . Comme le souligne Verbeke et al., la quantité de chaleur stockée dépend de la densité et de la capacité thermique spécifique, tandis que le taux d'échange thermique est influencé par la conductivité du matériau[22] .

2.2. Comparaison entre matériaux à faible et forte inertie thermique :

Le tableau comparatif suivant illustre les différences fondamentales entre ces catégories de matériaux :

Tableau 1 : comparaison entre les matériaux à forte et faible inertie [6], [23].

Propriété	Matériaux à forte inertie	Matériaux à faible inertie
Densité (kg/m³)	Élevée (béton : 2400, brique : 1800)	Faible à modérée (bois : 400-600)
Capacité de stockage thermique	Élevée (accumulation journalière)	Limitée (réaction instantanée)

Propriété	Matériaux à forte inertie	Matériaux à faible inertie
Comportement thermique	Amortissement et déphasage	Réactivité aux variations
Temps de réponse	Lent (inertie importante)	Rapide (faible inertie)
Applications typiques	Murs porteurs, dalles, façades	Ossatures légères, cloisons

2.3.Impact sur le retard thermique et le déphasage des variations de température

L'effet le plus significatif de l'inertie thermique sur le comportement des bâtiments se manifeste à travers deux phénomènes complémentaires : l'amortissement et le déphasage des variations de température. Le déphasage (τ) correspond au temps écoulé entre le pic de température extérieure et le pic de température intérieure correspondant, tandis que l'amortissement désigne la réduction de l'amplitude des fluctuations thermiques[10] .

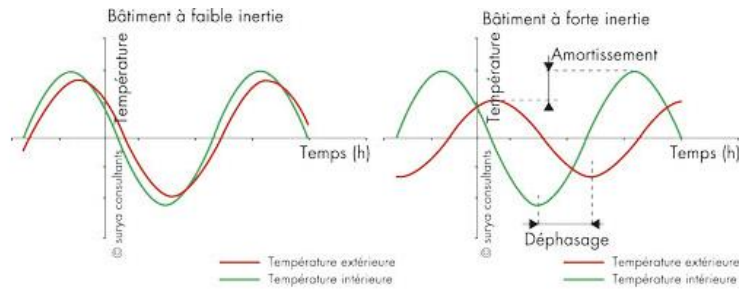


Figure 6: Effet du déphasage thermique sur la température intérieure.[24]

Des études expérimentales récentes menées par Ferencz et al. sur des maisons modèles équipées d'enduits à matériaux à changement de phase (MCP) démontrent l'ampleur de ces phénomènes. Les résultats indiquent que les bâtiments intégrant des MCP présentent un retard thermique moyen d'environ 200 minutes, soit approximativement le double de celui observé pour les constructions de référence (100 minutes) . Cette augmentation significative du déphasage s'accompagne d'une réduction corrélée des degrés-heures de dépassement des seuils de confort, confirmant que des retards de pic plus importants sont associés à une diminution des risques de surchauffe[25] .

2.4.Relation entre inertie thermique et efficacité énergétique des bâtiments

La relation entre inertie thermique et performance énergétique des bâtiments fait l'objet d'un intérêt croissant dans la communauté scientifique, particulièrement dans le contexte de la transition vers des bâtiments à consommation énergétique quasi nulle. Les travaux de synthèse de Verbeke et al. indiquent qu'en règle générale, une quantité plus importante de masse thermique placée du côté intérieur de l'isolation apparaît bénéfique pour améliorer le confort thermique et réduire la demande énergétique[22] .

L'étude menée par Božiček et al. sur des bâtiments de bureaux à Ljubljana quantifie précisément ces bénéfices. Leurs simulations sous EnergyPlus démontrent que l'inertie thermique présente un potentiel considérable d'économies d'énergie, particulièrement en saison de refroidissement, avec des réductions de l'ordre de 20 % et 13 % selon le niveau d'isolation des murs extérieurs . Cette recherche souligne également que la réduction simultanée du coefficient de transmission thermique (U) et l'optimisation de l'inertie permettent d'atteindre des performances supérieures à celles obtenues en considérant ces paramètres isolément [26].

Cependant, les chercheurs nuancent ces conclusions en soulignant que l'impact de l'inertie sur la demande énergétique reste relativement modeste en valeur absolue. Verbeke et al. estiment qu'avec un ordre de grandeur de quelques pourcents dans la plupart des cas, d'autres paramètres de conception tels que l'isolation thermique de l'enveloppe et les apports solaires demeurent plus significatifs[22] .

3.Influence des matériaux de construction sur la performance thermique des parois

Les matériaux de construction jouent un rôle déterminant dans la performance thermique des parois, car ils conditionnent les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. Le choix des matériaux influence directement les besoins énergétiques, le confort thermique et la stabilité des températures intérieures. Les propriétés physiques des matériaux, telles que la densité, la conductivité thermique et la capacité calorifique, définissent leur aptitude à stocker, transmettre ou retarder les flux de chaleur[1].

3.1. Comparaison entre matériaux légers et matériaux lourds : capacité de stockage thermique

Les matériaux de construction sont généralement classés en matériaux légers et matériaux lourds selon leur masse volumique et leur capacité de stockage thermique. Cette distinction est fondamentale pour comprendre le comportement thermique des parois et leur influence sur le confort intérieur des bâtiments[27].

Les matériaux légers, tels que le bois, le plâtre, les panneaux dérivés du bois ou certains matériaux composites, présentent une faible densité et une capacité thermique limitée. En conséquence, ils stockent peu de chaleur et réagissent rapidement aux variations de température extérieure. Cette faible inertie thermique entraîne des fluctuations rapides de la température intérieure, ce qui peut accroître les besoins en chauffage et en climatisation, en particulier dans les régions à fortes amplitudes thermiques journalières[27].

À l'inverse, les matériaux lourds, comme le béton, la pierre naturelle, la brique pleine ou la terre crue, se caractérisent par une masse volumique élevée et une forte capacité de stockage thermique. Ces matériaux sont capables d'absorber une quantité importante de chaleur pendant les périodes chaudes et de la restituer progressivement lorsque la température ambiante diminue. Ce phénomène permet de réduire les pics de chaleur à l'intérieur des bâtiments et d'améliorer la stabilité thermique sur l'ensemble de la journée.[27]

3.2.Effet de la densité, de la conductivité thermique et de la capacité calorifique spécifique

La performance thermique des matériaux de construction est étroitement liée à leurs propriétés thermophysiques fondamentales, notamment la densité (ρ), la conductivité thermique (λ) et la capacité calorifique spécifique (c). Ces paramètres interviennent directement dans les mécanismes de transfert et de stockage de la chaleur au niveau des parois[1].

La conductivité thermique λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) caractérise l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Le flux thermique unidimensionnel à travers une paroi plane homogène est décrit par la loi de Fourier [1]:

$$\Phi = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (\text{I.7})$$

où Φ est le flux thermique (W), S la surface de transfert (m^2) et $\frac{dT}{dx}$ le gradient de température. Les matériaux à faible conductivité thermique limitent les pertes de chaleur et sont donc privilégiés pour l'isolation thermique des bâtiments[1].

La densité ρ ($kg \cdot m^{-3}$) influence directement la quantité de matière capable de stocker l'énergie thermique. Associée à la capacité calorifique spécifique c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), elle permet de définir la capacité thermique volumique (ρc), exprimée en $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ [1] :

$$C_v = \rho c \quad (I.8)$$

Cette grandeur représente la capacité d'un matériau à emmagasiner de la chaleur par unité de volume. Les matériaux présentant une valeur élevée de ρc sont particulièrement efficaces pour atténuer les variations thermiques et améliorer l'inertie thermique des parois[1].

Le comportement thermique dynamique d'un matériau peut également être décrit à l'aide de la diffusivité thermique α ($m^2 \cdot s^{-1}$), définie par[1] :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (I.9)$$

La diffusivité thermique traduit la rapidité avec laquelle une variation de température se propage à l'intérieur d'un matériau. Une faible valeur de α indique une propagation lente de la chaleur, ce qui est favorable au déphasage thermique et à la stabilité thermique intérieure[1].

Ainsi, l'association d'une faible conductivité thermique et d'une forte capacité thermique volumique constitue un critère essentiel pour le choix des matériaux de construction performants du point de vue thermique[1].

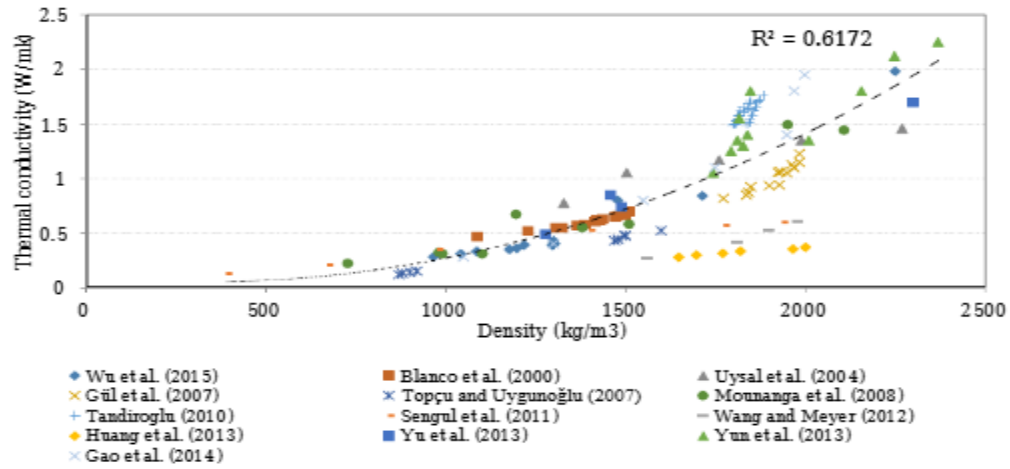


Figure 7: Relation entre la conductivité thermique et la densité[28].

3.3. Influence de l'épaisseur et de la composition des murs sur l'inertie thermique :

L'inertie thermique des parois dépend à la fois de l'épaisseur des murs et de leur composition multicouche. Ces deux paramètres influencent directement le comportement thermique dynamique des bâtiments, notamment à travers le déphasage thermique (ϕ) et le facteur d'amortissement (f), qui décrivent la réponse des parois aux sollicitations thermiques périodiques[10].

3.4. Effet de l'épaisseur sur le déphasage thermique

Le déphasage thermique ϕ (h) représente le temps nécessaire pour qu'une onde thermique atteigne la face intérieure de la paroi après avoir été appliquée sur la face extérieure. Pour une paroi homogène soumise à une excitation thermique sinusoïdale, le déphasage peut être exprimé de manière simplifiée par[10] :

$$\phi = \frac{e^2}{\pi \alpha} \quad (I.10)$$

où e est l'épaisseur de la paroi (m) et α la diffusivité thermique du matériau ($m^2 \cdot s^{-1}$). Cette relation montre que le déphasage thermique augmente avec le carré de l'épaisseur et diminue lorsque la diffusivité thermique est élevée[10].

Ainsi, des murs épais réalisés à partir de matériaux à faible diffusivité thermique, tels que la brique pleine ou la terre crue, permettent de retarder efficacement la transmission de la chaleur vers l'intérieur du bâtiment, contribuant à une meilleure régulation thermique journalière[10].

3.5.Facteur d'amortissement des parois

Le facteur d'amortissement f (sans dimension) traduit l'atténuation de l'amplitude de l'onde thermique à travers la paroi. Il est défini comme le rapport entre l'amplitude de la variation de température sur la face intérieure et celle appliquée sur la face extérieure [10]:

$$f = \frac{T_{i,max} - T_{i,min}}{T_{e,max} - T_{e,min}} \quad (I.11)$$

où P est la période de sollicitation thermique (s), généralement égale à 24 h pour le cycle jour-nuit[10].

3.6.Influence de la composition multicouche des murs

Dans le cas des murs multicouches, l'association de matériaux lourds à forte inertie thermique et de matériaux isolants à faible conductivité thermique permet d'optimiser simultanément le déphasage et l'amortissement. La couche lourde assure le stockage de la chaleur, tandis que la couche isolante limite les flux thermiques instantanés[10].

Les parois multicouches présentent généralement des valeurs de déphasage thermique élevées et des facteurs d'amortissement faibles, ce qui contribue à réduire les pics de température intérieure et à améliorer le confort thermique, notamment dans les climats chauds à fortes amplitudes thermiques[10].

3.7.Analyse comparative des matériaux traditionnels et modernes

Les matériaux de construction traditionnels et modernes présentent des comportements thermiques distincts, liés à leurs propriétés thermophysiques, à leur mode de fabrication et à leur intégration dans l'enveloppe du bâtiment. L'analyse comparative de ces matériaux permet d'évaluer leur contribution à l'inertie thermique, au confort intérieur et à l'efficacité énergétique globale[23].

Les matériaux traditionnels, tels que la pierre, la brique pleine, la terre crue (adobe, pisé) ou le torchis, sont généralement caractérisés par une forte densité et une capacité thermique volumique élevée. Ces propriétés leur confèrent une inertie thermique importante, favorisant un déphasage thermique élevé et un facteur d'amortissement faible. Ils permettent ainsi de limiter les variations

de température intérieure, en particulier dans les climats chauds et secs ou à forte amplitude thermique journalière[23].

À l'inverse, les matériaux modernes, comme le béton armé, les blocs creux, le béton cellulaire ou les panneaux sandwich, sont conçus pour répondre à des exigences de rapidité de construction, de résistance mécanique et de performance thermique normalisée. Bien que certains matériaux modernes présentent une inertie thermique plus faible que les matériaux traditionnels, leur performance globale peut être optimisée par l'intégration de couches isolantes et par une conception multicouche adaptée[6].

L'approche contemporaine tend vers une combinaison raisonnée de matériaux traditionnels et modernes, afin de tirer parti de l'inertie thermique élevée des matériaux lourds et des performances isolantes des matériaux modernes, tout en respectant les contraintes économiques et environnementales[29].

4. Concept de confort thermique dans les bâtiments et critères d'évaluation selon les normes internationales

4.1. Définition du confort thermique et facteurs influents

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique . Il s'agit d'une condition mentale subjective qui reflète l'équilibre thermique du corps humain avec son environnement. Atteindre cet équilibre, où les mécanismes de thermorégulation du corps sont sollicités de manière minimale, est l'objectif de tout système de CVC . Cette notion est fondamentale car elle impacte directement la santé, la productivité et le bien-être des occupants[18] .

4.2. Facteurs environnementaux

Ces paramètres décrivent les conditions physiques de l'espace intérieur.

- **Température de l'air (T_a)** : Il s'agit de la température de l'air ambiant, mesurée par un thermomètre standard. C'est souvent le premier paramètre auquel on pense, mais il est insuffisant à lui seul pour évaluer le confort [30]

- **Température radiante moyenne (T_{rm})** : C'est la température uniforme d'une enceinte noire imaginaire dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur par rayonnement que dans l'environnement réel . Elle prend en compte l'effet des parois (murs, fenêtres, sols) qui peuvent être plus chaudes ou plus froides que l'air. Par exemple, une grande surface vitrée froide en hiver peut créer une sensation d'inconfort même si la température de l'air est adéquate[18]
- **Humidité de l'air (RH)** : Exprimée en pourcentage d'humidité relative, elle influence l'évaporation de la sueur, principal mécanisme de refroidissement du corps. Une humidité trop élevée (>70%) entrave l'évaporation et rend l'air "lourd", tandis qu'une humidité trop basse (<30%) peut assécher les muqueuses[30]
- **Vitesse de l'air (V_a)** : Le mouvement de l'air (en m/s) a un effet refroidissant par convection et évaporation. Une vitesse d'air trop élevée peut causer une gêne par courant d'air (draught) , surtout si l'air est frais. À l'inverse, en été, une vitesse d'air plus élevée peut être bienvenue pour compenser des températures plus hautes[30]

4.3.Facteurs individuels

Ces paramètres sont propres à chaque occupant et varient considérablement.

- **Niveau d'activité (taux métabolique, M)** : Exprimé en met (1 met = 58,2 W/m² de surface corporelle), il représente la production de chaleur interne du corps. Un employé de bureau sédentaire a un métabolisme d'environ 1,2 met, tandis qu'une activité plus intense peut monter à 2 m[31]et ou plus.[18]
- **Isolement vestimentaire (Icl)** : Exprimé en clo (1 clo = 0,155 m².K/W), il mesure la résistance thermique des vêtements. Une tenue d'hiver typique est d'environ 1 clo, alors qu'une tenue d'été légère est d'environ 0,5 clo[30].
- **Le temps** : La durée d'exposition à un environnement thermique influence la perception. De plus, les expériences thermiques passées et l'acclimatation jouent un rôle important[30]

4.5.Normes internationales et recommandations (ISO, ASHRAE)

Pour opérationnaliser cette définition subjective et permettre la conception de bâtiments confortables, des normes internationales ont été développées Les deux principales références sont la norme américaine **ASHRAE Standard 55** [30]et la norme internationale **ISO 7730**[18] qui ont évolué de concert depuis les années 1960-70 .

4.6.L'approche analytique : les indices PMV et PPD

Développé par P.O. Fanger, ce modèle, repris par l'ISO 7730, vise à prédire la sensation thermique moyenne d'un grand groupe de personnes dans un environnement donné[18].

- **PMV (Predicted Mean Vote)** : Il prédit la valeur moyenne des votes d'un groupe sur une échelle de sensation thermique à 7 points, allant de -3 (froid) à +3 (chaud), en passant par 0 (neutre). Le calcul du PMV intègre les six facteurs fondamentaux mentionnés précédemment. L'ISO 7730 fournit un programme informatique pour ce calcul [18].
- **PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)** : Il prédit le pourcentage de personnes qui seront insatisfaites (votant -3, -2, +2 ou +3) dans un environnement donné. Il est directement lié au PMV par une relation mathématique. Pour un PMV de 0 (neutre), le PPD est d'environ 5%, ce qui illustre la difficulté de satisfaire tout le monde[18].

Tableau 2: Catégories d'environnement intérieur et plages de température opérative recommandées pour des activités sédentaires (bureaux)[33].

Catégorie	Explication	PPD (%)	PMV	Saison de chauffe (hiver) 1 clo	Saison de refroidissement (été) 0.5 clo
I	Haut niveau d'exigence (personnes sensibles)	< 6	$-0.2 < \text{PMV} < +0.2$	21.0 – 23.0 °C	23.5 – 25.5 °C
II	Niveau normal (bâtiments neufs/rénovés)	< 10	$-0.5 < \text{PMV} < +0.5$	20.0 – 24.0 °C	23.0 – 26.0 °C

CHAPITRE I : Généralités sur les bâtiments, confort thermique et rôle de l'inertie thermique dans la régulation énergétique des parois

III	Niveau acceptable modéré (bâtiments existants)	< 15	$-0.7 < PMV < +0.7$	19.0 – 25.0 °C	22.0 – 27.0 °C
IV	Hors des critères précédents	< 25	$-1.0 < PMV < +1.0$	17.0 – 25.0 °C	21.0 – 28.0 °C

4.7.L'inconfort thermique local

Le modèle PMV/PPD prédit le confort général du corps. Cependant, un inconfort peut naître d'une partie spécifique du corps soumise à une condition non-uniforme. Les normes fournissent donc des critères stricts pour limiter ces phénomènes [18].

- **Courant d'air (Draught)** : Gêne locale causée par un mouvement d'air, particulièrement au niveau de la nuque et des chevilles[18].
- **Différence verticale de température de l'air** : Un écart trop important entre la température à la tête et aux chevilles ($> 3^{\circ}\text{C}$) est source d'inconfort[18].
- **Asymétrie de température radiante** : Être exposé à une paroi froide (fenêtre) ou à un plafond chauffant peut causer un inconfort localisé[18]
- **Température de surface du sol** : Un sol trop froid ou trop chaud est inconfortable pour les pieds[18].

Tableau3: Critères de conception pour l'inconfort thermique local selon l'EN 16798-1[34].

Catégorie	DR (Courant d'air) [%]	Différence vert. de T° (tête-pieds) [K]	Plage de T° de sol [$^{\circ}\text{C}$]	Asymétrie de T° radiante [K] (Plafond chaud / Mur froid)
I	< 10	< 2	19 – 29	< 5 / < 10
II	< 20	< 3	19 – 29	< 5 / < 10
III	< 30	< 4	17 – 31	< 7 / < 13

4.8.L'approche adaptative

Des études sur le terrain, notamment dans des climats chauds, ont montré que les occupants de bâtiments naturellement ventilés acceptent des plages de températures bien plus larges que celles prédites par le modèle PMV, qui tend à surestimer l'inconfort. Cela a conduit au développement du modèle adaptatif, intégré dans les normes récentes [30]

Ce modèle postule que les occupants interagissent avec leur environnement et s'y adaptent (en ouvrant une fenêtre, en changeant de vêtements, en ajustant leurs stores). Ainsi, la température intérieure acceptable est une fonction de la température extérieure. Ce modèle s'applique aux bâtiments sans système de refroidissement mécanique, où les occupants ont un contrôle direct sur leur environnement[30].

4.9.Importance du confort thermique pour les occupants et la performance énergétique

La quête du confort thermique est indissociable des enjeux énergétiques et sanitaires actuels.

➤ **Pour les occupants : santé, productivité et satisfaction :**

Un environnement thermique inadapté a des conséquences directes sur l'homme :

- **Santé** : Le froid peut entraîner des troubles musculo-squelettiques, tandis qu'une chaleur excessive peut causer des coups de chaleur. Une exposition prolongée à des conditions extrêmes est un risque majeur[35].
- **Productivité** : De nombreuses études montrent un lien direct entre le confort thermique et les performances cognitives. Dans les bureaux, un environnement inconfortable réduit la capacité de concentration et augmente l'absentéisme. Le secteur du bâtiment a la responsabilité de fournir un environnement propice à la productivité des occupants[35] .
- **Satisfaction** : L'inconfort thermique est l'une des premières sources de plaintes dans les bâtiments tertiaires. Une étude récente sur des bâtiments verts en climat chaud a montré que même si les indices PMV prédisaient une sensation de neutralité (0.28), les occupants rapportaient une sensation de légère fraîcheur (-1.1), indiquant un phénomène de "surchauffe" (surchauffe, mais dans le sens de refroidissement excessif) dû à des consignes de climatisation trop basses . Cela souligne l'importance de la prise en compte du ressenti réel des occupants[35].

➤ **Pour les occupants : santé, productivité et satisfaction**

Les systèmes de CVC représentent une part considérable de la consommation énergétique mondiale, contribuant à environ 30% de la consommation finale d'énergie et à 26% des émissions liées à l'énergie. La manière dont le confort thermique est défini et assuré a donc un impact direct sur la performance énergétique[36].

- **Conséquences des standards stricts** : L'application de standards rigides (ex: maintien de 22°C toute l'année) peut entraîner une surconsommation énergétique[36].
- **Stratégies d'optimisation** : Pour concilier confort et économies d'énergie, plusieurs pistes sont explorées :
 - **Élargissement des plages de consigne** : Appliquer les catégories de la norme EN 16798-1 permet d'éviter un dimensionnement ou un fonctionnement trop énergivore des systèmes[33].
 - **Confort adaptatif** : Concevoir des bâtiments qui maximisent l'utilisation des stratégies passives, permettant d'accepter des températures plus élevées en été sans climatisation, réduisant ainsi la demande énergétique[36].
 - **Systèmes de confort personnalisés (PCS)** : Plutôt que de conditionner uniformément tout un grand volume, les PCS (coussins chauffants, ventilation localisée, etc.) visent à créer un microclimat autour de l'occupant. Des recherches montrent qu'ils peuvent améliorer le confort tout en permettant d'assouplir la consigne de température du bâtiment (ex: chauffer moins fort en hiver grâce à un coussin chauffant), générant ainsi des économies d'énergie significatives (jusqu'à 40% dans certains cas) [36].

Conclusion

L'analyse développée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence le rôle fondamental des modes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement dans le comportement thermique des parois des bâtiments. Ces mécanismes, agissant de manière couplée, déterminent la réponse dynamique de l'enveloppe face aux sollicitations climatiques extérieures et influencent directement la stabilité thermique intérieure.

CHAPITRE I : Généralités sur les bâtiments, confort thermique et rôle de l'inertie thermique dans la régulation énergétique des parois

L'étude des propriétés thermophysiques des matériaux, notamment la conductivité thermique, la capacité calorifique, la densité et la diffusivité thermique, a montré leur contribution essentielle à l'inertie thermique des bâtiments. Les phénomènes d'amortissement et de déphasage des variations de température constituent des indicateurs clés de la performance thermique dynamique des parois.

La comparaison entre matériaux légers et lourds, traditionnels et modernes, a également souligné l'importance d'une conception multicouche optimisée permettant de concilier isolation thermique et capacité de stockage énergétique. Par ailleurs, la relation entre inertie thermique, confort thermique et efficacité énergétique confirme que l'amélioration des performances du bâtiment doit être abordée selon une approche globale intégrant les aspects physiques, environnementaux et normatifs.

Ainsi, les éléments théoriques présentés dans ce chapitre fournissent le cadre scientifique nécessaire à l'étude de solutions innovantes visant à améliorer la stabilité thermique des bâtiments. Ils constituent la base conceptuelle pour l'analyse, dans les chapitres suivants, de l'intégration des matériaux à changement de phase comme stratégie avancée de régulation thermique et d'optimisation énergétique

Chapitre II

Matériaux à changement de phase (MCP)

Introduction

Le secteur du bâtiment représente aujourd'hui environ 40 % de la consommation énergétique mondiale et une part tout aussi significative des émissions de gaz à effet de serre. Face aux enjeux climatiques et à la nécessité de réduire notre dépendance aux énergies fossiles, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est devenue une priorité absolue. Parmi les solutions techniques prometteuses, les matériaux à changement de phase (MCP) se distinguent par leur capacité unique à stocker et restituer l'énergie thermique de manière quasi-isotherme, exploitant la chaleur latente de fusion.

Ce chapitre propose une étude approfondie des MCP, depuis leurs principes physiques fondamentaux jusqu'à leurs modalités d'intégration dans l'enveloppe des bâtiments. La première partie établit les définitions essentielles et le contexte historique de ces matériaux, en détaillant le mécanisme de transformation solide-liquide qui régit leur comportement thermique. La classification des MCP en trois grandes familles organiques, inorganiques et eutectiques est ensuite présentée avec leurs propriétés caractéristiques, leurs avantages et leurs limitations respectives. Une attention particulière est accordée aux critères de sélection thermodynamiques, chimiques, mécaniques et économiques qui conditionnent leur viabilité pour des applications dans le génie civil et la construction. Enfin, les techniques d'intégration disponibles (micro-encapsulation, incorporation directe, panneaux composites) sont analysées, de même que les bénéfices attendus en termes de confort thermique et d'économies d'énergie, ainsi que les contraintes techniques et économiques qui freinent encore leur diffusion à grande échelle.

L'objectif de ce chapitre est de fournir au lecteur les connaissances fondamentales et appliquées nécessaires pour comprendre, évaluer et sélectionner les MCP adaptés à des projets de construction neuve ou de rénovation énergétique, dans une perspective de développement durable.

1. Définition et Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase (MCP)

1.1.1. Définition Fondamentale

Les matériaux à changement de phase (MCP), désignés dans la littérature anglophone par l'acronyme PCM (Phase Change Materials), sont des substances capables d'absorber, de stocker et

de libérer de grandes quantités d'énergie thermique lors de leur transition d'un état physique à un autre, principalement de l'état solide à l'état liquide et vice-versa . Cette propriété remarquable leur confère la capacité d'agir comme des réservoirs thermiques intelligents, emmagasinant l'énergie excédentaire lorsque la température ambiante s'élève et la restituant lorsque celle-ci diminue[37].



Figure 8 :Matériaux micro-encapsulés qui respecte l'environnement de changement de phase de PCM pour le cycle de l'eau[38].

1.1.2. Principe Physique de la Transition de Phase

Le principe fondamental qui gouverne le comportement des MCP repose sur l'exploitation de la chaleur latente de fusion. Contrairement au stockage par chaleur sensible où l'énergie absorbée se traduit par une augmentation de la température du matériau, la chaleur latente correspond à l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons intermoléculaires et réorganiser la structure cristalline ou moléculaire du matériau sans élévation significative de sa température. C'est cette particularité qui permet aux MCP de maintenir une température quasi-constante pendant toute la durée du changement de phase, les rendant particulièrement précieux pour les applications de régulation thermique [37].

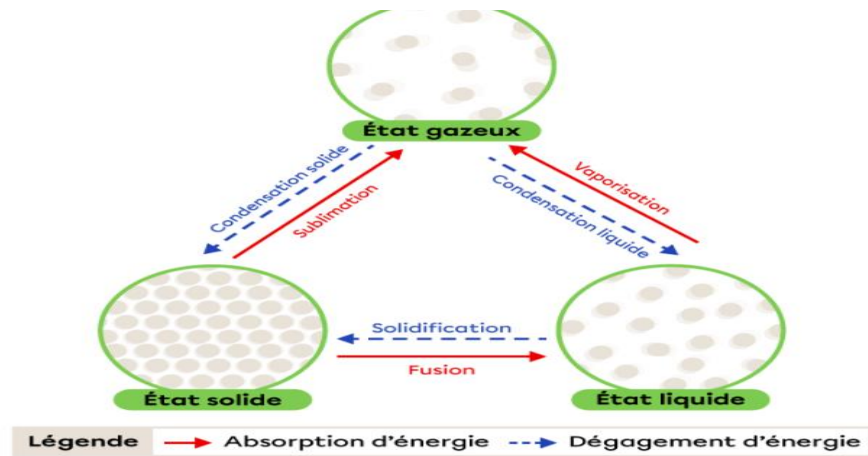


Figure 9 : Les différents modes de changements de phase[39].

1.1.3. Contexte Historique et Développement :

L'intérêt scientifique pour les MCP remonte aux années 1940-1950, avec les premières études systématiques menées par Telkes et Raymond sur les sels hydratés pour le chauffage solaire.[37]

Cependant, ce n'est qu'à partir des années 1970, suite aux chocs pétroliers, que la recherche s'est intensifiée significativement. La revue exhaustive de Zalba et al. en 2003 a marqué un tournant en synthétisant plus de 230 références et en établissant les bases théoriques et appliquées du domaine. Depuis, le nombre de publications n'a cessé de croître, témoignant de l'importance stratégique de ces matériaux dans le contexte actuel de transition énergétique et d'efficacité thermique [37].

1.1.4. Domaines d'Application

Les MCP trouvent des applications dans des secteurs variés :

- **Bâtiment et génie civil** : Intégration dans les plaques de plâtre, les bétons ou les enduits pour le confort thermique passif et la réduction des charges de climatisation[37].
- **Gestion thermique électronique** : Protection des composants sensibles contre les pics de chaleur[37].
- **Textiles intelligents** : Vêtements à régulation thermique pour les sports extrêmes ou les environnements professionnels[37].

- **Transport et logistique** : Maintien de la chaîne du froid pour les produits pharmaceutiques et alimentaires[37].
- **Énergies renouvelables** : Stockage de la chaleur solaire pour une utilisation différée[37].

1.2. Transformation Solide-Liquide et Stockage par Chaleur Latente :

1.2.1. L'Équation Fondamentale du Stockage par Chaleur Latente :

La quantité d'énergie thermique stockée ou libérée lors d'une transition de phase solide-liquide est régie par l'équation fondamentale suivante [37]:

$$Q = m \cdot \Delta H \quad (\text{II.1})$$

où :

- **Q** représente la quantité d'énergie thermique stockée ou libérée (en Joules ou kWh).
- **m** est la masse du matériau à changement de phase (en kg).
- **ΔH** est l'enthalpie de fusion (chaleur latente) du matériau (en J/kg ou kJ/kg).

Cette équation simple traduit la proportionnalité directe entre la masse de MCP utilisée et la capacité de stockage énergétique du système. Pour une application donnée, le dimensionnement repose donc essentiellement sur le choix du matériau (valeur de ΔH) et la quantité mise en œuvre [37].

1.2.2. Représentation Enthalpie-Température d'un MCP

Le comportement thermodynamique d'un MCP est parfaitement illustré par le diagramme enthalpie-température, qui met en évidence la différence fondamentale entre stockage sensible et stockage latent[37].

1.2.3. L'Enthalpie de Fusion comme Indicateur de Performance

La quantité d'énergie stockée est caractérisée par l'enthalpie de fusion (ΔH), exprimée en kJ/kg. Les MCP typiques présentent des chaleurs latentes variant de 100 à 300 kJ/kg, ce qui

représente une densité de stockage 5 à 14 fois supérieure à celle des matériaux de stockage sensible comme l'eau ou les roches . Cette propriété fondamentale explique l'intérêt considérable porté à ces matériaux pour les applications de gestion thermique[37] .

1.3. Critères Thermodynamiques Idéaux d'un Matériau à Changement de Phase

Pour qu'un MCP soit considéré comme techniquement et économiquement viable pour des applications pratiques, il doit satisfaire un ensemble de critères thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économiques[37] .

1.3.1. Critères Thermophysiques

- **Température de fusion appropriée** : La température de transition doit se situer dans la plage de fonctionnement de l'application visée (confort thermique, gestion électronique, etc) [37].
- **Chaleur latente élevée** : Une valeur élevée de ΔH est essentielle pour maximiser la densité de stockage énergétique et minimiser la masse de matériau nécessaire[37] .
- **Haute conductivité thermique** : Une bonne conductivité facilite les transferts thermiques et permet des vitesses de charge et décharge rapides[37] .
- **Forte chaleur spécifique** : Une capacité calorifique élevée dans les phases solide et liquide contribue au stockage sensible complémentaire[37] .
- **Faible variation volumique** : La variation de volume lors de la transition de phase doit être minimale (idéalement inférieure à 10 %) pour simplifier la conception des conteneurs et éviter les contraintes mécaniques [37].

1.3.2. Critères Cinétiques

- **Faible ou absence de surfusion** : La cristallisation doit se produire précisément à la température de fusion théorique pour garantir une restitution immédiate de l'énergie stockée [37].
- **Vitesse de cristallisation élevée** : Une nucléation et une croissance cristalline rapides assurent une décharge efficace [37].

1.3.3. Critères Chimiques et Environnementaux

- **Stabilité chimique à long terme** : Le matériau doit résister à des milliers de cycles de fusion-solidification sans dégradation [37].
- **Compatibilité avec les matériaux de confinement** : Absence de corrosion ou de réaction chimique avec les parois du conteneur [37]
- **Non-toxicité, non-inflammabilité** : La sécurité d'utilisation est primordiale, particulièrement pour les applications domestiques [37].
- **Faible impact environnemental** : Le matériau doit être recyclable ou biodégradable [37].

1.3.4. Critères Économiques

- **Faible coût** : Le matériau doit être disponible en grande quantité à un coût compétitif pour permettre un retour sur investissement raisonnable [37].
- **Disponibilité abondante** : Les ressources doivent être suffisantes pour un déploiement à grande échelle [37].

Aucun matériau ne satisfait idéalement tous ces critères simultanément, ce qui motive les recherches actuelles sur les composites et les mélanges eutectiques.

1.4. Absorption de la Chaleur Lors de la Fusion et Restitution Lors de la Solidification

1.4.1. Mécanisme du Cycle Thermique

Le principe fondamental de fonctionnement des MCP repose sur un cycle thermique réversible :

1. **Phase de charge (fusion)** : Lorsque la température dépasse le point de fusion du matériau, ce dernier absorbe l'énergie thermique sous forme de chaleur latente pour briser ses liaisons moléculaires et passer de l'état solide à l'état liquide [40].
2. **Phase de décharge (solidification)** : Lorsque la température redescend en dessous du point de fusion, le matériau se solidifie et libère l'énergie préalablement stockée [40].

1.4.2. Dynamique de l'Interface et Transfert Thermique

La cinétique de fusion et de solidification est gouvernée par le déplacement du front de phase, où l'interface solide-liquide se déplace progressivement à travers le matériau. Le taux de

transfert thermique dépend de la conductivité thermique du matériau et du gradient de température établi . Des études expérimentales ont démontré que la durée du processus de fusion est significativement influencée par la géométrie du conteneur et les conditions aux limites thermiques[40] .

1.5. Sensibilité des MCP aux Variations de Température et Comportement Thermique :

1.5.1. Critères de Sélection et Plage de Température

La température de fusion constitue le critère de sélection primordial pour toute application pratique . Les MCP doivent être choisis de manière à ce que leur température de transition se situe dans la plage de fonctionnement souhaitée. Pour les applications de confort thermique dans le bâtiment, par exemple, la température de fusion doit être comprise entre 20°C et 30°C . Cette sensibilité intrinsèque aux variations thermiques confère aux MCP leur capacité de régulation naturelle[41].

1.5.2. Stabilité Cyclique et Durabilité

La fiabilité à long terme des MCP est évaluée par leur stabilité après des cycles répétés de fusion-solidification. Sharma et al. soulignent l'importance de tester les MCP sur plusieurs centaines, voire milliers de cycles pour valider leur applicabilité pratique. Les paraffines et les mélanges eutectiques organiques présentent généralement une excellente stabilité cyclique, tandis que les sels hydratés sont plus sujets à la dégradation après cyclage[42] .

1.5.3. Phénomènes Critiques et Limites Opérationnelles

- **Surfusion (sous-refroidissement) :** Phénomène où le MCP reste à l'état liquide en dessous de sa température de solidification théorique, retardant ainsi la libération de l'énergie stockée . Ce problème affecte particulièrement les sels hydratés et peut compromettre leur efficacité pratique[43].
- **Faible Conductivité Thermique :** La conductivité thermique limitée des MCP organiques constitue la principale limitation à leur performance, réduisant la puissance de charge et de décharge du système . Cette limitation a motivé de nombreuses recherches sur

l'amélioration des transferts thermiques par l'incorporation de charges conductrices (nanoparticules, matrices métalliques, graphite expansé) [43].

- **Ségrégation de Phase** : Certains sels hydratés présentent une séparation de phases après plusieurs cycles, avec formation d'une couche de sel anhydre au fond du conteneur, réduisant progressivement la capacité de stockage effective [43].

2. Classification des Matériaux à Changement de Phase (MCP) et caractéristiques Principales

2.1. Matériaux Organiques : Cires, Acides Gras, Alcools

2.1.1. Généralités sur les MCP Organiques

Les matériaux à changement de phase organiques constituent la famille la plus étudiée et la plus largement utilisée dans les applications de stockage d'énergie thermique. Leur popularité repose sur une combinaison avantageuse de propriétés : une chaleur latente élevée, une bonne stabilité chimique, une fusion congruente et une capacité à être recyclés. Ils sont principalement représentés par les paraffines (cires), les acides gras et les alcools[44].

2.1.2. Les Paraffines (Cires)

Les paraffines sont des mélanges d'hydrocarbures saturés de formule générale C_nH_{2n+2} . Leur température de fusion augmente avec la longueur de la chaîne carbonée, offrant ainsi une large gamme de températures de transition, typiquement de $-20^{\circ}C$ à $100^{\circ}C$ [44].

Nom	Formule	Nombre d'atomes de C	Température de fusion ($^{\circ}C$)	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m·K)
n-Hexadécane	$C_{16}H_{34}$	16	18-20	210-240	0,21
n-Octadécane	$C_{18}H_{38}$	18	28-30	220-250	0,21
n-Eicosane	$C_{20}H_{42}$	20	36-38	240-260	0,21

CHAPITRE II : Matériaux à changement de phase (MCP)

Paraffine commerciale	-	18-50	40-60	180-230	0,20-0,25
-----------------------	---	-------	-------	---------	-----------

Tableau 4: Propriétés thermophysiques de quelques paraffines courantes[44].

Les paraffines présentent plusieurs avantages significatifs :

- Absence de surfusion (cristallisation rapide)
- Stabilité chimique et inertie vis-à-vis des matériaux de confinement
- Non-corrosivité
- Disponibilité abondante et coût modéré

Leur principal inconvénient réside dans leur faible conductivité thermique (environ 0,2 W/m·K), ce qui limite la puissance de charge et de décharge du système .

2.1.3. Les Acides Gras

Les acides gras sont des composés organiques de formule générale $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Ils présentent des propriétés thermiques comparables aux paraffines mais avec l'avantage supplémentaire d'être issus de ressources renouvelables (huiles végétales)[44].

Tableau 5: Propriétés des principaux acides gras utilisés comme MCP[44]

Acide gras	Formule chimique	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acide caprique	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	31-32	150-170
Acide laurique	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_2$	42-44	175-185
Acide myristique	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$	52-54	180-190
Acide palmitique	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	60-62	185-210
Acide stéarique	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	67-69	190-210

Les acides gras présentent l'avantage d'être biodégradables et d'avoir une bonne stabilité thermique après cyclage. Cependant, leur coût est généralement plus élevé que celui des paraffines

2.1.4. Les Alcoolset Polyols

Certains alcools et polyols (comme le polyéthylène glycol - PEG) présentent également des propriétés intéressantes pour le stockage thermique. Le PEG, par exemple, offre une chaleur latente élevée et une bonne stabilité, avec des températures de fusion ajustables en fonction de la masse moléculaire [45].

2.2. Matériaux Inorganiques : Sels Hydratés, Solutions Salines

2.2.1. Les Sels Hydratés

Les sels hydratés sont des alliages de sels inorganiques et d'eau, de formule générale $AB \cdot nH_2O$. Ils constituent la catégorie la plus importante des MCP inorganiques et sont particulièrement attractifs pour les applications de moyenne température (5°C à 130°C)[46].

2.2.2. Mécanisme de Fusion des Sels Hydratés

La fusion d'un sel hydraté peut se produire selon deux mécanismes :

- **Fusion congruente** : Le sel fond complètement pour former un liquide de même composition[46].
- **Fusion incongruente** : Le sel se dissout partiellement, formant une phase liquide saturée et un dépôt de sel anhydre au fond du conteneur. Ce phénomène, appelé ségrégation de phase, constitue l'un des principaux défis pour l'utilisation pratique des sels hydratés[46].

Tableau 6: Propriétés des sels hydratés couramment utilisés[46].

Sel hydraté	Formule	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m·K)
Chlorure de calcium hexahydraté	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29-30	170-190	0,5-0,6

CHAPITRE II : Matériaux à changement de phase (MCP)

Sel hydraté	Formule	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)	Conductivité thermique (W/m·K)
Sulfate de sodium décahydraté (sel de Glauber)	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32-34	180-250	0,5-0,6
Phosphate disodique dodécahydraté	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	35-40	200-280	0,5-0,6
Thiosulfate de sodium pentahydraté	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48-50	200-220	0,5-0,6

2.2.3. Avantages et Inconvénients des Sels Hydratés

Les sels hydratés présentent des atouts considérables [46]:

- Densité de stockage volumique élevée (supérieure aux organiques)
- Conductivité thermique plus élevée (environ 0,5 W/m·K)
- Coût relativement faible
- Non-inflammabilité

Cependant, ils souffrent de limitations importantes [46]:

- **Surfusion** : Le liquide ne cristallise pas à la température de fusion théorique, nécessitant l'ajout d'agents nucléants .
- **Ségrégation de phase** : Perte de capacité de stockage après cycles répétés.
- **Corrosion** : Interaction avec les matériaux de confinement métalliques .

2.2.4. Solutions Salines et MCP Métalliques :

Les solutions salines aqueuses sont utilisées pour des applications à basses températures (stockage de froid). Les MCP métalliques (alliages à bas point de fusion) sont réservés aux applications haute température (>300°C) en raison de leur excellente conductivité thermique mais de leur masse volumique élevée[46] .

2.3. Matériaux Eutectiques : Mélanges Optimisés pour des Températures de Fusion Spécifiques

2.3.1. Définition et Principe des Mélanges Eutectiques

Un matériau eutectique est un mélange de deux ou plusieurs constituants (organiques, inorganiques ou une combinaison des deux) qui fond et se solidifie de manière congruente à une température unique, inférieure à celle de chacun des constituants pris séparément . Cette propriété permet d'ajuster précisément la température de fusion pour répondre aux exigences d'une application spécifique[47].

2.3.2. Diagramme de Phase et Point Eutectique

Le comportement des mélanges eutectiques est décrit par leur diagramme de phase, qui montre la température de fusion en fonction de la composition.

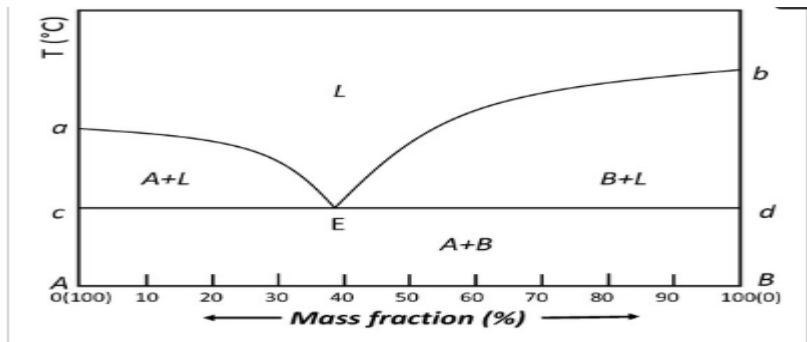


Figure 10: Diagramme de phase[48].

2.3.3. Exemples de MCP Eutectiques

La flexibilité offerte par les mélanges eutectiques permet de couvrir une large gamme de températures de fusion[47].

Tableau7:Exemples de mélanges eutectiques pour applications dans le bâtiment[47]

Composition	Proportion (% massique)	Température de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acide caprique - Acide laurique	65-35	18-20	140-150
Acide caprique - Acide myristique	70-30	21-22	150-160
Acide laurique - Acide palmitique	75-25	35-37	170-180
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	50-50	21-25	140-150
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – NaCl	90-10	20-22	160-170

2.3.4. Avantages des MCP Eutectiques

Les matériaux eutectiques offrent plusieurs avantages décisifs [47] :

- **Température de fusion ajustable** : Possibilité de concevoir des MCP sur mesure pour une application donnée[47].
- **Fusion congruente** : Absence de ségrégation de phase, garantissant une stabilité à long terme[47].
- **Densité de stockage élevée** : Les eutectiques peuvent présenter des chaleurs latentes comparables à celles des composants purs[47].
- **Possibilité de combiner les avantages** : Par exemple, associer la stabilité des organiques avec la conductivité des inorganiques[47].

Leur principal inconvénient réside dans la complexité de leur formulation et la nécessité de caractérisations précises pour valider leur comportement .

3. Propriétés Thermophysiques des MCP et Critères de Sélection pour l'Intégration dans les Bâtiments

3.1. Température de Fusion et Solidification Adaptée au Climat

3.1.1. Critère Fondamental de Sélection

La température de fusion constitue le paramètre le plus critique pour la sélection d'un MCP destiné à une application dans le bâtiment . Pour assurer un confort thermique optimal, cette température doit se situer dans la plage de fonctionnement souhaitée par l'application pratique.[49]

3.1.2. Adéquation avec les Conditions Climatiques

Le choix de la température de fusion doit tenir compte du climat local et de la saison d'utilisation :

- **Climats tempérés** : Une température de fusion autour de 22-24°C permet de lisser les variations journalières.
- **Climats chauds** : Des températures plus élevées (24-26°C) peuvent être préférées pour réduire les charges de climatisation.
- **Climats froids** : Des températures plus basses (20-22°C) favorisent le stockage des apports solaires passifs.

3.1.3. Hystérésis Thermique :

Un phénomène important à considérer est le comportement du MCP lors des cycles de fusion-solidification. Le processus de sélection d'un MCP approprié est extrêmement complexe mais crucial pour le stockage d'énergie thermique[49].

3.2. Capacité de Stockage Thermique (Chaleur Latente)

3.2.1. Importance de la Chaleur Latente

La chaleur latente (ΔH) détermine la quantité d'énergie qu'un MCP peut stocker par unité de masse. Pour les applications dans le bâtiment, une valeur élevée est recherchée pour maximiser l'inertie thermique avec une quantité minimale de matériau. Le MCP potentiel doit avoir la chaleur de fusion souhaitable spécifiée par l'application pratique[49] .

3.2.2. Valeurs Typiques et Exigences

Les MCP adaptés au bâtiment présentent généralement des chaleurs latentes comprises entre 150 et 250 kJ/kg . À titre de comparaison, cette valeur est environ 5 à 10 fois supérieure à la capacité de stockage sensible d'un matériau de construction conventionnel sur une plage de 10°C[49].

Tableau 8: Comparaison de la capacité de stockage MCP vs matériaux conventionnels[49]

Matériau	Chaleur latente (kJ/kg)	Chaleur sensible sur 10°C (kJ/kg)	Équivalence massique
Paraffine (MCP)	200	20	1 kg MCP $\approx$ 10 kg béton
Béton	-	8-10	-
Brique	-	8-9	-
Bois	-	12-15	-

3.2.3. Densité Énergétique Volumique

Pour l'intégration dans le bâtiment où l'espace est limité, la densité de stockage volumique est parfois plus pertinente que la valeur massique. Avec des MCP appropriés et la bonne méthode d'incorporation, le stockage d'énergie thermique par chaleur latente peut être économiquement efficace pour le chauffage et le refroidissement des bâtiment [49].

3.3. Conductivité Thermique et Stabilité Chimique et Mécanique

3.3.1. Conductivité Thermique :

Le Défi Majeur

La faible conductivité thermique des MCP organiques (0,2-0,3 W/m·K) constitue la principale limitation à leur efficacité pratique . Elle ralentit la pénétration de la chaleur dans le matériau et réduit la puissance de charge/décharge[50].

3.3.2. Techniques d'Amélioration de la Conductivité

Plusieurs stratégies ont été développées pour pallier cette limitation :

- **Incorporation de nanoparticules** : Graphène, nanotubes de carbone, nanoparticules métalliques[50].
- **Matrices poreuses conductrices** : Mousse métallique (aluminium, cuivre), graphite expansé[50].

- **Microencapsulation** : Confinement du MCP dans des coques conductrices[50].

3.3.3. Stabilité Chimique et Compatibilité

La stabilité chimique du MCP vis-à-vis des matériaux de construction est essentielle :

- **Corrosion** : Les sels hydratés peuvent corroder les conteneurs métalliques[50].
- **Compatibilité avec les matrices** : Dans les bétons ou plâtres, le MCP ne doit pas réagir avec le ciment ou les adjuvants[50].
- **Non-toxicité et non-inflammabilité** : Critères obligatoires pour les applications résidentielles[50] .

3.3.4. Stabilité Mécanique

Lors de l'intégration dans des matériaux de construction, le MCP ne doit pas compromettre les propriétés mécaniques[50] :

- Résistance à la compression
- Adhérence et cohésion
- Comportement au feu

Tableau9:Compatibilité des MCP avec les matrices de construction[50]

Type de MCP	Plâtre	Béton	Béton cellulaire	Bois
Paraffine	Bonne	Bonne	Bonne	Moyenne
Acide gras	Bonne	Moyenne	Moyenne	Faible
Sel hydraté	Faible (efflorescences)	Faible (corrosion)	Faible	Faible

3.3. Durabilité et Performances à Long Terme

Tableau 10 : Synthèse des critères de sélection des MCP pour l'intégration dans le bâtiments[51] .

Catégorie	Critère	Valeur/Objectif
Thermique	Température de fusion	20-26°C (selon climat)
	Chaleur latente	>150 kJ/kg
	Conductivité thermique	>0,5 W/m·K (améliorée)
	Hystérésis	<2°C
Physique	Variation volumique	<10%
	Densité	Adaptée à l'application
Chimique	Stabilité chimique	Non-réactif
	Compatibilité	Avec matrice et conteneur
	Non-toxicité	Oui
Durabilité	Stabilité cyclique	>1000 cycles
	Vieillessement	>20 ans
Économique	Coût	<5 €/kg (selon application)
	Disponibilité	Abondante

3.4.1. Stabilité Cyclique

La durabilité d'un MCP s'évalue par sa capacité à conserver ses propriétés après des milliers de cycles de fusion-solidification . Les recommandations internationales préconisent des tests sur au moins 1000 cycles pour valider une application dans le bâtiment[51].

3.4.2. Facteurs de Dégradation

Plusieurs phénomènes peuvent affecter les performances à long terme :

- **Ségrégation de phase** (sels hydratés)[51]
- **Oxydation** (certains organiques à haute température)[51]
- **Fuite** (problème d'encapsulation)[51]
- **Vieillessement chimique** (dégradation des agents épaississants ou nucléants)[51]

3.4.3. Critères de Sélection pour une Application Durable

Le choix d'un MCP pour une application durable dans le bâtiment repose sur une combinaison de critères thermiques, physiques, chimiques et économiques. Le processus de sélection d'un MCP approprié est extrêmement complexe mais crucial pour le stockage d'énergie thermique. Le MCP potentiel doit avoir la température de fusion, la chaleur latente et la conductivité thermique souhaitables spécifiées par l'application pratique. De plus, la stabilité chimique et la compatibilité avec les matériaux de construction sont essentielles pour garantir la durabilité à long terme du système [49].

3.4.4. Perspectives et Développements Récents

Les recherches actuelles se concentrent sur le développement de méthodes d'incorporation des MCP dans les structures de bâtiment, y compris les murs (plaques de plâtre), les planchers chauffants, les plafonds, l'isolation thermique, etc[49].

4. Techniques d'Intégration des MCP dans les Matériaux de Construction :

4.1. Micro-Encapsulation et Incorporation Directe dans les Briques

4.1.1. Principe de la Micro-Encapsulation

La micro-encapsulation est une technique qui consiste à enfermer de fines particules de MCP (cœur) dans une enveloppe polymérique ou inorganique (coque) de taille micrométrique (typiquement 1 à 1000 μm). Cette technologie a révolutionné l'utilisation des MCP dans le bâtiment en résolvant le problème majeur de fuite à l'état liquide. La coque protectrice empêche l'interaction directe du MCP avec la matrice du matériau de construction tout en permettant les échanges thermiques nécessaires à son fonctionnement [52].

4.1.2. Incorporation Directe dans les Briques et Matrices Cimentaires

Les MCP micro-encapsulés peuvent être incorporés directement dans les matériaux de construction traditionnels lors de leur fabrication [53]:

- **Briques de terre cuite** : Introduction dans la masse argileuse avant cuisson[53].
- **Béton et mortiers** : Mélange au ciment, sable et granulats lors de la préparation[53].
- **Plâtres et enduits** : Incorporation pour créer des parements intérieurs à inertie thermique renforcée[53].

Tableau 11: Effet du taux d'incorporation de MCP sur les propriétés des mortiers[53]

Taux d'incorporation (% massique)	Résistance à la compression (MPa)	Porosité (%)	Capacité de régulation thermique
0% (référence)	25,0	15	Faible
5%	21,5	18	Moyenne
10%	18,2	22	Bonne
15%	14,8	27	Très bonne
20%	11,5	32	Excellente

L'étude d'Illampas et al. démontre qu'à des dosages $\leq 20\%$ en masse, il est possible d'obtenir des mortiers avec des caractéristiques thermiques favorables sans compromettre leur comportement physico-mécanique au point d'exclure les applications de réparation/renforcement[53].

4.1.3. Avantages et Limites de l'Incorporation Directe

- **Avantages** : Mise en œuvre simple, distribution homogène du MCP, protection contre les fuites [52].

- **Limites** : Réduction des propriétés mécaniques proportionnelle au taux d'incorporation, coût supplémentaire lié au processus d'encapsulation[52] .

4.2. Utilisation de Panneaux Composites Préfabriqués Contenant des MCP:

4.2.1. Principe des Panneaux Composites

Les panneaux composites préfabriqués intègrent les MCP dans une structure multicouche optimisée, associant isolation thermique, stockage d'énergie et propriétés mécaniques . Cette approche permet une meilleure maîtrise de la qualité et une mise en œuvre simplifiée sur chantier[54].

4.2.2. Projets Innovants : Exemple du Projet MF-RETROFIT

Le projet européen MF-RETROFIT a développé des panneaux de façade multifonctionnels d'épaisseur réduite intégrant des nano-MCP encapsulés . Ces panneaux présentent des caractéristiques remarquables[54] .

Tableau 12: Caractéristiques des panneaux composites développés dans le projet MF-RETROFIT[54]

Caractéristique	Performance
Réduction d'épaisseur par rapport aux panneaux conventionnels	$\geq 40\%$
Réduction de masse	$\geq 40\%$
Conductivité thermique de la couche aérogel	$< 0,012 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
Vitesse d'installation	10 m ² en <3 heures par 2 ouvriers
Personnalisation	Température de fusion ajustable selon besoin client

4.2.3. Autres Types de Panneaux Composites

- **Panneaux de plâtre avec MCP** : Intégration de MCP micro-encapsulés dans les plaques de plâtre pour l'intérieur[55] .

- **Béton préfabriqué avec MCP** : Éléments structurels intégrant directement le MCP dans leur masse[55].
- **Panneaux sandwich** : Association d'une couche de MCP avec des isolants conventionnels (laine de roche, polystyrène)[55].

4.3. Stratégies pour les Bâtiments Neufs et pour la Rénovation Énergétique

4.3.1. Intégration dans les Bâtiments Neufs

Pour les constructions neuves, l'intégration des MCP peut être optimisée dès la conception :

- **Positionnement optimal** : Placement de la couche de MCP en fonction du climat et de l'orientation (côté intérieur pour le lissage diurne/nocturne, côté extérieur pour l'amortissement des pics) [55].
- **Dimensionnement** : Calcul de l'épaisseur et de la température de fusion en fonction des simulations thermiques dynamiques[55].
- **Intégration architecturale** : Les MCP peuvent être intégrés dans les murs, les planchers, les plafonds et même les menuiseries [55].

4.3.2. Stratégies pour la Rénovation Énergétique

La rénovation du parc existant représente un défi majeur où les MCP offrent des solutions adaptées :

- **Enduits et mortiers de rénovation** : Application d'un enduit contenant des MCP micro-encapsulés sur les murs intérieurs ou extérieurs existants . Cette technique permet d'augmenter l'inertie thermique de bâtiments légers sans travaux lourds[56].
- **Panneaux rapportés** : Fixation de panneaux composites préfabriqués sur les façades existantes. Le projet MF-RETROFIT a démontré la faisabilité d'une rénovation rapide avec des panneaux minces et légers[56] .
- **Doublage intérieur** : Pose de plaques de plâtre ou d'isolants contenant des MCP sur les murs intérieurs[56].

Tableau 13 : Comparaison des stratégies d'intégration des MCP pour la rénovation[56]

Technique	Complexité	Coût	Gain thermique	Épaisseur ajoutée
Enduit avec MCP	Faible	Modéré	Moyen	1-3 cm
Panneaux composites rapportés	Moyenne	Élevé	Élevé	5-10 cm
Doublage intérieur MCP	Moyenne	Modéré	Bon	5-15 cm

4.3.3. Considérations Pratiques pour le Choix de la Technique

Le choix de la technique d'intégration dépend de plusieurs facteurs [55] :

- Type de bâtiment (neuf ou existant)
- Contraintes architecturales et esthétiques
- Budget disponible
- Objectifs de performance énergétique
- Réglementation thermique locale

5. Avantages et Limites de l'Utilisation des MCP dans les Bâtiments

5.1. Réduction des Fluctuations Thermiques et Amélioration du Confort

5.1.1. Lissage des Variations de Température Intérieure

L'un des avantages les plus significatifs des MCP est leur capacité à réduire l'amplitude des fluctuations de température intérieure. En absorbant la chaleur excédentaire pendant les périodes chaudes et en la restituant pendant les périodes froides, les MCP agissent comme un "amortisseur thermique"[47].

Les études montrent que l'intégration de MCP permet :

- Réduire les pics de température intérieure jusqu'à 5,8°C[47]
- Maintenir les fluctuations de température dans une fourchette aussi faible que 2°C[47]
- Décaler le pic de chaleur de plusieurs heures, permettant une ventilation nocturne plus efficace[47]

5.1.2. Amélioration du Confort Thermique

Le confort thermique des occupants est significativement amélioré grâce à :

- Une température intérieure plus stable et plus proche de la zone de confort[47]
- Une réduction des sensations de paroi froide ou chaude[47]
- Une meilleure répartition de la température dans l'espace[47]

Tableau 14: Impact des MCP sur les indicateurs de confort thermique[47]

Indicateur	Sans MCP	Avec MCP	Amélioration
Amplitude journalière moyenne	6-8°C	2-4°C	50-70%
Heure du pic de température	14h00	18h00-20h00	Décalage de 4-6h
PMV (Predicted Mean Vote)	±1,2	±0,5	Plus proche de 0

5.2. Réduction de la consommation Énergétique et des besoins en chauffage / Climatisation

5.2.1. Économies d'Énergie Réalisées

L'intégration de MCP dans l'enveloppe du bâtiment permet de réduire significativement les consommations énergétiques liées au chauffage et à la climatisation.

Les résultats des études récentes indiquent [47] :

- Réduction des charges de climatisation : 15-42% selon le climat et la configuration
- Réduction des besoins de chauffage : 10-30%
- Économies globales sur la consommation HVAC : jusqu'à 30%

5.2.2. Mécanismes d'Économie d'Énergie

Les économies d'énergie sont obtenues par plusieurs mécanismes complémentaires[47]:

- **Réduction des apports de chaleur en été** : Le MCP absorbe une partie de la chaleur avant qu'elle n'atteigne l'espace intérieur.
- **Valorisation des apports solaires gratuits en hiver** : Stockage de la chaleur solaire diurne pour une restitution nocturne.

- **Lissage des pointes de demande** : Réduction de la puissance appelée pour la climatisation, permettant un dimensionnement plus faible des équipements.

5.2.3. Impact sur les Émissions de GES

En réduisant la consommation d'énergie fossile pour le chauffage et la climatisation, les MCP contribuent à la diminution des émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment, qui représente environ 40% des émissions globales[47] .

5.3. Contraintes Techniques : Coût, Complexité d'Intégration, Compatibilité avec les Matériaux de Construction

5.3.1. Défis Économiques et de Coût

Le coût constitue l'une des principales barrières à la diffusion massive des MCP dans le bâtiment :

- **Coût des matériaux** : Les MCP, surtout encapsulés, restent plus chers que les matériaux de construction conventionnels[47].
- **Retour sur investissement** : Les temps de retour peuvent être longs (5-15 ans selon les applications et le contexte énergétique)[47].
- **Surcoût de mise en œuvre** : Les techniques d'intégration spécifiques peuvent nécessiter une main-d'œuvre qualifiée[47]

5.3.2. Défis Techniques et de Durabilité

Plusieurs défis techniques persistent :

- **Compatibilité avec les matrices de construction** : L'incorporation de MCP peut affecter les propriétés mécaniques des matériaux porteurs (béton, mortier) comme montré précédemment[47].
- **Risques d'incendie** : Certains MCP organiques sont inflammables et nécessitent l'ajout de retardateurs de flamme[47].
- **Stabilité à long terme** : La dégradation possible après des milliers de cycles (ségrégation de phase pour les inorganiques, vieillissement des capsules)[47] .
- **Fuites potentielles** : Rupture des capsules ou dégradation des conteneurs avec le temps[47].

Tableau 15: Synthèse des contraintes techniques des MCP dans le bâtiment[47], [57]

Type de contrainte	Problématique	Solutions potentielles
Mécanique	Chute de résistance avec ajout de MCP	Limiter le taux d'incorporation (<20%)
Thermique	Faible conductivité	Nano-charges, matrices conductrices
Chimique	Corrosion (sels hydratés)	Encapsulation, sélection adaptée
Sécurité	Inflammabilité	Retardateurs de flamme, MCP incombustibles
Durabilité	Vieillessement cyclique	Stabilisants, choix de matériaux robustes

5.3.3. Complexité d'Intégration et Manque de Standardisation

- **Absence de normes spécifiques** : Le manque de cadres normatifs adaptés freine l'adoption par les professionnels[58] .
- **Nécessité de simulation** : L'optimisation du placement et du dimensionnement requiert des outils de simulation thermique dynamique complexes [58].
- **Formation des professionnels** : Les architectes et ingénieurs doivent acquérir de nouvelles compétences pour maîtriser ces matériaux[58].

5.3.4. Considérations Environnementales

Bien que les MCP contribuent à la réduction des émissions en phase d'usage, leur cycle de vie complet doit être considéré [58] :

- Énergie grise de fabrication
- Recyclabilité en fin de vie
- Toxicité potentielle de certains composants

Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases fondamentales nécessaires à la compréhension et à l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) dans le secteur du bâtiment.

Nous avons d'abord établi le principe physique du stockage par chaleur latente, mettant en évidence l'équation fondamentale $Q = m \cdot \Delta H$ et la capacité remarquable des MCP à stocker 5 à 14 fois plus d'énergie que les matériaux conventionnels. L'analyse des trois grandes familles de MCP organiques, inorganiques et eutectiques a révélé leurs avantages et limitations respectifs, soulignant qu'aucun matériau idéal n'existe et que le choix dépend nécessairement de l'application visée.

L'examen des critères de sélection a montré que la température de fusion (20-26°C pour le bâtiment), la chaleur latente (>150 kJ/kg) et la stabilité cyclique (>1000 cycles) sont les paramètres les plus critiques. La faible conductivité thermique des MCP organiques a été identifiée comme le verrou technologique majeur, des solutions existent néanmoins (nanoparticules, matrices conductrices, graphite expansé).

Enfin, les techniques d'intégration micro-encapsulation, incorporation directe et panneaux composites ont été présentées avec leurs domaines de pertinence respectifs. Les performances attendues en termes de réduction des fluctuations thermiques (jusqu'à 5,8°C) et d'économies d'énergie (15-42% pour la climatisation) justifient l'intérêt croissant pour ces matériaux, malgré les contraintes de coût et de complexité de mise en œuvre.

Le chapitre suivant sera dédié à l'étude expérimentale ou à la simulation numérique du comportement d'un MCP intégré dans une paroi de bâtiment.

Chapitre III

Modélisation numérique d'une brique intégrant un MCP

Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ensemble des outils mathématiques et numériques mis en œuvre pour simuler le comportement thermique d'une brique creuse en terre cuite intégrant différentes stratégies passives : remplissage des cavités par un matériau isolant (EPS), par un MCP (RT-42, acide caprique ou RT-27), ou par une combinaison des deux, associés à un revêtement interne à faible émissivité. Quatre configurations (C1 à C6) sont définies afin de comparer leurs performances à celle de la brique traditionnelle.

Dans un premier temps, les équations générales régissant les transferts de masse, de quantité de mouvement et d'énergie sont rappelées, avant d'être particularisées au cas d'un écoulement bidimensionnel, incompressible et laminaire. La méthode enthalpie-porosité, utilisée pour modéliser la fusion et la solidification du MCP, est ensuite détaillée. Les échanges radiatifs entre les surfaces internes des cavités sont pris en compte par le modèle de rayonnement .

La description du modèle physique et des quatre configurations est ensuite présentée, suivie des conditions initiales et aux limites. La validation du modèle numérique est obtenue par comparaison avec les résultats de la littérature (écart relatif maximal de 1,2 %). Enfin, la procédure de résolution numérique est exposée : méthode des volumes finis, algorithme SIMPLEC, maillage structuré de 76 000 éléments et pas de temps de 1 seconde.

Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus .

1. Équations générales

Pour modéliser les transferts de chaleur et les processus de changement de phase (solidification et fusion) au sein des briques de construction incorporant le MCP, il est nécessaire d'utiliser des équations qui établissent des liens entre divers paramètres, à savoir : la vitesse, la pression, la température et la fraction massique. Ces équations sont dérivées comme des cas particuliers des équations générales globales, qui comprennent l'équation de continuité, l'équation de conservation de la quantité de mouvement et l'équation de conservation de l'énergie .

1.1. Équation de continuité

Cette équation représente le principe de conservation de la masse pour un volume de matière contrôlé. Elle est formulée mathématiquement comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \cdot \vec{V}) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Où ρ est la masse volumique et V le vecteur vitesse.

1.2. Équation de conservation de la quantité de mouvement

La seconde loi de la dynamique énonce que le taux de variation de la quantité de mouvement au sein du volume de contrôle D est égal à la somme de toutes les forces extérieures agissant sur celui-ci. Cette loi s'exprime comme suit :

$$\frac{D}{Dt} \int_D \rho \cdot \vec{V} dV = \int_D \vec{F} dV + \int_D \rho \cdot \vec{\sigma} dS \quad (\text{III.2})$$

D représente le domaine du volume de contrôle (V), S désigne la surface du milieu continu, et σ le vecteur contrainte.

L'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V}}_{\boxed{a}} = \underbrace{\rho \vec{F} - \nabla P}_{\boxed{b}} + \underbrace{\frac{1}{3} \nabla \mu (\nabla \cdot \vec{V})}_{\boxed{c}} + \underbrace{\mu \nabla^2 \vec{V}}_{\boxed{d}} \quad (\text{III.3})$$

(a) Taux de variation et transport de la quantité de mouvement.

(b) Forces dues à la pression.

(c) Terme visqueux de Brinkman.

(d) Forces de viscosité.

Où : F et μ sont respectivement une force par unité de volume et la viscosité dynamique

1.3. Équation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est dérivée du premier principe de la thermodynamique et peut s'exprimer comme suit :

$$\underbrace{\frac{D(\rho c_p T)}{Dt}}_a = \underbrace{\Delta(kT)}_b + q + \underbrace{\beta T \frac{Dp}{DT}}_c + \underbrace{\mu \phi}_d = 0 \quad (\text{III.4})$$

Avec :

(a) La variation totale d'énergie (par accumulation et convection)

(b) La variation d'énergie par conduction.

q : Densité de puissance dissipée.

(c) La variation d'énergie due à la compressibilité.

(d) Dissipation irréversible due au frottement visqueux.

c_p, k, β sont respectivement la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

2. Description de model

Pour analyser l'effet de l'intégration du TIM (matériau d'isolation thermique) et du MCP (matériau à changement de phase) sur le comportement thermique d'une brique creuse en terre cuite, une brique creuse traditionnelle (HCB-10) contenant dix cavités a été choisie, comme illustré sur la figure 10. Cette brique creuse est la plus utilisée dans la construction des murs et des toitures des bâtiments en Algérie.

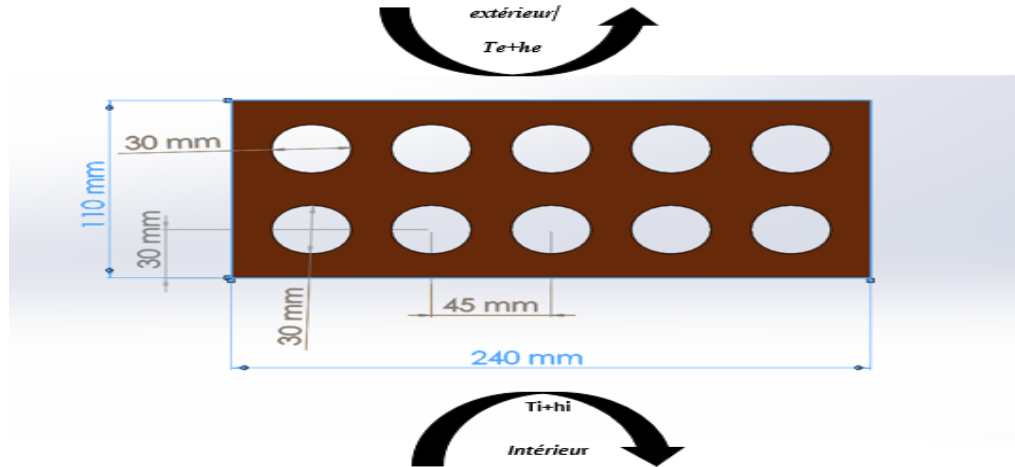
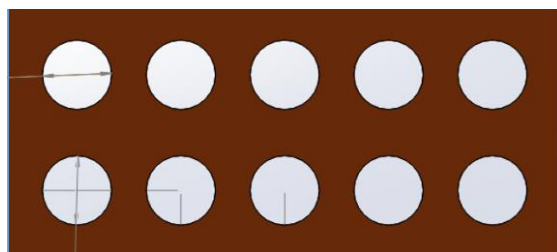


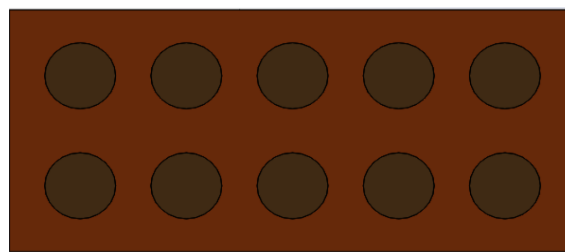
Figure 11 : Schéma du modèle physique de la brique creuse en terre cuite étudiée.

Cette étude numérique a été divisée en deux étapes pour estimer la performance thermique dynamique des briques creuses en terre cuite utilisées pour la toiture. La première étape a évalué la brique intégrant une mesure passive unique. Dans la deuxième étape, nous avons examiné s'il était possible de combiner deux mesures passives dans une même configuration.

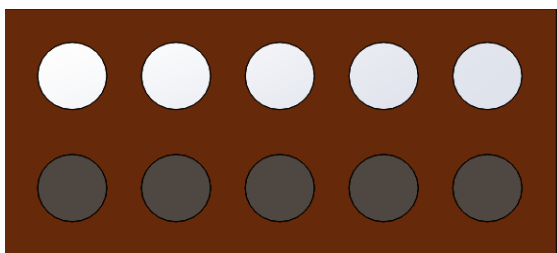
Six structures de briques (six cas) ont été adoptées pour l'étude thermique afin de comparer les performances thermiques des configurations proposées avec celle de la brique traditionnelle.



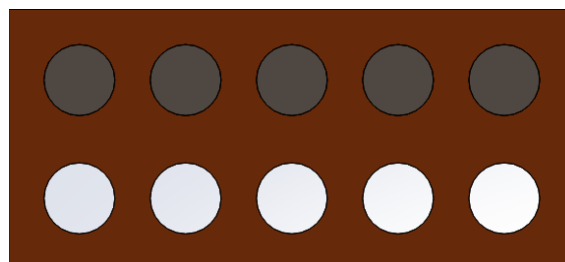
Brique +l'air



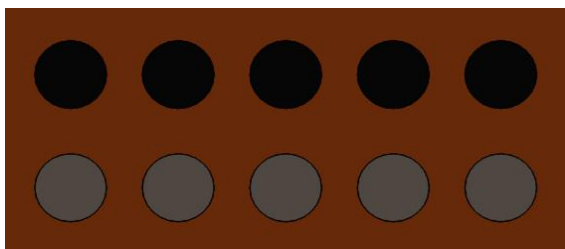
Brique +MCP(RT-42, acide caprique ,RT-27)



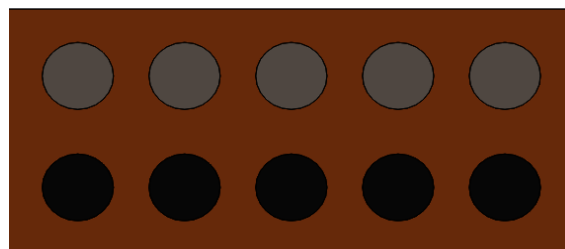
Brique +Air/MCP



Brique + MCP/Air



Brique + EPS/MCP



Brique +MCP/EPS

Figure12:Les défférents cas de Brique.

Le tableau présente les propriétés thermophysiques des briques, du matériau d'isolation et du MCP .

Tableau 16:les propriétés thermophysiques des briques, du matériau d'isolation et du MCP .

Propriété	RT-42	Acide caprique	RT-27	Air	EPS	Brick
Densité (kg/m^3)	885 (s) 820 (l)	1018 (s) 888 (l)	870 (s) 760 (l)	1.125	22	1976
Capacité thermique spécifique (J/kg. k)	1800 (s) 2400 (l)	1900 (l) 2400 (s)	1800 (s) 2400 (l)	1006	1280	835
Conductivité thermique (W/m. k)	0.2	0.372 (s) 0.153 (l)	0.24 (s) 0.15 (l)	0.0242	0.041	0.77
Viscosité (Pa.s)	0.02534	0.002664	0.00342	$1.846.10^{-5}$	-	-
Coefficient de dilatation thermique ($1/\text{k}$)	0.001	0.001	0.005	0.002857	-	-

Chaleur latente (kJ/kg)	141.6	152.7	179	-	-	-
Température solidus (°C)	39	31	24	-	-	-
Température liquidus (°C)	43	32	27	-	-	-

2.1. Équations gouvernantes

Dans un premier temps, les équations fondamentales qui régissent le système à MCP sont présentées. Les équations (III.6) à (III.14) traduisent les lois de conservation de la masse (continuité), de la quantité de mouvement et de l'énergie thermique dans le cas d'un écoulement bidimensionnel, incompressible et laminaire .

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.5})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{air}} \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{air} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] \quad (\text{III.6})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{air}} \left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{air} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{air} g \Delta T \right] \quad (\text{III.7})$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda_{air}}{\rho_{air} C_{p,air}} \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right] \quad (\text{III.8})$$

Où :

- ρ = masse volumique du fluide (kg/m³)
- ui = vitesse (m/s)
- T = température (°C)
- P = pression statique (Pa)
- μ = viscosité dynamique (Pa·s)
- β = coefficient de dilatation thermique volumétrique (1/°C)

- λ = conductivité thermique (W/m·K)
- C_p = chaleur spécifique (J/kg·K)

Pour la brique, l'équation gouvernante peut être formulée comme suit :

$$(\rho C)_b \frac{\partial T_b}{\partial t} = \lambda_b \left(\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.9})$$

Pour le matériau à changement de phase (MCP), on a recours à la méthode enthalpie-porosité. Celle-ci simplifie la modélisation du transfert de chaleur pendant la fusion et la solidification au sein de la couche de MCP.

$$\frac{\partial(\rho_{PCM} h_{PCM})}{\partial t} = \lambda_{PCM} \left(\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_b}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.10})$$

L'enthalpie du MCP, notée h_{PCM} , est définie par :

$$h_{PCM} = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^{T_{PCM}} C_{P,PCM} T_{PCM} + f L_{f,PCM} \quad (\text{III.11})$$

- f représente la fraction liquide,
- L_f est la chaleur latente de fusion du MCP.

La fraction liquide f est déterminée selon la température T :

où :

$$\begin{aligned} f &= 0, \quad T < T_{solidus}, \\ f &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}, \quad T_{liquidus} < T < T_{solidus}, \\ f &= 1, \quad T > T_{liquidus}, \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

Par ailleurs, les échanges radiatifs entre les surfaces internes des cavités de la brique sont modélisés par

$$q_{r,i}(r_i) = B_i(r_i) - \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^1 \int_{S_j} B_j(r_j) k(r_i, r_j) dS_j, i = 1 \dots 4 \quad (\text{III.13})$$

Dans cette expression :

- $B_i(r_i)$ est la radiosité sur la surface S_i .

$k(r_i, r_j)$ est la fonction noyau (ou fonction de transfert) reliant les points r_i et r_j .

2.2. Conditions initiales et aux limites

Les côtés gauche et droit de la brique alvéolée ont été considérés comme adiabatiques. La face extérieure de la brique est soumise à un rayonnement dépendant du temps ainsi qu'à une condition limite de convection forcée, avec un coefficient d'échange $h_i=20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Sur la surface intérieure, une condition de convection naturelle a été imposée, avec $h_e=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ et une température $T_e = 318 \text{ K}$. La température initiale du domaine est fixée à 298 K .

2.3. Validation du modèle et procédure de résolution numérique

Pour vérifier la précision et la fiabilité du modèle numérique développé dans cette étude, les résultats de la simulation ont été comparés à ceux publiés par **Alawadhi (2008)**[59], qui a étudié une brique de construction contenant un matériau à changement de phase de type **n-Eicosane**. La comparaison a montré un excellent accord entre les résultats, avec des écarts ne dépassant pas **1 W/m²** pendant toute la période de simulation, ce qui confirme la capacité du modèle à simuler les phénomènes physiques de transfert de chaleur et de fusion avec une précision et une fiabilité permettant son utilisation pour l'étude des différentes configurations.

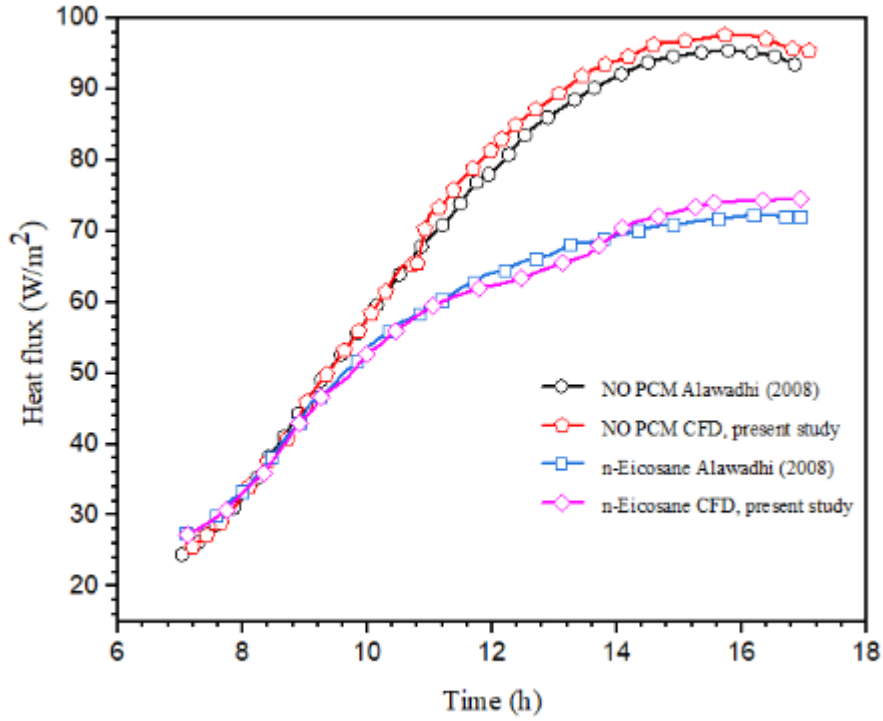


Figure 13:Validation du modèle numérique – Comparaison des résultats[59].

2.4. Délai de décalage du pic de température

La capacité de stockage thermique du matériau à changement de phase (MCP) permet théoriquement de retarder l'apparition du pic de température journalier par rapport à celui observé dans une paroi en brique traditionnelle dépourvue de MCP. Le décalage temporel entre l'instant où le pic de température est théoriquement attendu et celui où il se manifeste réellement, sous l'effet de l'absorption calorifique par le MCP, est défini comme le temps de décalage du pic de température. Ce paramètre est évalué par l'expression suivante :

$$\varphi = \tau_{n,max} - \tau_{t,max} \quad (\text{III.14})$$

où :

- φ : temps de décalage du pic de température [h] ;
- $\tau(n,max)$: instant d'apparition du pic de température dans la brique intégrant un MCP ;

- $\tau(t, \max)$: instant d'apparition du pic de température dans la brique traditionnelle (sans MCP).

Une valeur élevée de ϕ traduit une meilleure performance thermique de la brique avec MCP, reflétant sa capacité à retarder efficacement le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment.

Conclusion

Ces dernières années, la modélisation par dynamique des fluides numérique (CFD) de l'enveloppe des bâtiments intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) a connu un essor considérable, tant dans le cadre d'applications industrielles que de travaux de recherche académique visant à améliorer l'efficacité thermique des bâtiments. Cette tendance s'explique par les nombreux avantages offerts par les simulations CFD. Parmi ceux-ci, on peut citer l'évitement d'expériences coûteuses, l'obtention rapide de solutions grâce à des algorithmes de calcul permettant d'ajuster les paramètres, ainsi que la collecte de données sur l'ensemble du domaine sans perturbation. L'utilisation d'un logiciel CFD pour simuler le comportement des MCP dans les systèmes thermiques élimine le recours à des dispositifs expérimentaux onéreux. Cela permet des économies significatives, tant en temps qu'en coûts, liés à l'acquisition des matériaux, à la fabrication ou à la construction de systèmes réalistes. De plus, les simulations CFD aident à identifier les paramètres opérationnels pour optimiser les systèmes de stockage thermique, améliorant ainsi l'efficacité globale. Dans ce chapitre, nous avons décrit les procédures CFD utilisées dans nos deux applications, ainsi que la modélisation et la validation de nos résultats afin d'en accroître la précision. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation des résultats et à leur discussion.

Chapitre IV

*Étude comparative de l'influence de la position du MCP sur
L'inertie thermique*

Introduction

L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments constitue un levier essentiel pour réduire les besoins énergétiques liés au chauffage et à la climatisation. Parmi les solutions innovantes, l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les briques creuses en terre cuite offre un potentiel intéressant pour le stockage de chaleur latente et la régulation thermique passive. Cependant, l'efficacité d'un tel système dépend fortement de plusieurs facteurs, notamment le type de MCP utilisé, son emplacement dans les cavités de la brique, ainsi que sa disposition par rapport à d'autres matériaux isolants comme l'air ou l'EPS.

Ce chapitre a pour objectif d'étudier systématiquement ces différents paramètres. Dans un premier temps, l'influence de trois types de MCP (RT-42, RT-27 et acide caprique) est évaluée par rapport à une configuration de référence sans MCP. Ensuite, l'effet de la position relative du MCP par rapport à des couches d'air est analysé. Enfin, l'impact de l'ajout de couches d'EPS, en amont ou en aval du MCP, est examiné. Les critères de comparaison retenus sont principalement la température de surface intérieure et le flux thermique traversant la paroi, afin de dégager les configurations les plus performantes en termes de régulation thermique et de réduction des besoins énergétiques.

1. Analyse des résultats

1.1.Effet de l'étude de différents type de matériau à changement de phase dans brique

Afin d'évaluer l'influence du type de matériau à changement de phase (MCP) intégré dans les briques creuses en terre cuite, trois MCP RT-42, RT-27 et l'acide caprique ont été analysés.

Dans un premier temps, une configuration de référence a été considérée, où toutes les cavités de la brique restaient remplies d'air uniquement (sans MCP). Ensuite, pour chaque type de MCP, les cavités ont été directement remplies du matériau. Les autres caractéristiques géométriques de la brique sont restées inchangées.

Ces briques enrichies en MCP ont ensuite été évaluées et comparées à la brique de référence afin de déterminer les améliorations en termes de performance thermique .

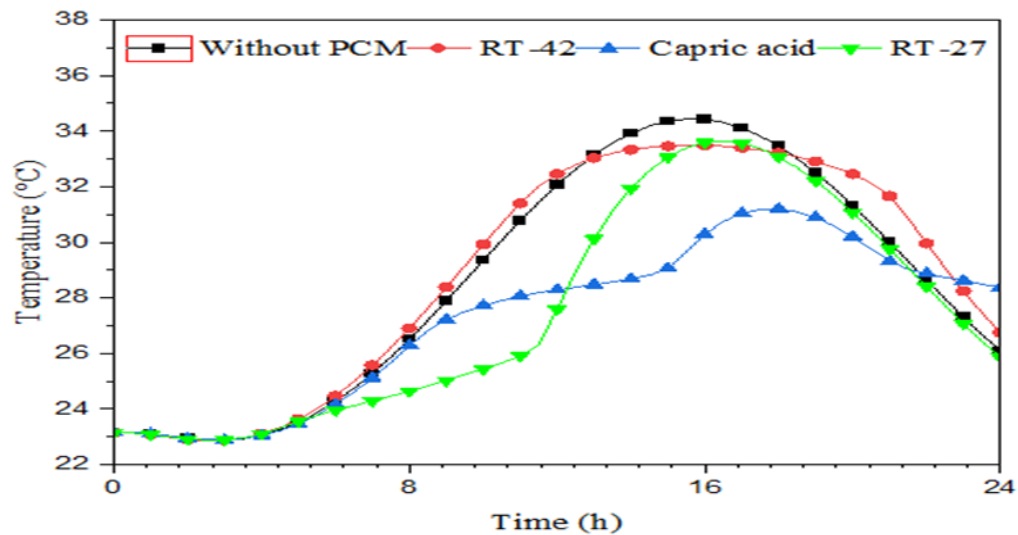


Figure14 :Variations de la température de surface intérieure pour différents types de MCP.

Les résultats présentés mettent en évidence l'apport significatif des matériaux à changement de phase (MCP) intégrés directement dans les cavités de la brique creuse, par rapport à la configuration de référence sans MCP. Dans le cas de référence, la température de surface intérieure atteint un pic de 34°C vers la 16ème heure, sans présenter de plateau, ce qui traduit l'absence totale de stockage de chaleur latente. L'introduction d'un MCP permet non seulement de réduire ce pic, mais aussi de créer un plateau de fusion caractéristique du phénomène de changement de phase. Trois MCP ont été évalués : le RT-42, le RT-27 et l'acide caprique. En raison de sa température de fusion élevée (42 °C), le RT-42 ne fond pas dans la plage thermique considérée (max 33 °C) et son comportement reste similaire à celui du cas de référence. Le RT-27 présente un plateau bien marqué à la 16 ème heure, stabilisant la température entre 32 °C avec une réduction du pic de 5 °C. Toutefois, l'acide caprique se distingue comme le matériau le plus performant parmi les trois testés. Bien que son plateau soit moins étendu à la 18ème heure, autour de 29 °C, il offre une réduction du pic de 3 °C, associée à une stabilité thermique remarquable sur une plus longue durée. De plus, l'acide caprique retarde efficacement l'occurrence du pic thermique et assure un meilleur équilibre entre l'absorption et la restitution de la chaleur, grâce à son point de fusion optimal et à sa capacité thermique latente élevée. En conclusion, l'intégration d'un MCP améliore incontestablement la performance thermique par rapport à une cavité remplie d'air, et l'acide caprique s'avère être le

matériau le plus adapté pour atteindre une régulation thermique efficace dans les briques creuses en terre cuite.

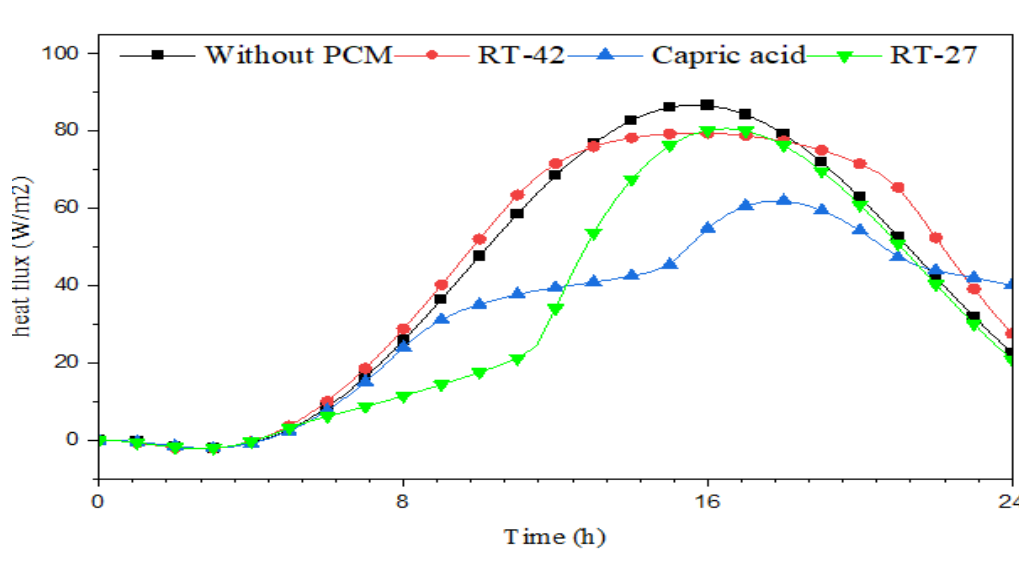


Figure15: Variations du flux de chaleur intérieur pour différents types de MCP.

La Figure 13 illustre l'évolution temporelle du flux thermique traversant la surface intérieure de la brique pour les différentes configurations étudiées. Les résultats obtenus confirment que l'intégration d'un MCP améliore significativement la performance thermique par rapport à la configuration de référence sans MCP. Dans le cas de référence, le flux thermique maximal atteint une valeur élevée sans aucun amortissement avec un flux 80 à 16 h , ce qui traduit une faible inertie thermique. L'introduction d'un MCP permet de réduire ce flux et d'atténuer les pics de transfert thermique. Trois MCP ont été évalués : le RT-42, le RT-27 et l'acide caprique. Le RT-42, dont la température de fusion est trop élevée (42 °C) par rapport aux sollicitations thermiques appliquées (max 34 °C), n'apporte qu'une amélioration très limitée, avec un flux maximal 70 à 16 h . Le RT-27, bien qu'efficace sur le plan de la température, le flux thermique maximal 60 à 16 h. ce qui reste modeste. En revanche, l'acide caprique se révèle nettement supérieur aux deux autres MCP, avec un du flux thermique maximal 50 à 18 h . Cette performance exceptionnelle s'explique par la combinaison de ses propriétés thermophysiques : un point de fusion optimal situé autour de 31-32 °C, une capacité thermique latente élevée et une résistance thermique accrue pendant sa phase de fusion. Ainsi, l'acide caprique oppose une barrière thermique efficace qui ralentit considérablement la propagation de la chaleur vers l'intérieur. En conclusion, l'intégration d'un MCP dans les cavités

de la brique creuse améliore incontestablement le comportement face aux flux thermiques entrants, et l'acide caprique est le matériau le plus performant pour minimiser les transferts de chaleur et réduire les besoins en refroidissement.

1.2. Effet de l'étude de différents positions de MCP/AIR dans brique

Deux configurations supplémentaires ont été analysées et comparées à une référence contenant uniquement l'acide caprique. Nous avons choisi l'acide caprique car il a donné les meilleures performances lors des expériences précédentes.

- **Configuration "capric acid"** : Référence à base d'acide caprique seul.
- **Configuration "pcm/air"** : Structure en couches avec MCP puis air.
- **Configuration "air/pcm"** : Structure en couches avec air puis MCP.

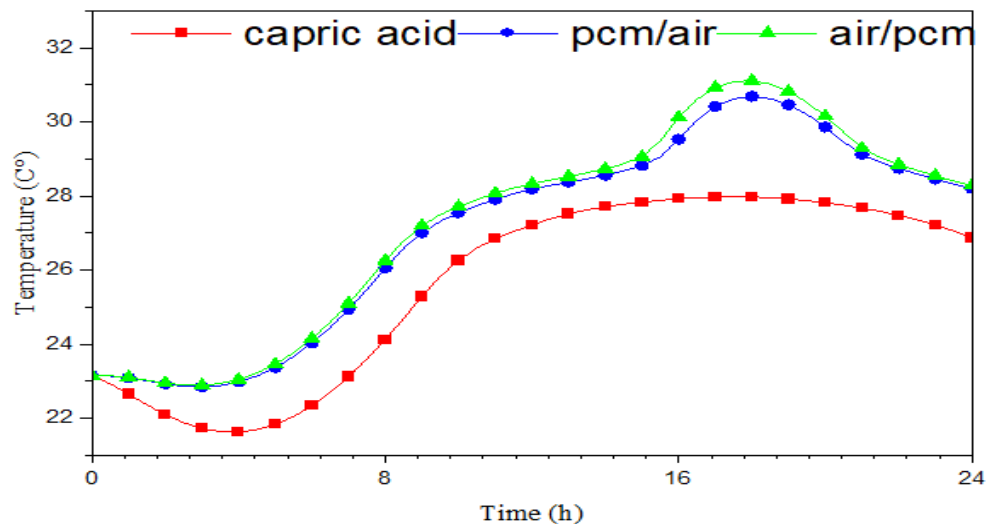


Figure16 :Température de la surface interne pour différentes positions de pcm/air .

Les résultats de température montrent clairement que la configuration acide caprique seul offre la meilleure performance thermique, avec un plateau stable à 28°C entre la 16^{ème} heure, une température maximale de seulement 28°C et un pic thermique vers la 16-18^{ème} heure. L'ajout de couches d'air, que ce soit dans la configuration MCP/air ou air/MCP, dégrade significativement cette performance. En effet, la température maximale atteint 30°C pour PCM/air et 31°C pour air/MCP vers la 18^{ème} heure , soit respectivement 3°C et 4°C de plus que la référence. Cette

dégradation s'explique par le fait que la couche d'air, bien qu'isolante, retarde le contact thermique entre la source de chaleur et le MCP, ce qui empêche ce dernier de fondre efficacement et de jouer son rôle de régulateur thermique. Ainsi, pour maximiser l'efficacité d'un MCP, il est essentiel de le placer directement au contact des surfaces d'échange thermique, sans couche d'air intermédiaire.

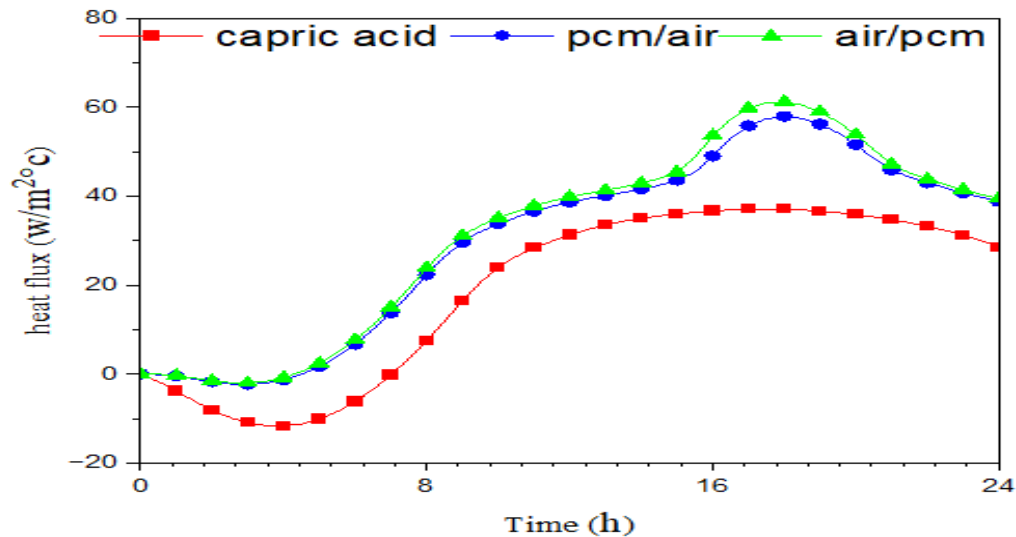


Figure17: Flux de chaleur de la surface interne pour différentes positions de pcm/air.

L'analyse du flux thermique confirme et complète ces observations. La configuration acide caprique seul présente un comportement équilibré avec un flux entrant maximal de 40 $\text{W/m}^2\text{°C}$ vers la 16^{ème} heure. En revanche, les configurations avec couche d'air montrent des flux entrants beaucoup plus élevés : vers la 18^{ème} heure pour PCM/air et 60 $\text{W/m}^2\text{°C}$ vers la 18^{ème} heure pour air/MCP de flux 61. De plus, le flux sortant (refroidissement nocturne) est considérablement réduit dans ces deux configurations, ce qui indique une capacité de refroidissement très faible. Ainsi, l'ajout d'une couche d'air, quelle que soit sa position, dégrade sévèrement les performances thermiques globales.

1.3. Effet de l'étude de différents positions de MCP/EPS dans brique:

Trois configurations ont été analysées et comparées :

- **Capric acid seul** : Configuration de référence contenant uniquement l'acide caprique.

- **MCP/EPS** : Couche de MCP (acide caprique) suivie d'une couche d'EPS.
- **EPS/MCP** : Couche d'EPS suivie d'une couche de MCP (acide caprique).

Nous avons choisi l'acide caprique car il a donné les meilleures performances lors des expériences précédentes.

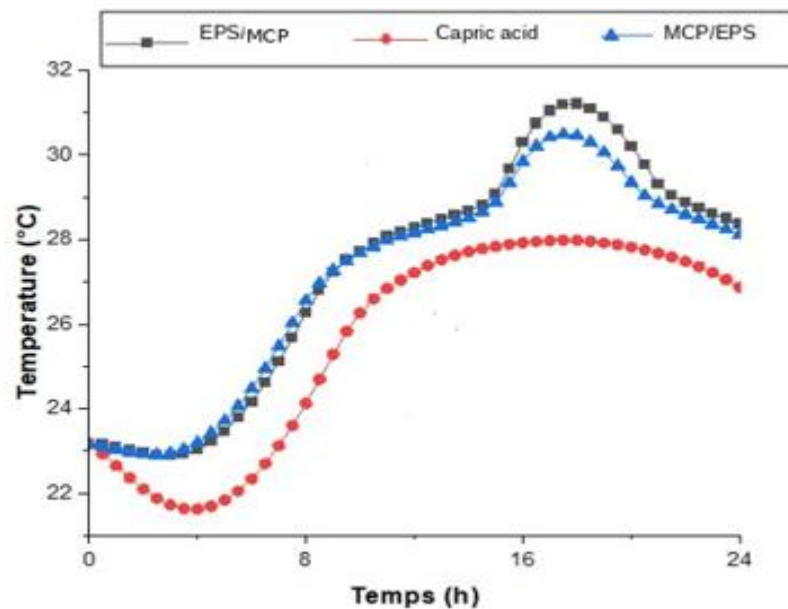


Figure18:Température de la surface interne pour différentes positions de pcm/EPS.

Les résultats de température montrent clairement que la configuration acide caprique seul offre la meilleure performance thermique, avec un plateau stable à 28°C entre la 18ème heure. L'ajout de couches d'EPS, que ce soit dans la configuration MCP/EPS ou EPS/MCP, dégrade significativement cette performance. En effet, la température maximale atteint 30°C pour MCP/EPS et 33°C pour EPS/MCP, soit respectivement 3°C et 4°C de plus que la référence, avec un pic thermique vers la 18ème heure dans les deux cas. Cette dégradation s'explique par le fait que la couche d'EPS, bien qu'isolante, retarde le contact thermique entre la source de chaleur et le MCP, ce qui empêche ce dernier de fondre efficacement et de jouer son rôle de régulateur thermique. Ainsi, pour maximiser l'efficacité d'un MCP, il est essentiel de le placer directement au contact des surfaces d'échange thermique, sans couche d'EPS intermédiaire.

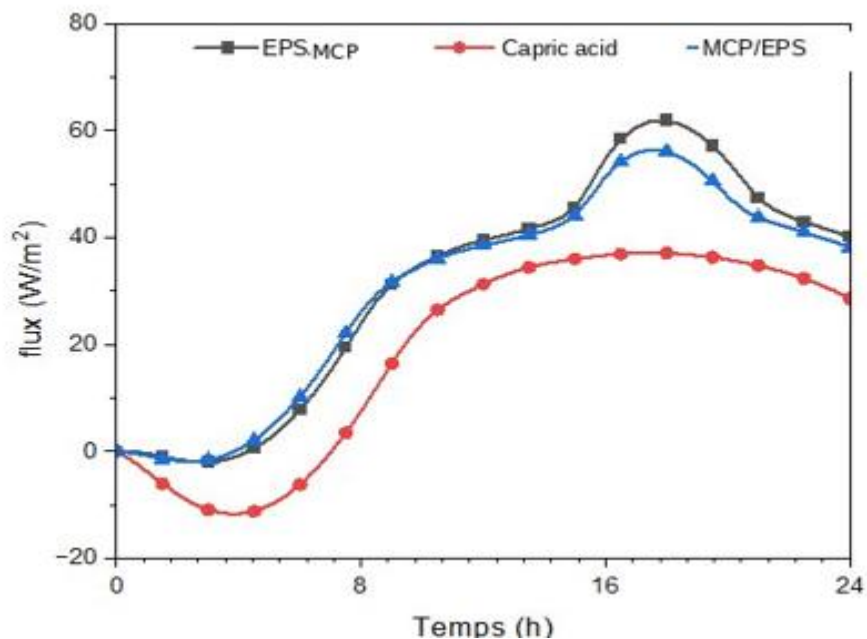


Figure19 :Flux de chaleur de la surface interne pour différentes positions de pcm/Eps.

L'étude du flux thermique à travers les différentes configurations révèle une hiérarchie de performances inverse à celle attendue. La configuration acide caprique seul affiche la plus faible densité de flux thermique entrant, dont le maximum n'excède pas 30 W/m², témoignant d'une efficacité remarquable pour contrer les gains thermiques diurnes. À l'opposé, la configuration MCP/EPS présente le flux maximal le plus élevé 50 W/m², traduisant une détérioration significative des propriétés d'isolation liée probablement à une interaction défavorable entre le matériau à changement de phase et la couche d'EPS. La configuration EPS/MCP se positionne à un niveau intermédiaire avec un flux thermique 60 W/m², confirmant un effet bénéfique modéré mais inférieur à celui de l'acide caprique seul. Ces résultats suggèrent que l'ajout systématique d'une couche d'EPS, loin d'être toujours bénéfique, peut s'avérer contre-productif selon l'ordre d'agencement des matériaux. En conclusion, pour une optimisation du comportement thermique visant à réduire les flux entrants, la solution la plus simple — l'acide caprique seul — demeure la plus performante parmi les configurations évaluées.

Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer l'influence du type de matériau à changement de phase, de sa position dans la brique creuse, ainsi que de son association avec l'air ou l'EPS, sur la performance thermique de l'enveloppe du bâtiment.

L'ensemble des résultats obtenus montre que l'intégration d'un matériau à changement de phase améliore significativement la régulation thermique par rapport à une configuration sans MCP. Parmi les trois matériaux testés, l'acide caprique se distingue nettement comme le plus performant, grâce à sa température de fusion adaptée et à ses propriétés thermophysiques équilibrées.

En ce qui concerne la position du MCP, il est démontré que toute couche intermédiaire d'air dégrade fortement les performances, tandis qu'une fine couche d'EPS placée stratégiquement peut offrir un compromis intéressant sans compromettre l'efficacité globale.

En conclusion, l'acide caprique constitue le matériau à changement de phase le mieux adapté pour une intégration directe et optimisée dans les briques creuses en terre cuite, permettant une réduction efficace des pics thermiques et une meilleure maîtrise des flux de chaleur.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments, en réponse aux défis croissants liés à la consommation énergétique et au confort intérieur dans les régions à climat chaud, notamment en Algérie. Face aux limites des solutions passives conventionnelles, l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les briques creuses en terre cuite a été retenue comme axe d'investigation principal, en raison de leur capacité exceptionnelle à stocker et à restituer l'énergie thermique sous forme de chaleur latente.

Le premier chapitre a établi les fondements théoriques indispensables à la compréhension des transferts thermiques dans les parois des bâtiments. L'analyse des trois modes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement a mis en évidence la complexité des phénomènes physiques couplés qui gouvernent le comportement thermique dynamique des parois. La notion d'inertie thermique, traduite par les paramètres d'amortissement et de déphasage, a été définie comme indicateur fondamental de la performance des matériaux de construction face aux sollicitations climatiques variables. Cette base théorique a permis de justifier le recours aux MCP comme solution innovante pour renforcer l'inertie thermique des parois légères.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude approfondie des matériaux à changement de phase. La classification en trois familles organiques, inorganiques et eutectiques a révélé la diversité des propriétés thermophysiques disponibles et l'importance cruciale du choix du MCP selon l'application visée. Il a été démontré que la température de fusion, la chaleur latente et la stabilité cyclique constituent les critères de sélection déterminants pour une application dans le bâtiment. Par ailleurs, les différentes techniques d'intégration ont été présentées, soulignant que la micro-encapsulation représente la méthode la plus adaptée pour assurer la compatibilité chimique et la durabilité du système.

Le troisième chapitre a présenté le modèle numérique développé sous Ansys-Fluent pour simuler le comportement thermique d'une brique creuse en terre cuite à dix cavités (HCB-10), la plus utilisée dans la construction en Algérie. La méthode enthalpie-porosité a été adoptée pour modéliser les phénomènes de fusion et de solidification du MCP, tandis que les échanges radiatifs entre les surfaces internes des cavités ont été pris en compte. La validation du modèle par

comparaison avec les résultats publiés par Alawadhi (2008) a confirmé sa précision, avec un écart relatif maximal inférieur à 1,2 %, conférant ainsi une fiabilité suffisante aux résultats obtenus.

Le quatrième chapitre, consacré à l'analyse et à la discussion des résultats, a permis de dégager des conclusions importantes sur trois plans distincts. Premièrement, l'évaluation comparative de trois types de MCP le RT-42, le RT-27 et l'acide caprique a montré que l'acide caprique constitue le matériau le plus performant parmi les candidats étudiés. Sa température de fusion adaptée au contexte climatique algérien (31-32 °C) et sa chaleur latente élevée lui permettent de réduire le flux thermique maximal de 28,7 %, surpassant nettement le RT-27 (7,1 %) et le RT-42 (8,5 %), ce dernier ne fonctionnant pas dans la plage thermique considérée. Deuxièmement, l'étude de l'effet de position du MCP par rapport à des couches d'air a démontré que toute interposition d'une couche d'air entre la source thermique et le MCP perturbe significativement le processus de fusion, augmentant la température de surface intérieure de 3 à 4 °C et le flux thermique de 72 à 82 %. Ces résultats indiquent qu'un contact thermique direct est indispensable pour une efficacité maximale du MCP. Troisièmement, l'analyse de l'association MCP/EPS a révélé une complémentarité intéressante : si l'ajout d'EPS dégrade légèrement la régulation de la température de surface, la configuration MCP/EPS permet en revanche une réduction remarquable du flux thermique entrant de 39,3 %, en combinant la barrière isolante de l'EPS et la capacité de stockage latente de l'acide caprique.

En synthèse, ce travail a apporté des réponses concrètes à la problématique posée : l'acide caprique, intégré directement dans les cavités de la brique creuse sans couche d'air intermédiaire, représente la configuration optimale pour améliorer la performance thermique des briques creuses en terre cuite dans le contexte climatique. L'association stratégique de l'acide caprique avec une couche d'EPS (configuration MCP/EPS) constitue une alternative complémentaire particulièrement efficace pour la réduction des flux thermiques entrants, offrant ainsi un double avantage : isolation et régulation thermique.

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées. Sur le plan numérique, il serait pertinent d'étendre le modèle à une simulation tridimensionnelle afin d'affiner la précision des résultats et de mieux représenter la géométrie réelle de la brique. Sur le plan expérimental, la fabrication d'un prototype de brique intégrant l'acide

caprique et sa caractérisation thermique en conditions réelles permettrait de valider les prédictions numériques et d'évaluer la durabilité du système après plusieurs milliers de cycles thermiques. Enfin, une étude technico-économique comparative permettrait d'évaluer la viabilité de cette solution à grande échelle dans le contexte algérien, en tenant compte du coût des matériaux, du retour sur investissement énergétique et de l'impact environnemental global sur le cycle de vie du bâtiment.

En définitive, ce mémoire démontre que l'intégration des matériaux à changement de phase dans l'enveloppe des bâtiments représente une voie prometteuse et techniquement viable pour améliorer le confort thermique tout en réduisant la consommation énergétique. Les résultats obtenus contribuent à enrichir la base de données scientifique dans ce domaine et ouvrent la voie à des applications pratiques dans le secteur de la construction et dans les régions à climat similaire.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] « Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. (2011) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 455-459. - References - Scientific Research Publishing ». Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=4159964>
- [2] « Vitrages isolants thermiques », Energie Plus Le Site. Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/techniques/froid-alimentaire7/vitrages-isolants-thermiques/>
- [3] « Cengel, Y.A. and Ghajar, A.J. (2015) Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications. 5th Edition, Grawhil Education, Stillwater. - References - Scientific Research Publishing ». Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1875128>
- [4] « Wiki du BTS Electrotechnique - SA - Conduction ou diffusion thermique ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <http://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.ThermConduction>
- [5] « Fourier, J.B.J. (1822) Theorie Analytique de la chaleur. Didot, Paris, 499-508. - References - Scientific Research Publishing ». Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2259057>
- [6] « ISO 10456:2007/Cor 1:2009 », ISO. Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/55597.html>
- [7] « Energy and Buildings ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/se20/web/building/e&b/ti/content/cont1et.html>
- [8] « Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P. and DeWitt D.P. (2011) Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th Edition, John Wiley & Sons Ltd., New York. - References - Scientific Research Publishing ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1747628>
- [9] « ISO 6946:2017(fr), Composants et parois de bâtiments — Résistance thermique et coefficient de transmission thermique — Méthodes de calcul ». Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:6946:ed-3:v2:fr:tab:1>
- [10] « ISO 13786:2017 », ISO. Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/65711.html>
- [11] « H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids," Oxford University Press, Oxford, 1959. - References - Scientific Research Publishing ». Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=150161>
- [12] « Puissance d'échange thermique par convection | Le monde en images ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=125602&demande=desc>
- [13] « Loi de refroidissement de Newton », *Wikipédia*. 11 mars 2026. Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Loi_de_refroidissement_de_Newton&oldid=233988276
- [14] « Recknagel Génie Climatique - 5e Éd | PDF | Réfrigération | Dioxyde de carbone ». Consulté le: 18 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.scribd.com/document/564810933/Recknagel-Genie-Climatique-5e-Ed>
- [15] « Definition and validation of a thermal zone model in Modelica language with Holzkirchen Twin Houses experiment ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/362116756_Definition_and_validation_of_a_thermal_zone_model_in_Modelica_language_with_Holzkirchen_Twin_Houses_experiment
- [16] « transfert de chaleur par rayonnement - Recherche Google ». Consulté le: 28 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?q=transfert+de+chaleur+par+rayonnement&sca_esv=6e02f9eb381b40e6&udm=2&biw=1350&bih=633&sxsrf=ANbL-n5-6FkJHLR-0k_ITVM8P4n1A69JKg%3A1777374843995&ei=e5bwadSyPI7g7_UPtO-0mAw&ved=0ahUKEwiU3NWhtZCUAxUO8LsIHbQ3DcMQ4dUDCBI&uact=5&oq=transfert+de+chaleu

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- r+par+rayonnement&gs_lp=Egtnd3Mtd2l6LWltZylkdHJhbnNmZXJ0IGRIIGNoYWxldXlgcGFyIHJheW9u
bmVtZW50MgYQABgHGB4yChAAGIAEGIoFGEMyBhAAGAcYHjIGEAAyBxgeMgYQABgHGB4yBhAAGAc
YHjIGEAAyBxgeMgYQABgHGB4yBhAAGAcYHjIFEAAyGARImQRQAFgAcAF4AJABAJgBAKABAKoBALgBA
8gBAJgCAaACGZgDAIgGAZIHATGgBwCyBwC4BwDCBwMzLTHIBxKACAE&scient=gws-wiz-
img#sv=CAMSVhoyKhBILXF6bFhBVkpBWkdUTEhNMg5xemxYQVZKQVpHVExITToOdUZ1MjJNWUgzQ
WdWak0gBCocGgZtb3NhaWMSEGUtcXpsWEFWSkFaR1RMSE0YADABGAcgk8q8-gVKCBABGAEGASgB
- [17] « Stefan-Boltzmann-Gesetz – Wikipedia ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>
- [18] « ISO 7730:2005 », ISO. Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.iso.org/fr/standard/39155.html>
- [19] « ISO 13790:2008 », ISO. Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur:
<https://www.iso.org/fr/standard/41974.html>
- [20] « 2021 ASHRAE Handbook Fundamentals (I P).pdf ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible
sur: <https://fr.slideshare.net/slideshow/2021-ashrae-handbook-fundamentals-i-ppdf/259702490>
- [21] « Fig. 20 : Cycle saisonnier de la température journalière maximale au... », ResearchGate. Consulté
le: 29 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/figure/Cycle-saisonnier-de-la-temperature-journaliere-maximale-au-sol-moyennee-sur-lensemble_fig12_330857304
- [22] « Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use ». Consulté le: 19
mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v82y2018ip3p2300-2318.html>
- [23] S. A. Al-Sanea et M. F. Zedan, « Improving thermal performance of building walls by optimizing
insulation layer distribution and thickness for same thermal mass », *Appl. Energy*, vol. 88, n° 9, p.
3113-3124, sept. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.02.036.
- [24] « inertie thermique : Diagnostiquer l'inertie thermique d'un bâtiment - ETI Construction ». Consulté
le: 11 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://publications.eti-construction.fr/fiches/performance-energetique-des-batiments-a-renover-dt23/diagnostiquer-l-inertie-thermique-d-un-batiment-0305/>
- [25] M. Ferencz, B. Nagy, B. Németh, J. Gyenis, et T. Feczko, « Quantifying Thermal Time Lag Due to PCM
Plaster in Model Houses », *Buildings*, vol. 15, n° 22, p. 4120, nov. 2025, doi:
10.3390/buildings15224120.
- [26] D. Božiček, R. Kunič, A. Krainer, U. Stritih, et M. Dovjak, « Mutual Influence of External Wall Thermal
Transmittance, Thermal Inertia, and Room Orientation on Office Thermal Comfort and Energy
Demand », *Energies*, vol. 16, n° 8, p. 3524, avr. 2023, doi: 10.3390/en16083524.
- [27] « A Comparative Study of the Thermal Performance of Building Materials ». Consulté le: 19 mai
2026. [En ligne]. Disponible sur:
https://www.researchgate.net/publication/267817110_A_Comparative_Study_of_the_Thermal_Performance_of_Building_Materials
- [28] I. Asadi, P. Shafigh, Z. F. B. Abu Hassan, et N. B. Mahyuddin, « Thermal conductivity of concrete – A
review », *J. Build. Eng.*, vol. 20, p. 81-93, nov. 2018, doi: 10.1016/j.job.2018.07.002.
- [29] « Energy Simulation-Based Assessment of Traditional and Modern Wall Materials for Thermal
Performance: A Case Study of a Traditional House in Jordan ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne].
Disponible sur: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/20/5336>
- [30] « Ashrae 55-2020 | PDF ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur:
<https://fr.scribd.com/document/695087734/ASHRAE-55-2020>
- [31] T. Rakotoarivelo, « Étude multidisciplinaire des confort thermo-photométriques dans le bâti
tropical : expérimentation et analyse paramétrique », phdthesis, Université de la Réunion, 2025.
Consulté le: 30 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-05122343>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [32] « Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ». Consulté le: 14 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [33] « EN 16798-1:2019 - Indoor Environmental Parameters for Building Energy ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/b4f68755-2204-4796-854a-56643dfcf89/en-16798-1-2019?srltid=AfmBOooz7qwwXD5HHdUjAcrOOMdJp9vATggkSdndyam5_wXSmG-GvPDL
- [34] « EN 16798–1 (indoor environm. input parameters) - EPB Center ». Consulté le: 14 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://epb.center/document/en-16798-1/>
- [35] A. Kaihou, E. Pitzalis, L. Sriti, S. Di Turi, et K. Amraoui, « Enhancing thermal comfort assessment: A sensitivity study of PMV-PPD and adaptive models in an Algerian reference hotel across different climate zones », *Indoor Built Environ.*, vol. 33, n° 9, p. 1680-1704, nov. 2024, doi: 10.1177/1420326X241266762.
- [36] « Integrating greenery systems and active insulation into adaptive building envelopes for enhanced sustainability and thermal resilience ». Consulté le: 19 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/399388587_Integrating_greenery_systems_and_active_insulation_into_adaptive_building_envelopes_for_enhanced_sustainability_and_thermal_resilience
- [37] B. Zalba, J. Marin, L. F. Cabeza, et H. Mehling, « Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, p. 251-283, févr. 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
- [38] « Matériaux micro-encapsulés qui respecte l’environnement de changement de phase de PCM pour le cycle de l’eau », Andores New Energy CO., Ltd. Consulté le: 21 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://french.andores.com/sale-9516683-eco-friendly-pcm-microencapsulated-phase-change-materials-for-water-cycle.html>
- [39] « Les changements d’état », Alloprof. Consulté le: 21 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-changements-de-phase-et-le-diagramme-de-change-s1578>
- [40] L. Klimeš *et al.*, « Computer modelling and experimental investigation of phase change hysteresis of PCMs: The state-of-the-art review », *Appl. Energy*, vol. 263, p. 114572, avr. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114572.
- [41] J. Martínez-Gómez, « Comparative Framework for Climate-Responsive Selection of Phase Change Materials in Energy-Efficient Buildings », *Energies*, vol. 18, n° 22, p. 5982, janv. 2025, doi: 10.3390/en18225982.
- [42] « Review on the methodology used in thermal stability characterization of phase change materials ». Consulté le: 21 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v50y2015icp665-685.html>
- [43] Y. Li, C. Li, et Y. L. He, « Advanced phase change gel featuring tunable low-temperature transition for cold energy storage », *J. Energy Storage*, vol. 130, n° 117467, sept. 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.117467.
- [44] H. J. K. N. T. T. G. K. R. et G. S., « Review of low-cost organic and inorganic phase change materials with phase change temperature between 0°C and 65°C. », 2021 Purdue Conferences. 6th International High Performance Buildings Conference at Purdue. Consulté le: 21 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://iifiir.org/fr/fridoc/analyse-des-materiaux-a-changement-de-phase-organiques-et-inorganiques-144021>
- [45] « The Journal of Chemical Thermodynamics | ScienceDirect.com by Elsevier ». Consulté le: 21 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/journal/the-journal-of-chemical-thermodynamics>

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [46] « Inorganic salt hydrate for thermal energy storage application: A review - Purohit - 2021 - Energy Storage - Wiley Online Library ». Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/est2.212>
- [47] A. Anand *et al.*, « A comprehensive review on eutectic phase change materials: Development, thermophysical properties, thermal stability, reliability, and applications », *Alex. Eng. J.*, vol. 112, p. 254-280, janv. 2025, doi: 10.1016/j.aej.2024.10.054.
- [48] E. M. Cervantes Ramírez, D. Trejo Arroyo, J. C. C. Argüello, B. B. Pamplona Solís, et J. R. Nahuat Sansores, « Advances in the Stabilization of Eutectic Salts as Phase Change Materials (PCMs) for Enhanced Thermal Performance: A Critical Review », *J. Compos. Sci.*, vol. 9, n° 12, p. 667, déc. 2025, doi: 10.3390/jcs9120667.
- [49] « Thermal Energy Storage with Phase Change Materials | springerprofessional.de ». Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.springerprofessional.de/thermal-energy-storage-with-phase-change-materials/16024194>
- [50] M. M. Kenisarin, « Thermophysical properties of some organic phase change materials for latent heat storage. A review », *Sol. Energy*, vol. 107, p. 553-575, sept. 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.05.001.
- [51] « PCM Metro II – Dynamic behavior and Aging of PCM Components - Fraunhofer ISE », Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/pcm-metro-ii.html>
- [52] « Review of Micro/Nanoencapsulated Phase-Change Materials for Thermal Energy Storage in Moderate Thermal Environments | ACS Applied Nano Materials ». Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acsanm.5c03888>
- [53] A. Ismail, J. Wang, B. Abiodun Salami, L. O. Oyedele, et G. K. Otukogbe, « Microencapsulated phase change materials for enhanced thermal energy storage performance in construction materials: A critical review », *Constr. Build. Mater.*, vol. 401, p. 132877, oct. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132877.
- [54] « Multifunctional Energy Efficient Façade System for Building Retrofitting | MEEFS RETROFITTING | Project | Nachrichten und Multimedia | FP7 », CORDIS | European Commission. Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://cordis.europa.eu/project/id/285411/news>
- [55] I. U. Rahman *et al.*, « Assessment of Phase Change Materials Incorporation into Construction Commodities for Sustainable and Energy-Efficient Building Applications », *Structurae*. Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://structurae.net/de/fachliteratur/fachartikel/assessment-of-phase-change-materials-incorporation-into-construction-commodities-for-sustainable-and-energy-efficient-building-applications>
- [56] « Assessing the Potential of Phase-Change Materials in Energy Retrofitting of Existing Buildings in a Mediterranean Climate ». Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/19/4839>
- [57] « PCM Safety and Fire Performance: Standards, Testing and Selection Criteria ». Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://eureka.patsnap.com/report-research-on-pcm-safety-and-fire-performance-standards-testing-and-selection-criteria>
- [58] « Comprehensive Review of Phase Change Materials for Building Applications: Passive, Active, and Hybrid Systems (2022–2025). | EBSCOhost ». Consulté le: 25 mai 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A3%3A39510579/detailv2?sid=ebsco%3Aocu%3Arecord&id=ebsco%3Adoi%3A10.3390%2Fen19051151&bquery=DE%20%22ENERGY%20conservation%22&page=1&link_origin=none&searchDescription=ENERGY%20conservation&crl=f
- [59] E. M. Alawadhi, « Thermal analysis of a building brick containing phase change material », *Energy Build.*, vol. 40, janv. 2008, Consulté le: 30 avril 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://explore.openaire.eu/search/publication?pid=10.1016%2Fj.enbuild.2007.03.001>