

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou**  
**FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



**Mémoire de fin d'études pour l'obtention du**  
**Diplôme de Master en Génie-Mécanique**  
**Option : Énergétique**

**Thème**

---

**Elaboration et caractérisation d'un nouveau composite MCP à forte**  
**chaleur latente pour le stockage d'énergie thermique dans le**  
**bâtiment**

---

**Réalisé par :**

CHEBALLAH Abbas

BECHA Hocine

ATIK Saddek

**Proposé et dirigé par :**

Mme KHEDACHE Souad

Mr. MAKHLOUF Said

Année universitaire 2021/2022

## Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le grand DIEU de nous avoir accordé la force et la volonté pour accomplir ce travail.

D'autre part nous tenons à remercier très vivement nos encadreurs Mr MAKHLOUF Said et Mme.KHEDACHE Souad pour leur précieuse aide, leur disponibilité et leurs précieux conseils pour l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi aux responsables des laboratoires de la faculté de génie de construction et les responsables du laboratoire chimie de l'université Mouloud MAMMERI pour leur aide dans la réalisation de notre travail.

Nous remercions également le président et les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail.

# **Dédicace :**

**Je dédie ce modeste travail à :**

**Mes chers parents qui n'ont jamais cessé de me soutenir et  
de m'encourager, et  
avec toute ma reconnaissance et ma gratitude pour leur  
sacrifices durant tout mon parcours universitaire.**

**Mes frères et sœurs et toute ma famille.**

**Tous mes amis et toutes les personnes qui m'ont aidé de  
près ou de loin.**

**Tous les étudiants de ma promotion.**

**Abbas**

# Dédicace :

Je dédie ce Modest travail à tous ceux que j'aime.

Mes premières pensées vont tout particulièrement à mon père là où il est, ma mère à qui je dois ce succès et pour qui a le sens du sacrifice, au cours de ces longues années d'étude, ne s'est jamais tari et a été le plus précieux de ses cadeaux. Grâce à son soutien et à leurs encouragements subtilement dosés, ils m'ont permis de vivre mes années de scolarité avec sérénité et efficacité.

A mes frères et soeurs que j'aime beaucoup.

A tous mes amis qui m'ont soutenu lorsque j'avais besoin d'eux et à qui je souhaite toute la réussite.

**Hocine**

# Dédicace :

On voudrait dédier ce mémoire tout spécialement à nos chers parents pour leurs sacrifices et leur soutien tout au long de notre vie.

On dédie également ce projet à toute la famille, frères et soeurs, nièces et neveux, à tous ceux qui nous sont chers.

A nos chers amis et camarades de génie mécanique.

A toute personne ayant participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail

**Saddek**

# Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Stockage d'énergie et matériaux à changement de phase</b>	
I. 1 Introduction au stockage d'énergie thermique .....	3
I.2 Les différentes formes de stockage de l'énergie thermique .....	3
I.2.1 Le stockage thermique sensible.....	4
I.2.2 Le stockage thermique latent.....	6
I.2.3 Le stockage thermochimique.....	7
I.3 Matériaux à changement de phase (MCP) .....	8
I.3.1 Définition .....	8
I.3.2 Classification des matériaux à changement de phase.....	9
I.3.3 Les MCP organiques .....	9
I.3.3.1 Les paraffine .....	10
I.3.3.2 Les non-paraffines .....	11
I.3.3.2.1 Les acides gras.....	11
I.3.3.2.2 Les esters d'acides gras .....	12
I.3.4 Les MCPs inorganiques.....	13
I.3.4.1 Les hydrate de sels.....	13
I.3.4.2 Les métaux.....	15
I.3.5 Les eutectiques .....	15
I.4 Quelques problèmes ayant l'impact sur l'efficacité de stockage .....	16
I.4.1 Surfusion .....	16
I.4.2 La ségrégation .....	17
I.4.3 La dilatation.....	17
I.5 Les critères de choix d'un bon MCP .....	17
I.6 le conditionnement de MCP :.....	18
I.6.1 La macro encapsulation :.....	18

I.6.2 Micro encapsulation :	19
I.6.3 L'incorporation directe	20
I.6.4 L'immersion :	20
I.6.5 L'imprégnation sous vide :	21
Conclusion :	21

## **Chapitre II : Intégration des MCP dans le bâtiment**

II.1 Introduction	22
II.2 Les techniques d'intégration de MCP dans le bâtiment	22
II.2.1 Intégration aux matériaux de construction	22
II.2.2 Plaques murales à MCP :	23
II.3 Exemple d'application de MCP dans le bâtiment.	23
II.3.1 Intégration sur le mur.	23
II.3.1.1 Utilisation de plaque plâtre-MCP	23
II.3.1.2 Mur en béton imprégné de MCP.	24
II.3.1.3 Le mur trombe en MCP	25
II.3.2 Les MCP intégrés à la toiture	25
II.3.3 Intégration aux plancher	27
II.3.4 Stockage thermique dans les fenêtres.	27
II.4 Le mur trombe	28
II.4.1 Introduction	28
II.4.2 La construction et le fonctionnement de mur trombe.	29
II.4.3 Mur trombe avec MCP	30
Conclusion	31

## **Chapitre III : Matériels et méthodes**

III.1 Les matériaux utilisés pour l'élaboration des composites MCPs	32
III.1.1 Le MCP (la graisse végétale)	32

III.1.2 les matrices utilisés.....	32
III.1.2.1 La perlite expansée .....	32
III.1.2.2 Brique rouge .....	34
III.1.2.3 Plâtre.....	35
III.1.3 Graphite.....	36
III.2 Préparation des composites MCPs (MCP/Perlite expansée, MCP/Brique rouge et MCP/Plâtre).....	36
III.2.1 Test de fuite.....	39
III.3 Incorporation du graphite expansé dans les composites MCPs : .....	40
III.4 Méthodes expérimentales.....	40
III.4.1 spectroscopie Infra - Rouge (FT-IR).....	41
III.4.2 Préparation des plaques pour la mesure de la conductivité thermique : .....	42
III.4.3 Mesure de la conductivité thermique : .....	44
III.4.4 Le conditionnement de MCP.....	47
III.4.5 Insertion des plaques composites MCPs dans la plaque BA13.....	48
III.4.6 Tests de performance thermique.....	48
Conclusion : .....	53

## **Chapitre IV : Résultats et discussion**

IV.1 Détermination de taux d'absorption du matériau à changement de phase pour chaque matrice.....	54
IV .2 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.....	57
IV.2.1 Le MCP utilisé .....	57
IV.2.2 La matrice utilisée.....	59
IV.2.2.1 Perlite Expansée .....	59
IV.2.2.2 Graphite expansé .....	60
IV.2.2.3 Brique rouge .....	61
IV.2.2.4 Plâtre.....	62

IV.2.3 Composites MCPs élaborés .....	63
IV.2.3 .1 Composite MCP/ Perlite expansée /Graphite .....	63
IV.2.3 .2 Composite MCP/ Brique rouge /Graphite .....	63
IV.2.3.3 Composite MCP/ Plâtre /Graphite.....	64
IV. 3 Analyse de la conductivité thermique.....	65
IV.4Test de performance thermique du mur stockeur .....	66
IV.4.1 Profil de température du mur témoin (sans MCP).....	67
IV.4.2 Profil de température du mur avec le composite MCP:.....	68
IV.4.3 Comparaison entre la plaque BA13 avec et sans MCP .....	71
IV.4.3.1 La plaque BA13 sans MCP (premier cas) : .....	72
IV.4.3. 2 La plaque BA13 avec MCP (deuxième cas) : .....	72
Conclusion :.....	73
Conclusion générale .....	74
Références bibliographiques	
Résumé	

**Nomenclature :**

symboles	signification	unité
Q	Quantité de chaleur	J
C <sub>p</sub>	Capacité thermique massique	J /kg. K
m	Masse	Kg
T	Température	°C
$h_f$	Enthalpie spécifique finale	J/kg
$h_i$	Enthalpie spécifique initiale	J/kg
$h_f$	Enthalpie spécifique de fusion	J/kg
A	Réactif solide ou liquide	
B	Produits de la réaction	
C	Produits de la réaction	
T <sub>fusion</sub>	Température de fusion	°C
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m. K
$I_s$	Epaisseur du spécimen	m
$\Delta T$	Différence de température	°C
T	Température moyenne	°C
HFM	Sortie du débitmètre	mV
$T_1$	Température de la plaque chaude	°C
$T_2$	Température de la plaque froide	°C
V	Volume	$m^3$

## Liste des figures

Figure I. 1 : Les différentes formes de stockage thermique de chaleur.....	3
Figure I. 2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.....	6
Figure I. 3 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement phase...	8
Figure I. 4 : Classification des matériaux à changement de phase.....	9
Figure I. 5 : Phénomène de surfusion.....	16
Figure I. 6 : Exemple de la technique macro-encapsulation .....	19
Figure I. 7 : Profil de la paraffine micro-encapsulés à différents pendant le cyclage thermiques .....	20
Figure I. 8 : l'imprégnation sous vide .....	21
Figure II. 1 : Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP.....	24
Figure II. 2 : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP .....	25
Figure II. 3 : Système plafond avec MCP .....	26
Figure II. 4 : Application de MCP dans le plafond. ....	26
Figure II. 5 : Illustration de l'utilisation de l'inertie thermique de plancher avec MCP Pendant la journée (a) et pendant la nuit (b) .....	27
Figure II. 6 : Fenêtre glass X fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires estivale (c) évolution des rayons solaires hivernale .....	28
Figure II. 7 : Mur trombe .....	29
Figure II. 8 : Schéma principale d'un mur-trombe -Michel.....	30
Figure II. 9 : Mur trombe incorporant des MCP .....	31
Figure III. 1: La graisse végétale utilisée. ....	32
Figure III. 2: La perlite expansée .....	33
Figure III. 3: L'étuve utilisée pour le séchage de la perlite.....	33
Figure III. 4 : Broyage de la perlite expansée dans le moulin.....	34
Figure III. 5: Perlite expansée obtenue.....	34

Figure III. 6 : Brique rouge .....	34
Figure III. 7: Broyage de la brique .....	35
Figure III. 8 : Tamisage de la poudre .....	35
Figure III. 9 : Brique rouge sous forme de poudre.....	35
Figure III. 10: Graphite expansé .....	36
Figure III. 11 : La pesée des différents éléments dans une balance .....	37
Figure III. 12 : Fusion du MCP et Mélange homogène des différents constituants du composite .....	38
Figure III. 13 : Moule métallique conçu pour l'élaboration du composite .....	38
Figure III. 14: Composites MCPs (MCP/perlite, MCP/brique, MCP/plâtre) après démoulage. ....	38
Figure III. 15: Composites MCPs obtenus à des différentes proportions massiques.....	39
Figure III. 16: Etuve utilisée pour le chauffage des composites MCPs .....	40
Figure III. 17: Composite MCP avec graphite expansé .....	40
Figure III. 18: La spectroscopie Infra-Rouge utilisée .....	41
Figure III. 19: Fusion de MCP .....	43
Figure III. 20: Mélange obtenu .....	43
Figure III. 21: Le moule en bois utilisé.....	43
Figure III. 22: Composite MCP obtenu après démoulage .....	43
Figure III. 23: Mesure de la conductivité thermique avec CT mètre .....	45
Figure III. 24 : Encapsulation des plaques composites MCPs. ....	47
Figure III. 25: Intégration des plaques de composite MCPs entre de deux plaques BA13.....	48
Figure III. 26 : Cabine réalisée pour faire le test thermique .....	49
Figure III. 27 : Montage expérimental de la plaque BA13 contenue le composite MCP dans le mur trombe. ....	50
Figure III. 28: les parois de prototype .....	50
Figure III. 29: la toiture .....	50
Figure III. 30: revêtement des parois intérieures avec des feuilles en aluminium.....	51
Figure III. 31: les thermocouples de type k.....	51
Figure III. 32 : l'enregistreur de données.....	51
Figure III. 33: Emplacement des thermocouples sur le prototype .....	52
Figure III. 34 : La lecture de l'évolution de température .....	53

Figure IV. 1 : Test de fuite pour les composites MCPs élaborés.....	55
Figure IV. 2 : Composite MCP avec graphite expansé après le test de fuite .....	57
Figure IV. 3 : Spectre FT-IR du MCP (graisse végétale).....	58
Figure IV. 4 : Spectre FT-IR de la perlite expansée.....	59
Figure IV. 5 : Spectre infrarouge du graphite .....	60
Figure IV. 6 : Spectre infrarouge de la brique.....	61
Figure IV. 7 : Spectre infrarouge du plâtre .....	62
Figure IV. 8 : Spectre FT-IR du composite MCP/Perlite/Graphite.....	63
Figure IV. 9 : spectre infrarouge du composite (MCP, brique, graphite) .....	63
Figure IV. 10. spectre infrarouge du composite (MCP, brique, graphite) .....	64
Figure IV. 11. Plaques composites MCPs élaborées pour le test de conductivité thermique ...	65
Figure IV. 12 Profil de température du mur avec la plaque BA13 sans le composite MCP allant l'intérieur vers l'extérieur.....	68
Figure IV. 13. Profil de température du mur avec la plaque BA13 remplie du composite MCP allant l'intérieur vers l'extérieur.....	70
Figure IV. 14. Profil des températures de la face interne du mur en terre, ambiance interne et air extérieur.....	71
Figure IV. 15. Variation des températures de la vitre, intérieure de La BA13 et ambiance interne sans le composite MCP .....	72
Figure IV. 16: Variation des températures de la vitre, intérieure de La BA13 et ambiance interne avec le composite MCP .....	72

## Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C .....	5
Tableau I. 2 : Température et chaleur latente de fusion pour quelques paraffines pures, solides sous formes des cires.....	10
Tableau I. 3 : Propriétés thermo physique des acides gras.....	12
Tableau I. 4 : Température de fusion et chaleur latente d'une sélection des sels hydratés.....	14
Tableau I. 5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métaux .....	15
Tableau I. 6 : Eutectiques organiques et inorganiques.....	16
Tableau III. 1 : Répartition des thermocouples sur la cabine. ....	52
Tableau IV. 1: Fractions massiques testées pour le composite MCP/Brique .....	54
Tableau IV. 2: Fractions massiques testées pour le composite MCP/Plâtre .....	54
Tableau IV. 3 : Fractions massiques testées pour le composite MCP/Perlite expansée .....	54
Tableau IV. 4. Fraction massique optimale du MCP pour chaque matrice .....	56
Tableau IV. 5. Conductivité thermique des composites MCP avec graphite expansé.....	66
Tableau IV. 6. Evolution des températures (cas de mur sans MCP).....	67
Tableau IV. 7: Evolution des températures (cas de mur avec MCP).....	69

# **Introduction générale**

Le secteur du bâtiment est classé parmi les plus grands consommateurs d'énergie. Il représente 40% de la consommation mondiale d'énergie, ce qui entraîne une utilisation excessive des énergies fossiles et une forte émission de gaz à effet de serre. Cette importante consommation est liée directement à l'utilisation du chauffage et de la climatisation pour le confort thermique à l'intérieur des logements.

Aujourd'hui, face aux exigences liées à la performance thermique des bâtiments dont le but est de réduire la consommation de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre et d'assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, plusieurs techniques ou solutions sont mises en place pour arriver à ces objectifs.

En effet, la technique la plus répandue est le stockage de l'énergie solaire à l'aide des matériaux qui sont connus sous le nom « Matériaux à Changement de Phase » ou (MCP). Ces matériaux permettent de stocker et de libérer l'énergie provenant des apports solaires au moment de leur changement de phase, ce qui permet la réduction de la consommation de l'énergie électrique et l'amélioration du confort thermique au sein d'un bâtiment.

Les matériaux à changement de phase ont la capacité de stocker une importante quantité de chaleur latente lors de la transition solide/liquide. La liquéfaction du matériau permet de stocker de l'énergie et la solidification permet de la libérer.

Diverses applications sont possibles. Pendant les saisons froides, l'énergie solaire peut être stockée pendant la journée pour être libérée durant la nuit. Par conséquent, le besoin de chauffage est réduit. Aux saisons chaudes, les MCPs avec leur fonctionnement permettent d'éviter ou de réduire le besoin en climatisation.

Notre travail consiste, en premier lieu, à élaborer un composite (MCP + matrice + graphite) avec des proportions bien définies, et ensuite étudier le comportement thermique d'un mur Trombe en intégrant ce composite.

Le mémoire de synthèse des travaux réalisés a été réparti comme suit :

Le premier chapitre est consacré à des notions sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase.

Le second chapitre porte sur l'application et l'introduction des matériaux à changement de phase dans le bâtiment.

Le troisième chapitre est consacré aux différents matériaux et aux différentes méthodes expérimentales utilisées.

Enfin le dernier chapitre est consacré à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Le mémoire se termine par une conclusion qui reprend l'ensemble des résultats essentiels de notre étude.

# **Chapitre I**

## **Stockage d'énergie et matériaux à changement de phase**

## I. 1 Introduction au stockage d'énergie thermique

Face à la production intermittente de certaines énergies renouvelables, comme par exemple l'énergie solaire photovoltaïque ou solaire thermique, rendre l'exploitation de cette dernière plus ou moins efficace, favorise l'augmentation de la consommation énergétique.

Le stockage de cette énergie quand elle est disponible est devenu plus qu'indispensable pour répondre aux besoins de consommations.

Le stockage de l'énergie thermique est une technologie ou bien une technique qui sert à préserver une quantité d'énergie quand elle est disponible, puis la restituer quand on aura besoin.

La technique de stockage de l'énergie thermique est présentée par un changement de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermochimique.

## I.2 Les différentes formes de stockage de l'énergie thermique

L'énergie thermique peut être stockée sous plusieurs formes (Figure.I.1) :

- Stockage par chaleur sensible : on utilise des matériaux passifs (qui n'ont aucune réaction chimique).
- Stockage par chaleur latente : on utilise des matériaux à changement de phase
- Stockage par chaleur thermochimique : on utilise des réactions chimiques.

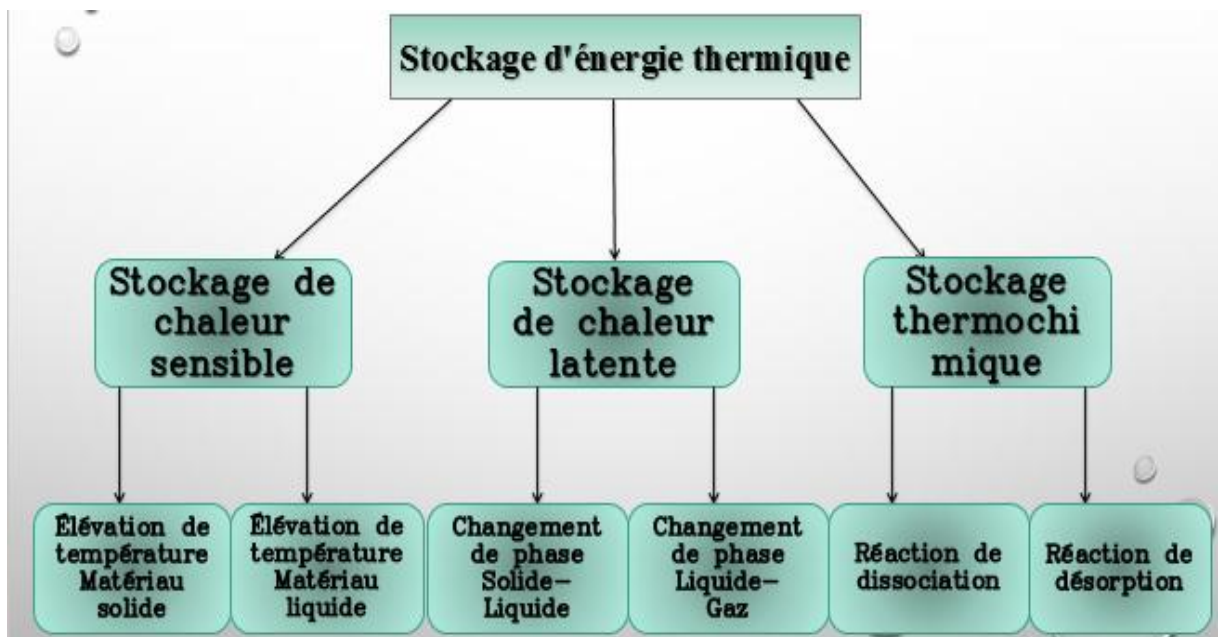


Figure I. 1 : Les différentes formes de stockage thermique de chaleur [1]

### I.2.1 Le stockage thermique sensible

Dans la méthode de stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique est stockée ou bien emmagasinée dans un matériau, ou en faisant varier la température de ce matériau sans qu'il y ait de changement de structure moléculaire (liquide ou solide).

La quantité d'énergie accumulée est calculée à partir de de l'équation suivant :

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} m \, c_p \, dT \quad (\text{I.1})$$

Ou

Q : chaleur sensible (J)

C<sub>p</sub> : capacité thermique massique du matériau (J/kg.K)

m : masse de matériau (kg)

T<sub>1</sub> : Température initiale (k)

T<sub>2</sub> : Température finale (k)

Si la capacité thermique calorifique est indépendante de la température (C=cte) alors cette relation devient :

$$Q = m \, c_p (T_2 - T_1) \quad (\text{I.2})$$

On peut distinguer alors les deux cas suivant :

- Si  $T_2 > T_1$  c'est le stockage de chaud.
- Si  $T_2 < T_1$  c'est le stockage de froid.

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle à la masse, à la capacité calorifique et à la différence de température entre l'entrée et à la sortie du matériau de stockage [2].

On peut trouver le matériau de stockage sous deux formes, il peut être sous forme liquide comme par exemple l'eau qui est largement utilisé pour des températures inférieures à 100°C, et le sel fondu ou l'huile qui sont utilisés pour des températures supérieures à 100°C. ou il peut être sous forme solide par exemple le béton, la pierre, la brique, ...etc.

Le choix de matériau de stockage est lié principalement à sa capacité calorifique ou sa chaleur spécifique. Plus la capacité calorifique est importante plus la quantité d'énergie stockée est importante.

Voici quelques propriétés des matériaux utilisés comme matériau de stockage de chaleur sensible, sont données dans le tableau suivant :

Tableau I. 1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [3]

<b>Matériaux</b>	<b>densité</b>	<b>Chaleur Spécifique (J/kg.K)</b>	<b>Capacité Thermique Volumétrique (J/m<sup>3</sup>.K)</b>
Argile	1458	897	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

Le stockage thermique par chaleur sensible est donc très facile à mettre en œuvre mais requiert des volumes et des masses importantes de matériau afin de stocker une grande quantité d'énergie [4].

### I.2.2 Le stockage thermique latent

Dans le stockage par chaleur latente l'énergie thermique est stockée ou accumulée grâce au changement d'état physique d'un matériau (solide, liquide, vapeur) dans une plage réduite de température.

On trouve plusieurs formes de stockage par chaleur latente, par exemple le stockage par chaleur latente de fusion (solide – liquide) (Figure I.2), ou par chaleur latente d'évaporation (liquide-gazeux)...etc.

Bien que la chaleur latente de fusion soit plus faible que la chaleur latente d'évaporation. La transition solide – liquide est la plus prometteuse puisqu'elle permet de limiter l'expansion volumique et ainsi l'augmentation de pression due au changement de phase. Lors d'une fusion, il faut compter une augmentation volumique d'environ 10 % [5].

La technique de stockage d'énergie thermique par chaleur latente de fusion est basée sur un principe physique simple. Lors de la solidification, les matériaux à changement de phase (MCP) dégagent une quantité importante de chaleur ; inversement, lors de la fusion, la même quantité de chaleur est absorbée.

Cette quantité d'énergie thermique stockée lors de fusion s'exprime de la façon suivante :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f \quad (\text{I.3})$$

Avec  $\Delta h_f$  est l'enthalpie spécifique de fusion

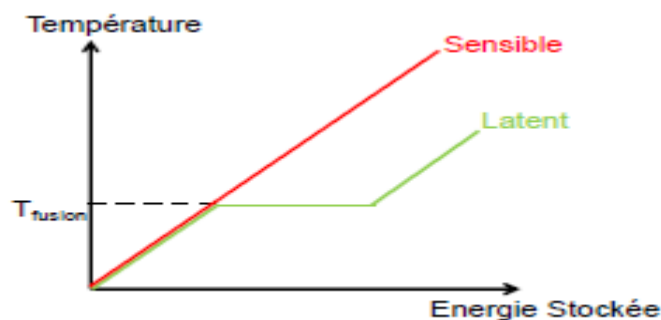


Figure I. 2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [5].

Les matériaux utilisés pour le stockage d'énergie thermique par chaleur latente sont appelés les matériaux à changement de phase (MCP). et plus le volume de ce dernier est petit, plus sa capacité de stockage d'énergie thermique est importante.

### I.2.3 Le stockage thermochimique

Le stockage thermochimique repose sur deux types de réactions : les réactions chimiques endothermiques réversibles et les réactions de sorption.

#### a) Réactions chimiques endothermiques réversibles

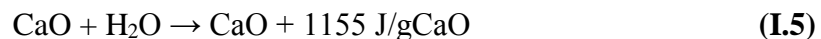
De par sa nature endothermique la réaction va permettre de stocker de la chaleur, et étant donné que cette réaction est réversible, cette chaleur sera restituée lorsque la réaction inverse (exothermique) sera réalisée.

Soient  $A$ ,  $B$  et  $C$  trois composés chimiques distincts et  $Q$  une quantité d'énergie thermique, la réaction s'écrit :



Les produits de la réaction peuvent être conservés à température ambiante et, s'ils sont isolés, ils ne subiront pas ou peu de détérioration chimique. Dans le cas du stockage « sensible » et « latent », les pertes thermiques ramènent invariablement le système dans son état initial, déchargé. Le stockage sous forme thermochimique est peu contraint par la durée de stockage, c'est pourquoi il est essentiellement destiné à du stockage longue durée (inter saisonnier).

Un exemple de matériau utilisé est la chaux. Lors du stockage, la chaux éteinte est séchée par de l'air sec chaud. La phase de déstockage se traduit par l'extinction de la chaux vive par arrosage. La réaction d'extinction s'écrit :



#### b) Réactions de sorption

La sorption comprend l'adsorption (en surface) et l'absorption (dans le volume) qui vont consommer de l'énergie. La transformation inverse, la désorption, résulte en la libération des molécules précédemment sorbées. Alors que la désorption est endothermique (stockage), la sorption est exothermique (déstockage) [6].

Parmi les trois types de stockage présentés précédemment, le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique. Les matériaux utilisant ce type de stockage sont qualifiés de « Matériaux à Changement de Phase (MCP) ».

### I.3 Matériaux à changement de phase (MCP)

#### I.3.1 Définition

Comme son nom l'indique, le matériau à changement de phase (MCP) est un matériau qui a la capacité de changer son état physique dans une certaine condition de températures selon les propriétés de chaque matériau.

Ces matériaux sont employés pour le cas de stockage d'énergie thermique par chaleur latente, lorsque ce matériau se transforme de l'état solide à l'état liquide (la fusion) a lieu à température constante (température de fusion) il absorbe de la chaleur, et dès que la température est inférieure à la température de fusion il se solidifie et il dégage la chaleur absorbé (Figure I.3).

L'utilité d'utilisation des matériaux à changement de phase est sa capacité de stocker une grande quantité d'énergie à faible épaisseur, contrairement aux matériaux de stockage par chaleur sensible, par exemple le béton qui nécessite de grand épaisseur pour stoker la même quantité d'énergie.

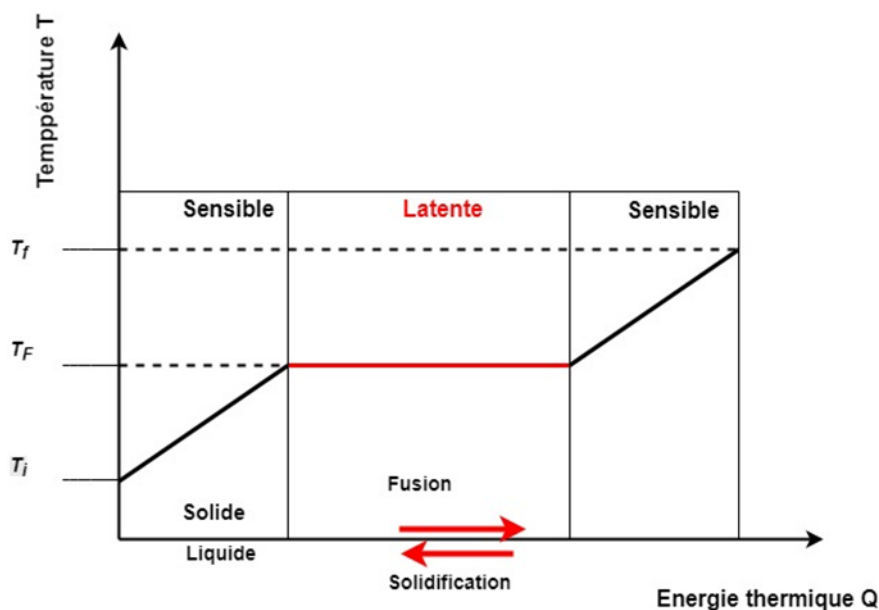


Figure I. 3 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement phase [7]

### I.3.2 Classification des matériaux à changement de phase

On peut classer les MCP en trois catégories (Figure I.4) :

- Les matériaux organiques : paraffines, corps non paraffiniques.
- Les matériaux inorganiques : métaux, sels,
- Eutectiques : ils peuvent être organiques et/ou inorganiques

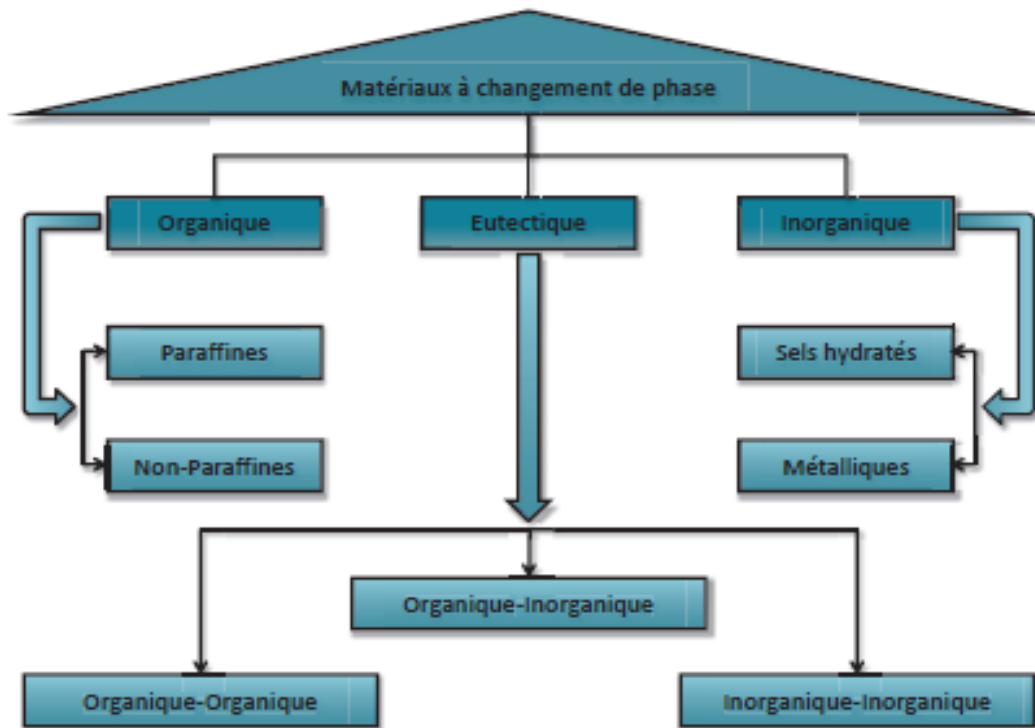


Figure I. 4 : Classification des matériaux à changement de phase [7]

### I.3.3 Les MCPs organiques

La température de fusion des MCPs organiques varie entre 0°C et 150°C, les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, d'acides gras, alcools de sucre. Ces matériaux possèdent une certaine propriété favorable pour son application : ils sont disponibles dans une vaste gamme de température et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction. Ils sont chimiquement stables, simples à mettre en œuvre et contribuent à un renforcement thermique de la structure grâce à leur forte chaleur latente qu'ils échangent au moment du changement d'état. En revanche, ces matériaux possèdent certaine propriété

indésirables tels que : ils ont une faible conductivité thermique et ils sont inflammable. Mais ces inconvénients peuvent être éliminés par des techniques et des méthodes pour utiliser ces matériaux [8].

### I.3.3.1 Les paraffines

Les paraffines sont des matériaux organiques appartenant à la famille des hydrocarbures saturés de formule brute  $C_nH_{2n+2}$ , aux propriétés très similaires. On distingue les paraffines solides sous formes de cires et les paraffines liquides, mais les paraffines intéressantes pour le stockage d'énergie thermique sont celles qui sont sous forme solide à la température ambiante.

Généralement, plus la chaîne carbonée est longue plus la température de fusion est élevée et plus la chaleur latente est grande.

La plupart des paraffines commerciales sont fabriquées à partir du pétrole brut. Il existe deux types de paraffine, soit les paraffines pures ou des mélanges de plusieurs hydrocarbures, le tableau ci-dessous représente les propriétés de certaines paraffines pures [9].

Le tableau ci-dessous représente les propriétés de paraffines pures usuelles

Tableau I. 2 : Température et chaleur latente de fusion pour quelques paraffines pures, solides sous formes des cires [9]

Nom	point de fusion (°C)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur latente (J/g)
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	18,2	774	238
C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>	22	778	215
C <sub>18</sub> H <sub>34</sub>	28,2	814 <sup>S</sup> -775 <sup>L</sup>	245
C <sub>19</sub> H <sub>34</sub>	31,9	912 <sup>S</sup> -769 <sup>L</sup>	222
C <sub>20</sub> H <sub>34</sub>	37	n.a.	247
C <sub>21</sub> H <sub>34</sub>	41	n.a.	215
C <sub>22</sub> H <sub>34</sub>	44	n.a.	249

L : liquide ; S : Solide ; n.a : pas de donnée

### Les avantages des cires paraffiniques

Les paraffines, sont stable chimiquement, et elles ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases donc permettent de grands nombres de cycles fusion/ solidification consécutifs. Elles sont disponibles dans un large intervalle de température. Leur chaleur latente de fusion/solidification est très importante par rapport aux autres matériaux. Il n'y a quasiment pas de surfusion avec les paraffines et elles ne sont pas toxiques et peuvent être recyclées à 100% [9].

### Les inconvénients

Les cires paraffiniques présente une très faible conductivité thermique (0,18-0,25 W/m.K). Cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Pour résoudre ce problème, on utilise une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté [10].

Les cires paraffiniques sont facilement inflammables, et donc elles doivent être conditionnées en conséquence pour l'usage en bâtiment [9].

#### I.3.3.2 Les non-paraffines

Les matériaux organiques non-paraffiniques sont divisés en deux groupes :

##### I.3.3.2.1 Les acides gras

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$  et ils ont les mêmes propriétés thermo-physiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ( $T_{\text{fusion}} = 57.5 \text{ °C}$ ), l'acide sébacique ( $T_{\text{fusion}} = 132 \text{ °C}$ ), l'acide palmitique ( $T_{\text{fusion}} = 61-63 \text{ °C}$ ), et l'acide myristique ( $T_{\text{fusion}} = 51.5-53.6 \text{ °C}$ ) [11].

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Comme ils sont faciles de les imprégner ou de les incorporer directement dans les structures conventionnelles, ils sont considérés comme de bons candidats dans les applications bâtiment.

Le tableau suivant représente quelques acides gras avec leurs propriétés thermo physiques :

Tableau I. 3 : Propriétés thermo physique des acides gras [12]

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acide acétique	CH <sub>3</sub> COOH	16,7	184
Acide caprique	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH	36	152
Acide laurique	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> COOH	49	178
Acide myristique	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>12</sub> COOH	58	199
Acide palmitique	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> COOH	55	163
Acide stéarique	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> COOH	69,4	199

### Les avantages d'acides gras

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines, voire légèrement en-dessous et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur. Par ailleurs, plus le nombre de carbones dans la chaîne carbonée est élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisations sont grands [13].

### Les inconvénients :

Ils sont les mêmes que pour les paraffines, avec en plus une légère corrosivité et un coût deux à trois fois supérieur [9].

### I.3.3.2.2 Les esters d'acides gras

Les esters d'acides gras sont des matériaux produits par estérification directe des acides gras séparés des huiles. Il existe plusieurs sortes d'esters d'acides gras selon leur application comme le stéarate de butyle et le stéarate de vinyle qui sont utilisés pour le stockage passif de la chaleur. Le palmitate d'isopropyle et l'isopropyle stéarate peuvent être utilisés pour le stockage d'énergie dans les pays chauds.

Les esters d'acides gras possèdent certaines propriétés thermo-physiques intéressantes pour leur application comme un MCP. Parmi ces propriétés on peut citer :

- Ils ont une chaleur latente importante et une chaleur spécifique ( $C_p$ ) entre 1.9 et 2.1 kJ/(kg.K).
- Le changement de volume lors de la fusion est négligeable
- Ils sont stables chimiquement, non corrosifs, non toxiques
- Ils ont d'excellentes caractéristiques fusion/solidification sans sous-refroidissement.

Ce dernier point leur donne un avantage important en tant que MCP [14].

### I.3.4 Les MCPs inorganiques

Dans cette famille, on distingue principalement : les hydrates de sels et les métaux

#### I.3.4.1 Les hydrate de sels

Les matériaux qui contiennent de l'eau sont appelés des hydrates, et s'ils ne contiennent pas de l'eau ils sont appelés des anhydrates.

Donc, les hydrates de sel sont des sels minéraux qui contiennent des molécules d'eau dont la formule générale est  $AB.nH_2O$ .

Le sel hydraté le plus utilisé pour son faible coût est le  $CaCl_2.6H_2O$  ( $T_{\text{fusion}} = 28-30^\circ\text{C}$ ). On peut citer aussi le  $Mn(NO_3)_2.6H_2O$  pour les applications de climatisation, et un nouveau matériau obtenu à partir de  $Al_2(SO_4)_3.18H_2O$  utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de  $100^\circ\text{C}$ . Il existe aussi la bischofite comme exemple d'un mélange d'hydrates de sels composé à 95% (massique) de  $MgCl_2.6H_2O$  et à 5% de  $KMgCl_3.6H_2O$ ,  $Li_2SO_4.H_2O$  et autres sels ioniques tels que NaCl et KCl et ayant une température de fusion autour de  $98.9^\circ\text{C}$  [15].

Le tableau suivant représente quelques hydrates de sel et leurs propriétés thermo physiques.

Tableau I. 4 : Température de fusion et chaleur latente d'une sélection des sels hydratés [9]

Nom	Point de fusion (°C)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur latente (J/g)
LiClO <sub>3</sub> .3H <sub>2</sub> O	8	n.a	253
NH <sub>4</sub> Cl.Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	11	n.a	163
K <sub>2</sub> HO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	14	n.a	108
NaCl.Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	18	n.a	286
KF.4H <sub>2</sub> O	18	n.a	330
K <sub>2</sub> HO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O	18,5	1447 <sup>20c</sup>	231
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25	1738 <sup>20c</sup>	148
LiBO <sub>2</sub> .8H <sub>2</sub> O	25,7	n.a	289
FeBr <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	27	n.a	105
CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	29-30	1802 <sup>24c</sup>	170-192

Le sel hydraté présente un intérêt pour son utilisation en tant que MCP à cause de ses caractéristiques. Parmi ses caractéristiques on peut citer :

- Une forte chaleur latente de fusion (plus élevée que les MCP organique)
- Une bonne conductivité thermique
- Moins couteux

Cependant, le sel hydraté présente certains inconvénients ou problèmes tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase ce qu'on appelle ségrégation de phase, Ce problème peut être résolu par l'ajout d'additifs ou l'encapsulation du MCP.

Un autre inconvénient principal est la surfusion (ou le sous-refroidissement), qui peut être traité en ajoutant un agent de nucléation.

### I.3.4.2 Les métaux

Les métaux possèdent certaines caractéristiques intéressantes telles que leur conductivité thermique élevée et une forte chaleur latente de fusion par unité de volume mais, malgré ces caractéristiques intéressantes, ils n'ont pas encore été sérieusement considérés en tant que MCP pour le stockage de chaleur en raison de leur poids.

Il existe différents métaux, on peut citer notamment le potassium ( $T_{\text{fusion}} = 63.2^{\circ}\text{C}$ ), le Bi58Sn42 ( $T_{\text{fusion}} = 138^{\circ}\text{C}$ ) ou encore le Lithium ( $T_{\text{fusion}} = 186^{\circ}\text{C}$ ) [16].

Le tableau ci-dessous indique les métaux les plus prometteurs et leur propriétés thermo-physiques.

Tableau I. 5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métaux. [7]

Les métaux		
Matériaux	Température de mélange ( $^{\circ}\text{C}$ )	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Gallium	30	80,3
cerrobend eutectique	70	32,6

### I.3.5 Les eutectiques

Le MCP eutectique est un mélange de deux substances ou plus. Ce matériau est généralement un mélange des MCPs organiques et inorganiques.

On peut citer :

Eutectiques de nitrates tel que  $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$  avec une composition massique de 25%-65%-10% ( $T_{\text{fusion}} = 80.5^{\circ}\text{C}$ ),

Eutectiques organiques tel que  $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$  avec une composition massique de 50%-50% ( $T_{\text{fusion}} = 65^{\circ}\text{C}$ ),

Eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange isomassique  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ( $T_{\text{fusion}} = 59.1^{\circ}\text{C}$ ) [16].

Le tableau suivant représente quelques eutectiques et leurs propriétés thermiques

Tableau I. 6 : Eutectiques organiques et inorganiques [9]

Nom	Composition (en % respectifs)	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (J/g)
$\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{NaCl}+\text{KCl}+\text{H}_2\text{O}$	31+13+16+40	4	234
$\text{C}_5\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_5+(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{O}$	26,5+73,5	12	97,9
$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2+\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{O}_2$	34+66	24	147,7
$\text{Ca}(\text{NO})_3.4\text{H}_2\text{O}+\text{Mg}(\text{NO})_3.6\text{H}_2\text{O}$	47+53	30	136

## I.4 Quelques problèmes ayant l'impact sur l'efficacité de stockage

### I.4.1 La Surfusion

La surfusion ou le sous refroidissement est un phénomène qui apparait surtout dans les matériaux inorganiques (les sels hydratés). Ce phénomène est décrit comme suite :

Lorsqu'un MCP est à l'état liquide et on le refroidit, on voit que le MCP reste encore liquide alors que sa température est inférieure à la température de solidification. (Figure I.5)

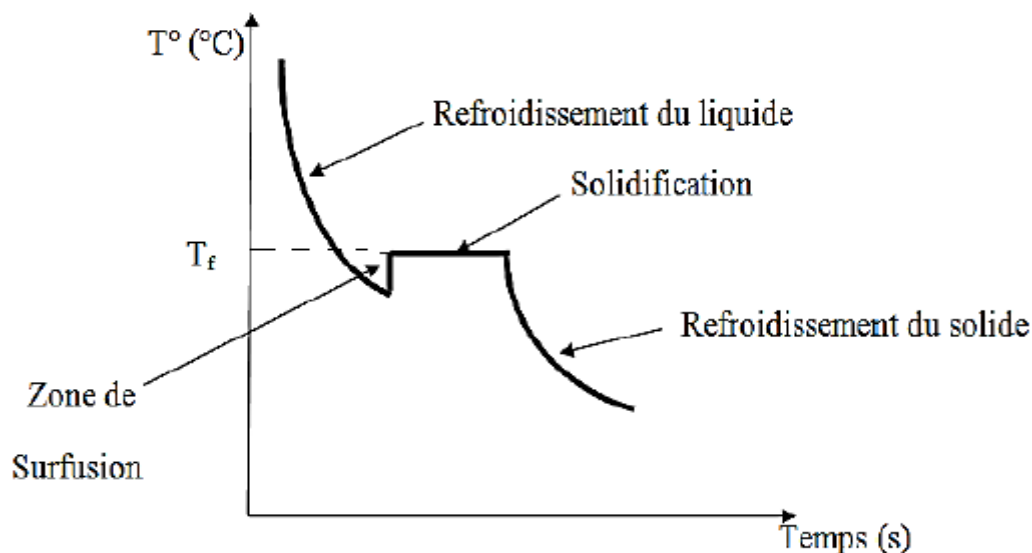


Figure I. 5 : Phénomène de surfusion

### I.4.2 La ségrégation

Il est difficile de préserver une haute densité de stockage pour des matériaux tels que les sels hydratés, Elle diminue généralement avec le nombre de cycles de fusion/solidification. Cela est

dû au fait que la plupart des sels hydratés peuvent subir une fusion congruente, ce qui induit la formation d'un sel hydraté « inférieur » [17].

### **I.4.3 La dilatation**

Ce phénomène apparaît lors de changement de phase solide/liquide de certaines MCP, ou on observe l'augmentation de leur volume ce qui pose un problème de conditionnement dans quelques applications en particulier lorsqu'on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression [18].

### **I.5 Les critères de choix d'un bon MCP**

Pour le choix d'un MCP idéal pour le stockage d'énergie thermique, il doit avoir certains critères thermiques, physiques, cinétiques, chimiques et économiques [7].

#### **– Critères thermiques :**

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage.

#### **– Critères physiques**

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité.
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

#### **– Critères cinétiques**

- La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire.
- Un taux de cristallisation important.

#### **– Critères chimiques**

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.

- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) .la dangerosité du produit doit être minimisé.
- Recyclable.
- **Critères économiques**
  - Le coût est critère également très important .celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.
  - Disponible en grande quantité.

### **I.6 le conditionnement de MCP :**

Le conditionnement du MCP est nécessaire pour éviter les fuites quand celui-ci est en phase liquide, mais également afin de le protéger de son environnement. En plus de cela, le conditionnement peut avoir d'autres caractéristiques telles que l'augmentation des caractéristiques thermique de l'ensemble, servir de barrière ignifuge ou nuancer les caractéristique radiatives [19].

Le conditionnement ou l'emballage doit respecter certaines conditions tel que :

- l'enveloppe de conditionnement doit être compatible avec le MCP.
- au changement de phase de MCP solide-liquide le conteneur ou l'enveloppe doit assurer une parfaite étanchéité afin d'éviter la fuite, et il doit surtout résister au changement de volume de MCP lors de changement de phase.
- L'enveloppe doit satisfaire aux exigences de la résistance, la durabilité, et la stabilité thermique.

On distingue plusieurs techniques de l'encapsulation de MCP :

#### **I.6.1 La macro encapsulation :**

Dans cette méthode de conditionnement, le MCP est encapsulé dans une enveloppe telle que des sacs ou des capsules de différente forme géométrique (Figure I.6).

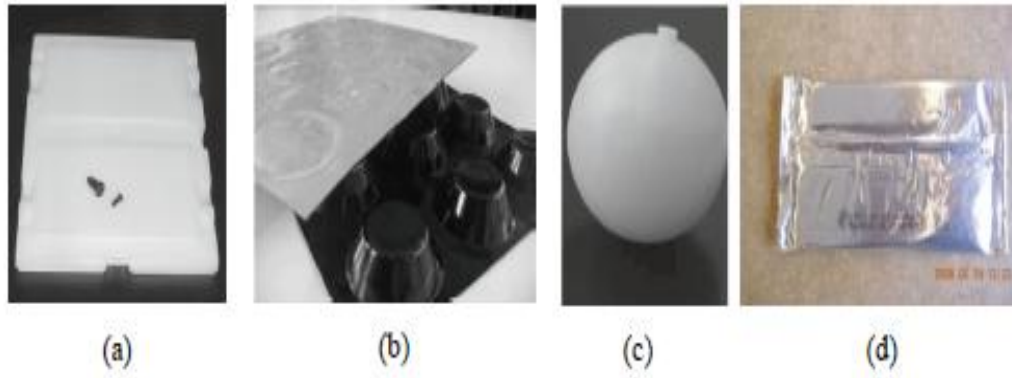


Figure I. 6 : Exemple de la technique macro-encapsulation [20]

### I.6.2 La Micro encapsulation :

Comme son nom l'indique, la micro-encapsulation consiste à piéger du MCP dans des microcapsules et utiliser un deuxième fluide pour les transporter [21]. L'enveloppe peut être fabriquée avec une grande gamme de matériaux, tels que les polymères naturels ou synthétiques [22].

Cette technique d'encapsulation est une technologie efficace qui présente de nombreux avantages tels que l'augmentation de la surface de transfert thermique, et le contrôle du changement de volume de MCP lors de changement phase, et surtout la conservation de la capacité de stockage d'un MCP même après plusieurs cycles (Figure I.7).

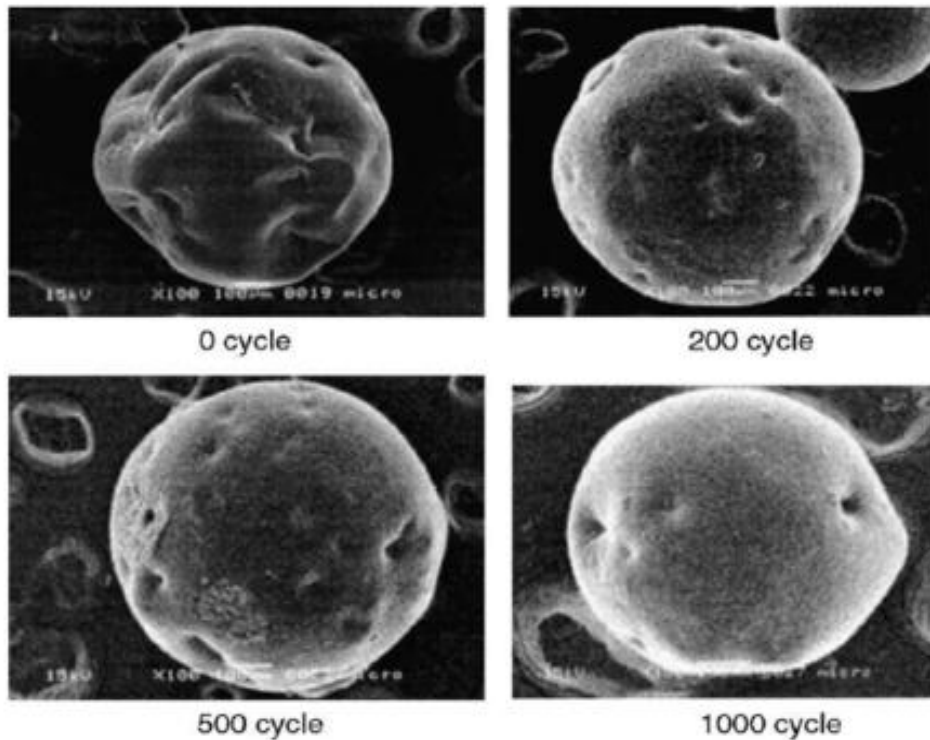


Figure I. 7 : Profil de la paraffine micro-encapsulés à différents pendant le cyclage thermique [23]

### I.6.3 L'incorporation directe

L'incorporation directe est une technique, dans laquelle le MCP sous forme liquide ou solide est ajouté directement au mélange des matériaux de construction, par exemple du béton, ou de la brique.

### I.6.4 L'immersion :

Dans la technique d'immersion, les éléments de construction en béton poreux (blocs, plaques de plâtre, d'agrégats poreux, bois... etc.) sont immergés dans un récipient rempli d'un MCP fondu. Le MCP est absorbé par capillarité. Le temps nécessaire pour une absorption efficace du MCP liquide dépend de la capacité d'absorption des matériaux de construction, la température et de la viscosité du MCP.

**I.6.5 L'imprégnation sous vide :**

Le processus d'imprégnation sous vide consiste d'abord à éliminer l'air d'agréats poreux à l'aide d'une pompe à vide. L'agréat poreux est ensuite trempé dans un MCP liquide sous vide (Figure I.8).

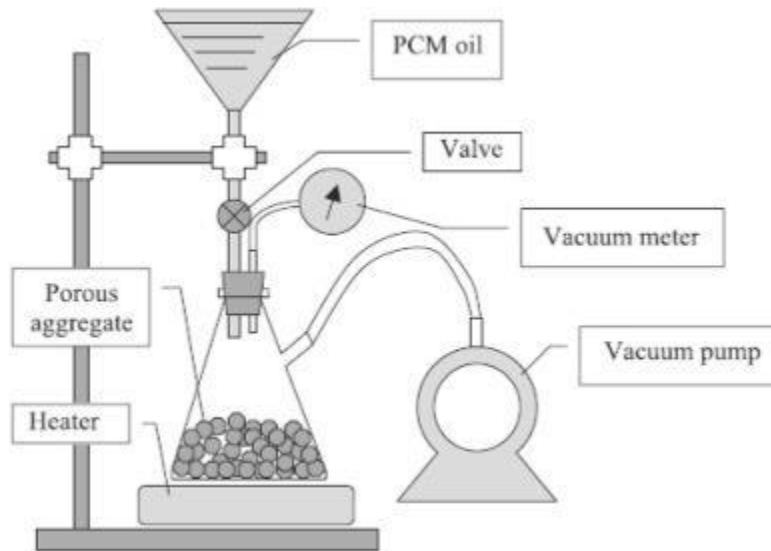


Figure I. 8 : l'imprégnation sous vide

**Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré aux principaux modes de stockage d'énergie et plus spécifiquement à celui sous forme de chaleur latente, et ainsi aux généralités sur les matériaux à changement de phase MCP et les classifications de ces matériaux et leurs propriétés.

**Chapitre II**

**Intégration des MCP dans le**

**bâtiment**

## II.1) Introduction

L'intégration des matériaux à changement de phase dans le bâtiment est une solution qui permet l'amélioration de l'efficacité énergétique et assurer le confort thermique au sein d'un bâtiment. De ce fait, de nombreuses recherches et études ont été faites sur ces matériaux pour une meilleure performance énergétique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents modes d'intégration de ces matériaux dans le bâtiment, ainsi que des exemples d'application de ces substances dans le bâtiment.

## II.2) Les techniques d'intégration de MCP dans le bâtiment

Les MCPs peuvent directement être intégrés dans les différentes parois d'un bâtiment afin que celui-ci puisse atteindre de hautes performances énergétiques. Les MCPs ont permis de faciliter leur intégration dans les murs Trombe, les toitures, les volets, les plafonds et les systèmes de chauffage par plancher. Leur intégration dans les enveloppes des bâtiments dépend essentiellement des différentes applications visées, recourant ainsi à des configurations et des caractéristiques uniques [7].

L'application des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois méthodes différentes :

- Intégration dans les murs du bâtiment.
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs.
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

### II.2.1) Intégration aux matériaux de construction

- **Intégration directe**

Dans ce cas, les MCPs peuvent être incorporés directement lors de la fabrication des matériaux de construction telle que la brique, le béton, ou le plâtre.

Cette technique présente certains inconvénients, telle que la fuite du MCP et l'incompatibilité entre le MCP et le matériau de construction.

- **Encapsulation avant d'intégration**

Dans cette technique les MCP sont encapsulés ou conditionnés soit en micro-encapsulation soit en macro encapsulation. Ensuite ces MCP encapsulés sont intégrés dans les matériaux de construction.

Cette technique permet d'éviter tout risque de fuite de MCP lors de sa fusion, et assurer le bon fonctionnement du système. De plus, le conditionnement des MCPs permet aussi de protéger leurs propriétés et éviter tout contact direct avec l'environnement.

Parmi ces méthodes d'intégration de MCP aux matériaux de construction (intégration directe, la macro encapsulation et la micro encapsulation), la méthode de la micro-encapsulation du MCP est la mieux adaptée car le MCP encapsulé dans des polymères et la dimension de la capsule étant de l'ordre du micromètre ne permet pas de la briser, assurant ainsi un taux d'écoulement du MCP quasi nul lors de la phase liquide [7].

### **II.2.2) Plaques murales à MCP :**

Le panneau mural de MCP est considéré comme un remplacement efficace et moins coûteux de la masse thermique standard pour stocker la chaleur solaire dans les bâtiments, dans lesquels le MCP est enfoncé dans un panneau de gypse, de plâtre ou autres fondations. Les caractéristiques thermiques du panneau mural de MCP sont très proches de ceux des MCPs seuls, et quand un panneau mural de MCP est coupé, une plus grande concentration de MCP se situe dans le tiers externe de l'épaisseur de panneau mural près de chaque visage dû au procédé de diffusion [25].

La différence entre les deux méthodes est que le MCP est intégré directement dans un panneau mural au lieu d'être présent dans le mur de construction principal [7].

## **II.3) Exemple d'application de MCP dans le bâtiment**

### **II.3.1) Intégration sur le mur**

Parmi les composants d'un bâtiment, celui qui a été le plus étudié est certainement le mur constituant la partie la plus importante de l'enveloppe. En particulier, de nombreuses études ont concerné la réalisation d'une enveloppe légère puisque l'utilisation de MCP pourrait permettre d'en diminuer le volume [26].

Les structures les plus connus sont : les plaques de plâtres, les blocs de béton, les murs trombes.

#### **II.3.1.1) Utilisation de plaque plâtre-MCP**

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les MCPs les plus utilisés sont les acides gras, l'acide caprique, l'acide l'aurique (palmitique et stéarique), le stéarate de butyle, le dodécanol et le polyéthylène glycol

600. Les MCP utilisés sont en général micro-encapsulés. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtre-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP (Figure II.1) [24].

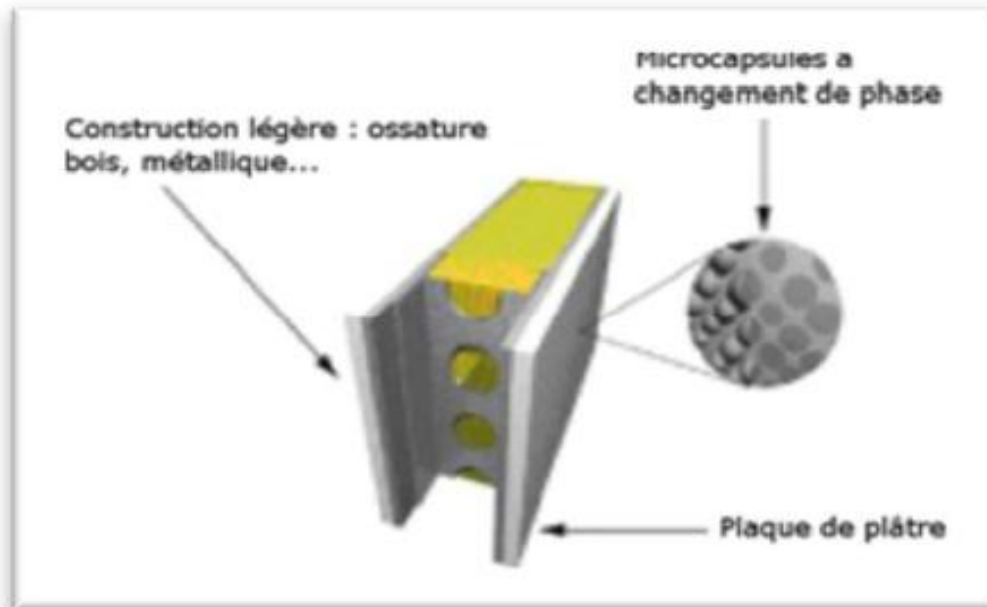


Figure II. 1 : Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP [24]

### II.3.1.2) Mur en béton imprégné de MCP

Le béton constituant l'enveloppe du bâtiment contient un MCP micro-encapsulé pour augmenter sa capacité thermique. Cette solution est délicate car le MCP peut altérer les propriétés mécaniques du béton [27].

Le centre d'étude du bâtiment (université de Concordia) à Montréal au Canada a mis au point des blocs de béton à base MCP. Ils ont utilisé différents MCPs : la paraffine (PAR), stéarate de butyle (BS), dodecanol (DD) et polyéthylène (PEG). Au cours des différents essais sur le rendement thermique de ces blocs de béton-MCP, il ressort que les blocs de béton-MCP à base de paraffine ont la capacité de stockage d'énergie (par mètre carré) plus importante que les autres MCP expérimentés [24].

### II.3.1.3) Le mur trombe en MCP

Les murs trombe à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 20 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique. (Figure II.2) [24].

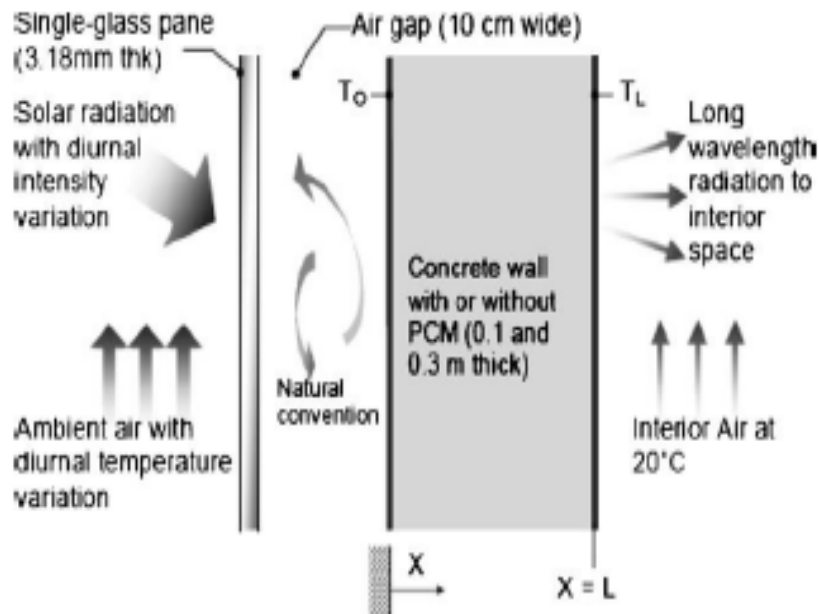


Figure II. 2 : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP [24]

### II.3.2) Les MCP intégrés à la toiture

Les sollicitations solaires sont plus importantes au niveau des toitures d'un bâtiment, car il s'agit de la surface la plus exposée au rayonnement solaire. La toiture joue un rôle de « tampon thermique » entre l'environnement intérieur et extérieur.

Les panneaux en plafond sont situés sur la partie la plus importante de la toiture et sont également utilisés pour le chauffage et la climatisation. De plus, leurs mises en œuvre dans l'enveloppe du bâtiment est très faciles (Figure II.3). Les panneaux plafonds utilisant des matériaux à changements de phase peuvent aider à chauffer ou à refroidir un bâtiment. Le rôle du panneau au cours de la journée, est de dissiper la chaleur alors qu'en cours de la soirée toute la chaleur possible emmagasinée peut être libérée, soit via la circulation d'eau froide circulant dans les tubes capillaires, ou par la ventilation d'air [7].

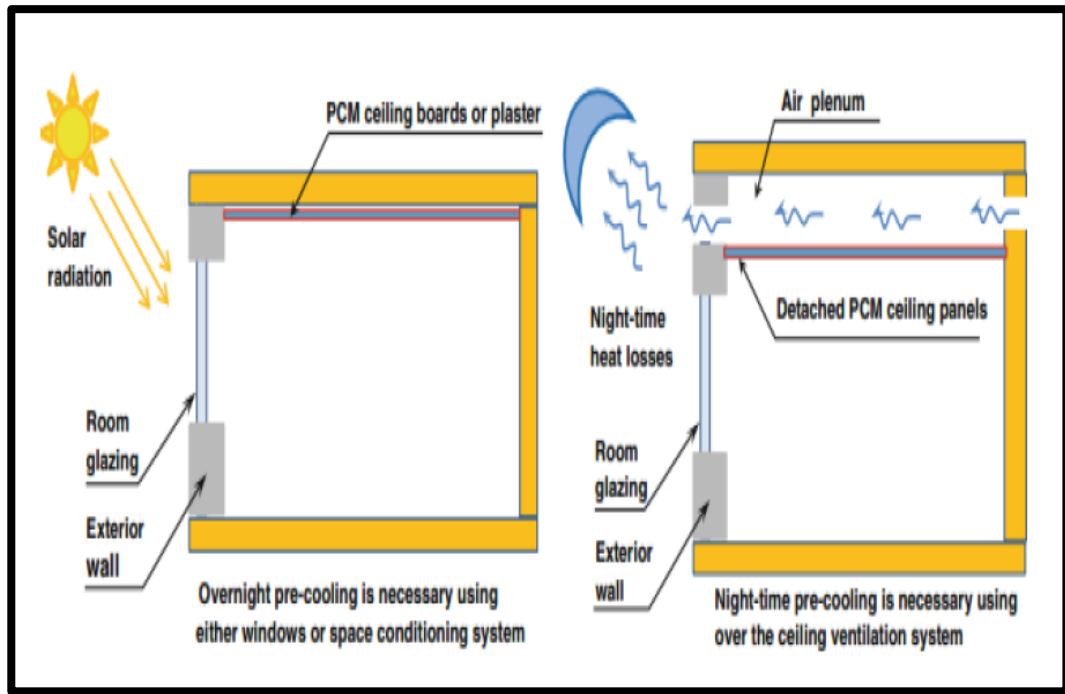


Figure II. 3 : Système plafond avec MCP

Pour certaines applications il est fortement déconseillé d'intégrer directement les MCPs au plafond. Dans ces cas, il est recommandé soit d'utiliser des tubes de stockage équipés de MCP, soit des caloducs en dessus du plafond ou avec le faux plafond [7].

Par exemple, les MCPs peuvent être macro-encapsulés puis placés au-dessus du faux-plafond. Comme indiqué sur la figure ci-dessous (Figure II.4) :



Figure II. 4 : Application de MCP dans le plafond.

### II.3.3) Intégration aux plancher

Le sol du bâtiment est également un élément essentiel pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Les planchers des bâtiments peuvent également accueillir des MCP. En comparaison avec les panneaux intérieurs, les planchers ont l'avantage de recevoir davantage d'ensoleillement direct, ce qui facilite le stockage de chaleur [19].

Ce type de paroi permet, pendant la journée, de stocker une partie de la chaleur du rayonnement solaire à travers le processus de fusion (figure II.5. a) et ainsi d'améliorer le confort thermique dans la salle sans la nécessité d'utiliser la climatisation. Pendant la nuit, le MCP se solidifie et libère la chaleur emmagasinée (figure II.5. b) [26].

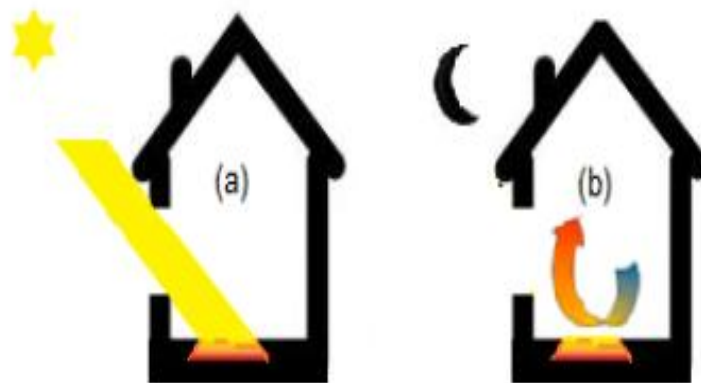


Figure II. 5 : Illustration de l'utilisation de l'inertie thermique de plancher avec MCP  
Pendant la journée (a) et pendant la nuit (b)

### II.3.4) Stockage thermique dans les fenêtres

Les fenêtres représentent une partie du bâtiment qui est considérée comme les points faibles de l'isolation thermique qui conduisent à une consommation d'énergie plus élevée. Dans les climats froids, les fenêtres sont responsables de pertes importantes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur, d'où un besoin de chauffage mécanique. et dans les climats chauds, la chaleur solaire excessif qui pénètre à travers le vitrage exige une consommation d'énergie considérable pour le refroidissement. Donc les surfaces vitrés et les dispositifs d'ombrage ont un rôle important sur la consommation d'énergie du bâtiment [28].

Des nombreuses études de recherche et travaux ont été développés pour l'amélioration de la performance thermique à travers la surface vitrée du bâtiment.

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les plus connus sont ceux du cabinet architectural Glass fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres Glass X. Ces derniers sont composés de quatre éléments au sein d'un seul ensemble fonctionnel : une isolation translucide, une protection contre les surchauffes estivales, un matériau à changement de phase intégré dans des conteneurs hermétiquement scellés en polycarbonate peints en gris pour favoriser l'efficacité de l'absorption. En général, c'est un MCP à base de sel hydraté avec une température de fusion aux alentours de 27 °C qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé de 6 mm qui peut être agrémenté d'une sérigraphie esthétique du côté intérieur (figure II.6.a) [24].

Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à 40 °C (été), il y a une réflexion totale des rayons solaires sur la fenêtre (figure II.6. b). Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à 35 °C (hiver), les rayons solaires traversent complètement la fenêtre (figure II.6.c) [24].

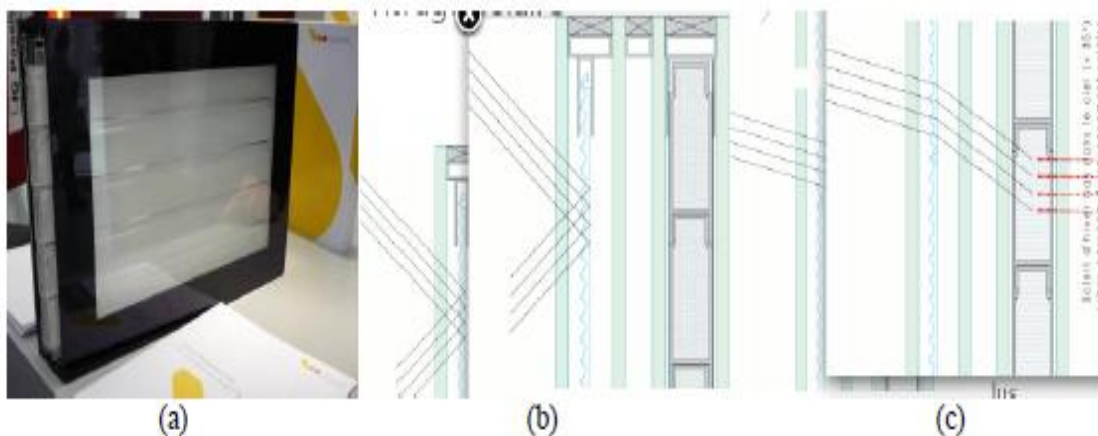


Figure II. 6 : Fenêtre glass X fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires estivale (c) évolution des rayons solaires hivernale [24].

## II.4) Le mur trombe

### II.4.1) Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine de l'habitat pour réduire sa consommation énergétique a fait l'objet de plusieurs études. Une technique de chauffage se

basant sur un système de captation solaire de stockage et de restitution de la chaleur, a été développée au C.N.R.S (France) par le Professeur Trombe [29].

Le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel sont à l'origine de la création d'un mur qui porte leur noms, qui est appelé le mur Trombe ou le mur Trombe-Michel. Ce mur permet de chauffer le logement grâce au rayonnement solaire et de limiter les besoins en chauffage et d'utiliser de manière optimale les ressources énergétiques provenant du climat [30].

Le mur Trombe est un système simple et intéressant de captage de l'énergie solaire (Figure II.7). Il est constitué d'un mur vertical en maçonnerie lourde orienté vers le sud et, muni de deux orifices permettant la circulation de l'air entre le local et la serre formée par la surface réceptrice du mur et le vitrage qui le précède [29].

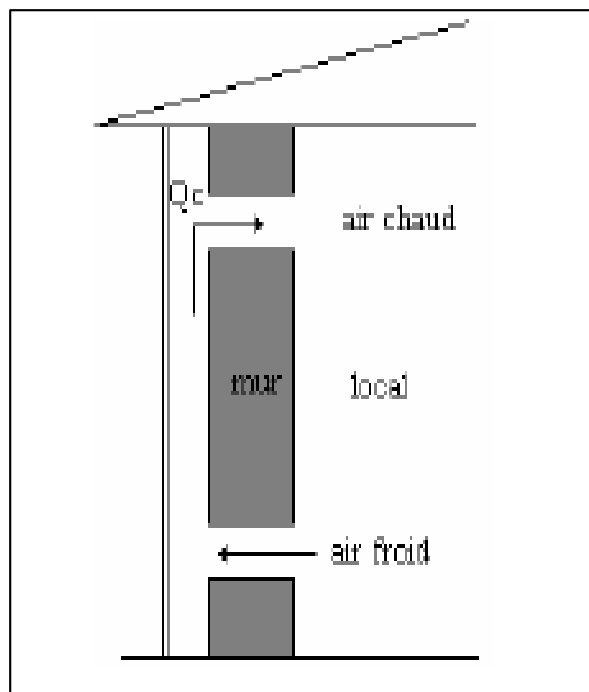


Figure II. 7 : Mur trombe

#### II.4.2) La construction et le fonctionnement de mur Trombe

Un mur Trombe se compose d'une partie en béton devant laquelle on dispose un vitrage en laissant une lame d'air. Il possède des ouvertures en haut et en bas pour faire circuler l'air. Les rayons solaires traversent la vitre afin d'être absorbés par le mur, peint dans une couleur sombre pour une meilleure absorption [30] (Figure II.8).

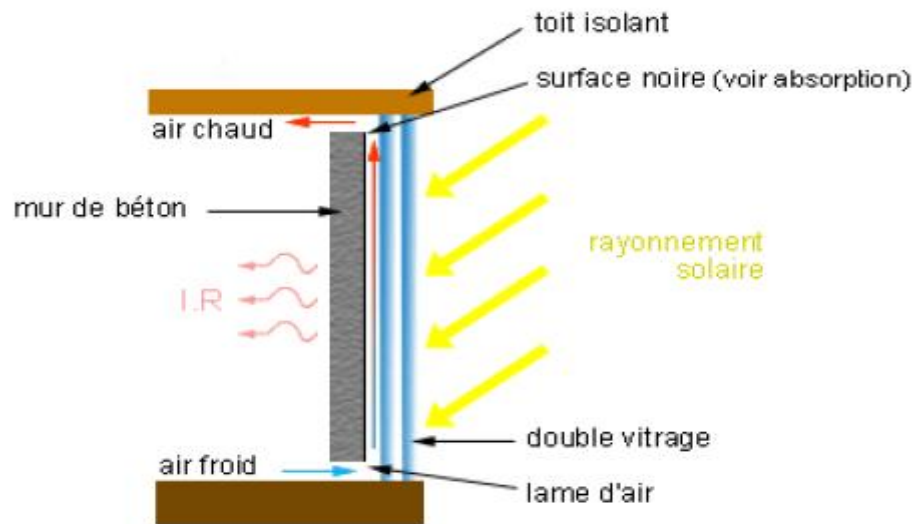


Figure II. 8 : Schéma principale d'un mur-trombe -Michel

Le mur se réchauffe et émet un rayonnement infrarouge ne pouvant traverser le vitrage : la chaleur est piégée entre le mur et la vitre. On utilise alors le mur différemment selon les saisons et la période de la journée : [30]

- **La nuit :**

L'ouverture supérieure est fermée afin d'éviter que de l'air intérieur chaud vienne à se refroidir dans la lame d'air pour retourner ensuite dans le domicile.

- **En hiver :**

L'air froid rentre dans le mur par les ouvertures du bas, grâce à un mouvement de convection, il se réchauffe, monte puis retourne dans la maison via les ouvertures supérieures.

- **En été :**

Pour que le logement ne soit pas en surchauffe, l'air chaud est évacué en ouvrant le clapet supérieur tout en fermant celui inférieur

#### II.4.3) Mur trombe avec MCP

Les murs Trombe à base de MCP sont constitués de mur en béton incorporant des matériaux à changement de phase micro ou macro-encapsulés (figure II.9). Ces matériaux permettent la production de phénomène de changement de phase, ce qui assure une gestion active de la température, et maintient la température de l'air dans le logement à une valeur constante pendant la transition de phase (point de fusion). L'avantage de l'intégration des MCPs

dans un mur Trombe est le stockage d'une grande quantité d'énergie dans un volume réduit, ce qui permet l'amélioration de l'inertie thermique et avoir un meilleur rendement thermique.

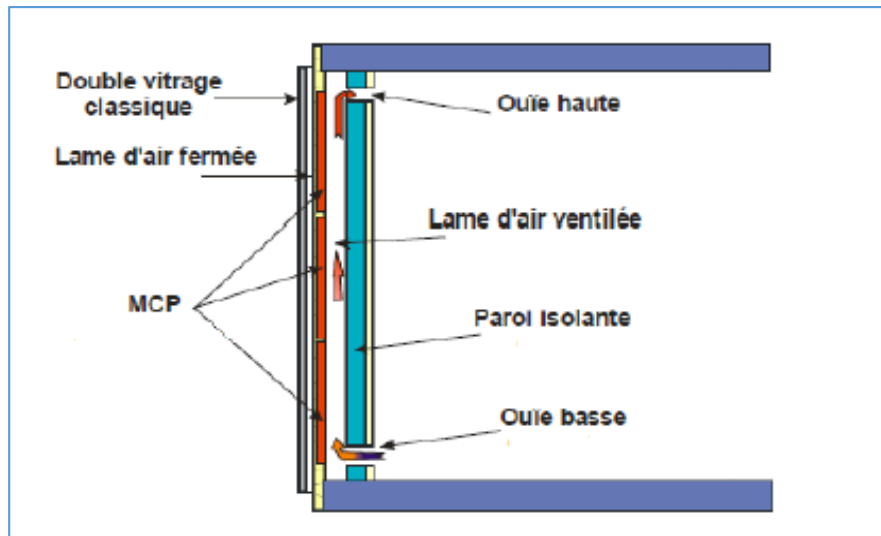


Figure II. 9 : Mur trombe incorporant des MCP

### Conclusion

Le stockage d'énergie thermique dans l'habitat présente de nombreux avantages, notamment dans l'objectif de réduire la consommation d'énergie. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons donné les différentes techniques d'intégration et l'application de MCP dans le bâtiment (à la toiture, aux plancher,.....).

Par la suite, nous avons présenté un mur Trombe et son mode de fonctionnement pour faire le stockage de chaleur.

# **Chapitre III**

## **Matériels et méthodes**

Le système stockage de chaleur latente est largement utilisé dans l'industrie de la construction en raison de sa forte capacité de stockage à température constante dans les matériaux de construction de petit volume. Le stockage se fait à travers des matériaux dits à changement de phase (MCP).

Notre travail consiste à déterminer la matrice qui possède un taux d'absorption important de MCP parmi les trois matrices testées (la brique, le plâtre et la perlite), pour avoir un nouveau composite composé de MCP/ la matrice choisie /graphite afin de l'utiliser pour faire le stockage de chaleur.

### III.1) Matériaux utilisés pour l'élaboration des composites MCPs

#### III.1.1) Le MCP (la graisse végétale)

La graisse végétale utilisée est un produit récupéré du secteur de l'industrie agro-alimentaire, elle est généralement utilisée dans la fabrication des produits de chocolat.

Cette graisse se caractérise par un point de fusion situé entre 35 et 37 °C, et sa capacité de stockage par chaleur latente est de 108.39 J/g. Cette substance est composée de plusieurs acides gras, tels que l'acide palmitique, l'acide myristique ainsi que l'acide laurique qui présente le taux le plus élevé dans la composition du produit.



Figure III. 1: La graisse végétale utilisée.

#### III.1.2) Les matrices utilisées

##### III.1.2.1) La perlite expansée

La perlite est une roche volcanique siliceuse naturelle, elle possède la propriété de prendre de l'expansion après broyage et cuisson. Lorsqu'on chauffe à des températures variant de 900 à 1100 °C, l'expansion volume peut atteindre quatre à vingt fois le volume initial [31].

**Caractéristiques technique de la perlite :**Densité apparente : 50-80 kg/m<sup>3</sup>densité compacté : 60-100 kg/m<sup>3</sup>

Couleur : blanc/gris –blanc

valeur de pH : 7-9

Quantité de : SiO<sub>2</sub> = 60-80 %

Figure III. 2: La perlite expansée

**Préparation de poudre de la perlite expansée :**

La perlite expansée est tout d'abord séchée dans une étuve à la température 105 °C pendant 24h (Figure III.3). Ensuite la perlite sèche est broyée avec un moulin et un tamis de diamètre de 0,01 mm pour obtenir une poudre la plus fine possible (Figure III.4.5).



Figure III. 3: L'étuve utilisée pour le séchage de la perlite



Figure III. 4 : Broyage de la perlite expansée dans le moulin



Figure III. 5: Perlite expansée obtenue

### III.1.2.2) La brique rouge

La brique rouge est un élément de construction, elle se compose d'argile rouge et de sable, Elle est employée principalement dans la construction de murs (Figure III.6). Dans notre travail on a récupéré les débris de brique rouge.



Figure III. 6 : Brique rouge

- **Préparation de la poudre de brique rouge**

Pour l'obtention de la poudre, nous avons mis des débris de brique rouge dans un broyeur pour la réduire en poudre à différentes tailles. Par la suite, cette dernière est tamisée à l'aide d'un tamis de diamètre de 0,01 mm afin d'obtenir une poudre fine de taille désirée (Figure III.7 à 9).



Figure III. 7: Broyage de la brique



Figure III. 8 : Tamisage de la poudre



Figure III. 9 : Brique rouge sous forme de poudre

### III.1.2.3) Le Plâtre

Le plâtre désigne principalement un matériau de construction à propriétés isolantes ou ignifuges. Il est fabriqué industriellement à partir de la matière première rocheuse qui est le gypse. Le terme plâtre désigne, dans la pratique, soit la poudre ou la matière poudreuse industrielle de départ (le plâtre sec à aviver), soit la pâte constituée d'un mélange de poudre et d'eau à employer (le plâtre prêt), soit le matériau compact, par exemple sous forme de plaques [32].

### III.1.3) Le Graphite

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie du noir au gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible ; Il est caractérisé par sa faible densité qui varie de 2.1 à 2.3 et son point de fusion très élevé (3 500 °C).

Le graphite est une substance inerte qui résiste à l'attaque de la plupart des produits chimiques. C'est un excellent conducteur d'électricité et de chaleur. En raison de ses bonnes propriétés physique et chimique tels que la neutralité chimique, la bonne résistance à la chaleur, la bonne conductivité thermique et électrique, le faible coefficient d'expansion thermique, et le faible coefficient d'absorption des rayons X et des électrons. Il est utilisé dans de nombreux domaines tels que la fabrication des mines de crayons, les réfractaires, les creusets et les moules, les balais de moteurs électriques, les garnitures de freins et d'embrayages et les joints de pompes, les piles à combustible pour les véhicules [33].

Dans notre étude, le graphite expansé (GE) est ajouté au composite à différentes fractions pour améliorer la conductivité thermique des composites MCPs (Figure III.10).



Figure III. 10: Graphite expansé

### III.2 Préparation des composites MCPs (MCP/Perlite expansée, MCP/Brique rouge et MCP/Plâtre)

Pour la préparation de ces composites, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Les différents éléments de chaque composite ont été pesés à l'aide d'une balance électronique (figure III.11). La proportion en masse de chaque élément du composite a

été modifiée pour trouver la forme idéale (le composite qui possède moins de fuite de MCP lors du processus de chauffage).

- Le matériau à changement de phase (MCP) est fondu à l'aide d'un bain mari. La matrice (la perlite expansée, la brique rouge ou le plâtre) réduite en poudre et préalablement chauffée est injectée directement sur le MCP fondu pour assurer un mélange homogène (figure III.12).
- Le mélange homogène obtenu est versé dans l'empreinte d'un moule de forme parallélépipédique pour fabriquer des pastilles de dimension  $40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$  (voir figure III.13).
- Après la cristallisation, des pastilles de composites MCPs à différentes proportions massiques ont été obtenues (figure III.14).



Figure III. 11 : Pesée des différents éléments sur une balance



Figure III. 12 : Fusion du MCP et Mélange homogène des différents constituants du composite

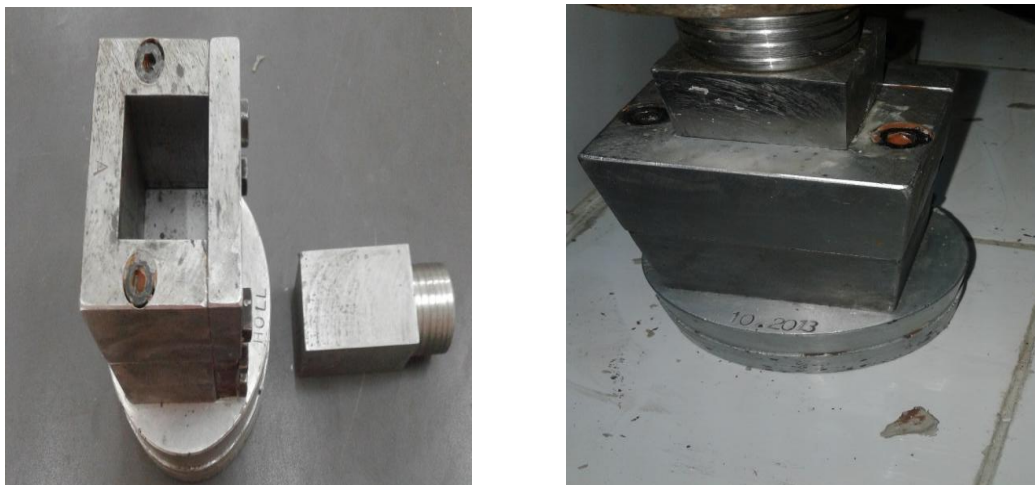


Figure III. 13 : Moule métallique conçu pour l'élaboration du composite



a) MCP/Perlite expansée    b) MCP/ Brique rouge    c) MCP/ Plâtre

Figure III. 14: Composites MCPs (MCP/perlite, MCP/brique, MCP/plâtre) après démoulage.

## III.2.1 Test de fuite

Après l'obtention des pastilles de différents composites et avec des masses différentes (figure III.15), celles-ci ont été placées dans une étuve pendant deux heures de temps sous une température de 50 °C pour observer les fuites du MCP de ces pastilles (figure III.16), puis une pastille de chaque composite pour laquelle le moins de fuite de MCP a été observé est choisie. Parmi les pastilles choisies le composite qui absorbe plus de MCP est celui pour lequel la fuite de MCP est faible.



a) MCP/ Plâtre



b) MCP/ Brique rouge



c) MCP/ Perlite expansée

Figure III. 15: Composites MCPs obtenus à des différentes proportions massiques



Figure III. 16: Etuve utilisée pour le chauffage des composites MCPs

### III.3 Incorporation du graphite expansé dans les composites MCPs :

Un composite MCP idéal a été choisi parmi les trois composites élaborés, pour une application dans le stockage de chaleur. Nous avons refait les mêmes étapes de préparation de composite MCP avec l'ajout du graphite expansé à différents pourcentages afin d'améliorer la conductivité thermique du composite. Par la suite, nous avons refait le test de fuite pour obtenir une forme stable avec le graphite expansé.

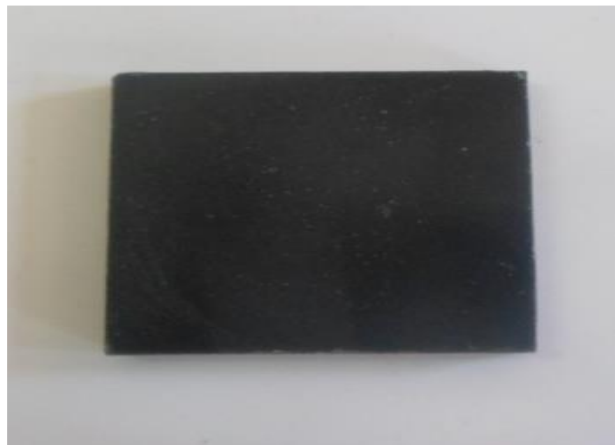


Figure III. 17: Composite MCP avec graphite expansé

### III.4 Méthodes expérimentales

Afin de mieux étudier les propriétés thermo-physiques de ces matériaux, plusieurs techniques de caractérisation ont été utilisées.

### III.4.1 La spectroscopie Infra – Rouge à transformée de Fourier (FT-IR)

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou spectroscopie (FT-IR) est une technique utilisée pour obtenir le spectre d'absorption, d'émission, La photoconductivité ou la diffusion Raman dans l'infrarouge d'un échantillon solide, liquide ou gazeux.

Le terme « spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier » vient du fait qu'il est nécessaire de passer par une transformée de Fourier pour convertir les données brutes en résultat spectral réel.



Figure III. 18: La spectroscopie Infra - Rouge utilisée

- **Description de l'appareil :**

La spectroscopie Infra - Rouge utilisée est un spectrophomètre infrarouge à transformée de Fourier compacte et élégant, l'interféromètre est continuellement optimisé par un mécanisme d'alignement dynamique et un système desséchant automatique intégré qui facilitent l'entretien.

- **Principe de fonctionnement**

Le but de toute spectroscopie d'absorption (FT-IR, ultraviolet-visible ...) est de mesurer combien un échantillon absorbe de lumière, en fonction de l'onde. Le principe de la spectroscopie par transformée de Fourier est une façon moins intuitive d'obtenir la même information. Plutôt que d'illuminer l'échantillon avec un faisceau de lumière monochromatique, cette technique utilise un faisceau contenant une combinaison de multiples fréquences de la lumière, et on mesure l'absorption par l'échantillon. Le faisceau est ensuite modifié pour contenir une combinaison de fréquences différentes, on mesure de nouveau l'absorption par l'échantillon, et l'opération est répétée de nouveau plusieurs fois. Une fois toutes les données acquises, un ordinateur prend ces données et fait un calcul à rebours pour en déduire l'absorption à chaque longueur d'onde.

- **Préparation de l'échantillon**

On prend toutes les poudres utilisées (brique, perlite, plâtre, graphite), ainsi que le MCP, et une partie des pastilles réalisées est réduite sous forme de poudre, pour les utiliser dans le test FT-IR.

#### **III.4.2) Préparation des plaques pour la mesure de la conductivité thermique :**

Pour la réalisation des plaques de (300x300x10 mm), nous avons préparé un mélange de trois éléments de composite (MCP, la matrice choisie, le graphite) de masse environs de 1100 g, en procédant par les étapes suivantes :

- Nous avons pesé les trois éléments de composite selon la proportion en masse de chaque élément.
- Le matériau à changement de phase (MCP) est fondu à l'aide d'un bain mari. La matrice réduite en poudre, préalablement chauffée est injectée directement sur le MCP fondu puis elle est malaxée afin d'obtenir une meilleure imprégnation. (figure III.19.20).
- Par la suite, le mélange obtenu est versé dans un moule fabriqué en bois (figure III.21.). une compression manuelle a été exercée sur la plaque pour chasser les bulles d'air et obtenir un meilleur état de surface (lisse sans cavités).
- La plaque composite obtenue est ensuite séchée à l'air libre pour permettre la cristallisation latente du MCP.
- Après la cristallisation, les plaques de composites MCP, de dimension (300x300x10 mm) sont obtenues après démoulage (figure III.22).



Figure III. 19: Fusion de MCP



Figure III. 20: Mélange obtenu



Figure III.21: Le moule en bois utilisé



Figure III. 22: Composite MCP obtenu après  
démoulage

### III.4.3) Mesure de la conductivité thermique :

La conductivité thermique des matériaux élaborés est mesurée à l'aide de CT mètre technique

- **Le CT mètre :**

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif. Il a été élaboré dans le but d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements (figure III.23).

- **Description de l'appareil :**

Une armoire à charnières en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble. La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide, installée sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide de l'eau à température constante de façon à ce que la plaque soit sensiblement isothermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolt, proportionnellement à la différence de température sur les deux surfaces. Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée de manière électronique par une température de consigne qui est fixé au préalable. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poignées à vis situées en haut de l'armoire.

Un indicateur à cadran dans la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens de l'épaisseur jusqu'à 75 mm La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70 °C). Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher les pertes de chaleur.

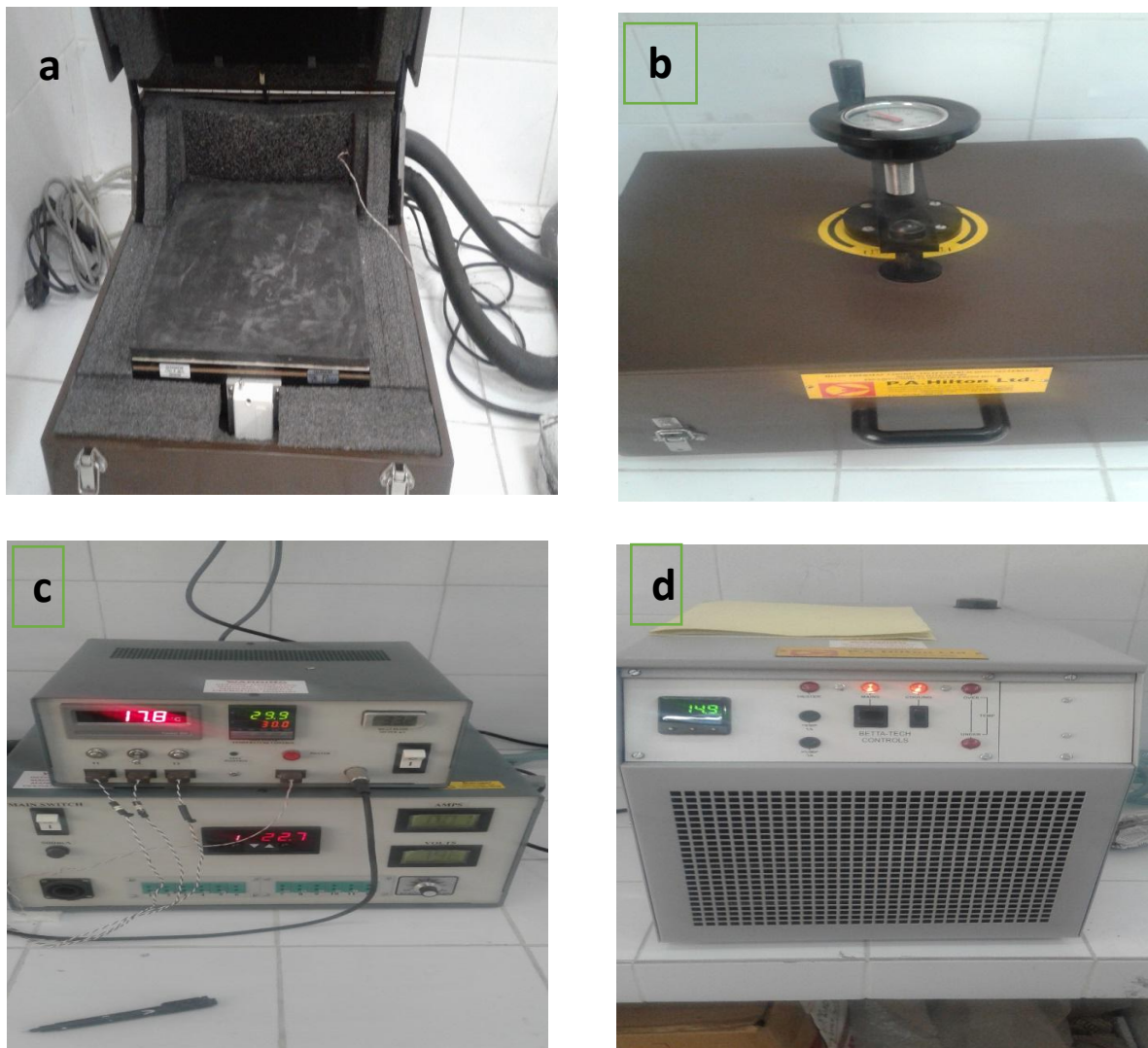


Figure III. 23: Mesure de la conductivité thermique avec CT mètre

- **Méthode d'essai :**

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique est de 300×300 mm, le spécimen testé doit avoir une épaisseur de 75 mm

La résistance thermique se situe entre 0,1 et 1,4 m<sup>2</sup>.K/W. En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen doit être mince, sinon la durée du test sera longue.

Des tapis en silicone de faible résistance thermique sont utilisés pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide.

Pour les spécimens granuleux, comme le sable et le gravier, une plinthe de bois est fournie pour introduire le matériau. Il doit être placé dans la plinthe de 15 mm d'épaisseur pour lui donner

une densité maximale, sinon le résultat ne sera pas précis à cause des espaces d'air entre les grains de sable.

- **Méthode de calcul :**

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque cinq lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% lorsqu'elle ne change pas. A chaque intervalle d'échantillonnage, on note les valeurs de  $T_1$  et  $T_2$  et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre  $T_1$  et  $T_2$  sont calculées.

Selon que les tapis en silicone soient utilisés ou non, la conductivité thermique peut être déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{Is[(k_1 + (k_2 * T)) + ((k_3 + (k_4 * T) * HFM)) + ((K_5 + (K_6 * T)) * HFM^2)]}{\Delta T}$$

Avec :

$\lambda$  : Conductivité thermique

**Is** : épaisseur du spécimen en m

**$\Delta T$**  : différence de température en °C (T1-T2)

**T** : température moyenne en °C (T1+T2)/2

**HFM** : sortie du débitmètre (Heat Folowmetre Reading) en mV.

**T<sub>1</sub>** : température de la plaque chaude.

**T<sub>2</sub>** : température de la plaque froide.

**Les constantes d'étalonnage avec ou sans silicone :**

$K_1 = 88.1389$

$K_2 = -2.7829$

$$K_3 = -21.3064$$

$$K_4 = 0.8037$$

$$K_5 = 0.7954$$

$$K_6 = -0.0189$$

#### **III.4.4) Le conditionnement de MCP**

Pour éviter la fuite du MCP lors de processus de chauffage, on doit faire l'encapsulation de plaques réalisées à l'aide d'un emballage en aluminium.



Figure III. 24 : Encapsulation des plaques composites MCPs.

### III.4.5) Insertion des plaques composites MCPs dans la plaque BA13

Après la réalisation et le conditionnement de ces plaques, celles-ci sont intégrées entre deux plaques de BA13.



Figure III. 25: Intégration des plaques de composite MCPs entre de deux plaques BA13

### III.4.6) Tests de performance thermique

La plaque de BA13 qui contient le MCP est introduite dans le mur trombe du prototype expérimental réalisé à cet effet (Figure III. 26), pour évaluer les performances thermiques des plaques chargées de MCP [34].

Le mur trombe est constitué principalement d'un mur stockeur fabriqué en argile, et un vitrage est rajouté pour créer l'effet de serre. Une plaque remplie de MCP est ensuite placée pour le stockage par chaleur latente et l'amélioration de l'inertie thermique du mur (Figure III.27).

Les autres parois du prototype ont été construites à partir des panneaux sandwichs PVC composés de polystyrène extrudé et des faces en PVC pour une bonne isolation de la chambre (figure III.28).

Pour la toiture de ce prototype, celle-ci a été construite avec du polystyrène expansé, ce qui lui assure une bonne isolation thermique. (Figure III. 29).

Enfin des feuilles en aluminium ont été collées sur les parois intérieures pour avoir un échange par rayonnement à l'intérieur de prototype et permettre d'uniformiser les températures de parois internes (Figure III. 30).



Figure III. 26 : Cabine réalisée pour faire le test thermique



Figure III. 27 : Montage expérimental de la plaque BA13 contenant le composite MCP dans le mur trombe.



Figure III. 29: la toiture



Figure III. 28: les parois de prototype



Figure III. 30: Revêtement des parois intérieures avec des feuilles en aluminium

- **Les instruments de mesure :**

Après la mise en place de la plaque de BA 13 sur le mur, une campagne de mesures de températures à l'aide des thermocouples de type K (Figure III.31) a été effectuée. Placés dans des différents coins de la cabine (figure III.33 et tableau III.1), ces thermocouples sont reliés à un enregistreur de données (figure III.32), qui permet de mesurer et d'enregistrer les températures détectées.



Figure III. 31: Les thermocouples de type k

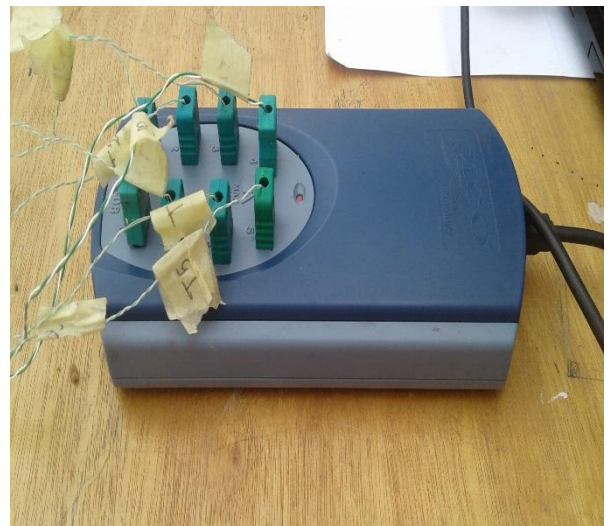


Figure III. 32 : L'enregistreur de données

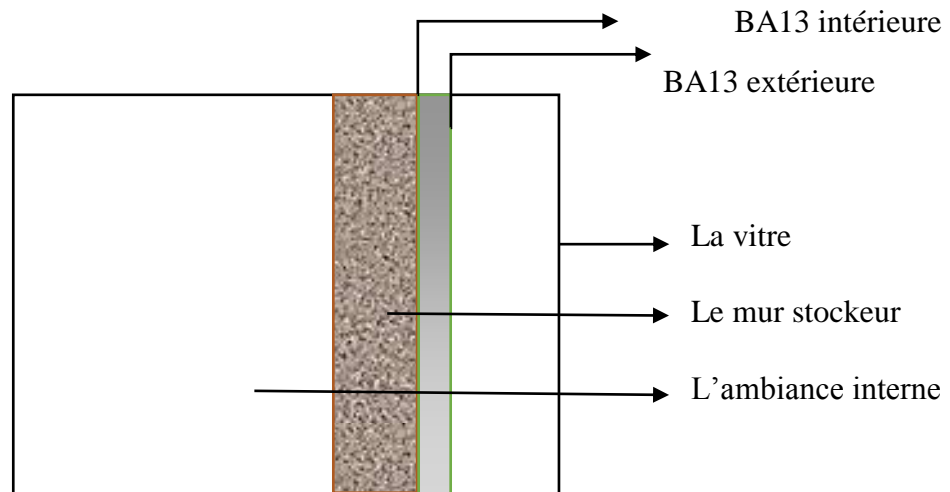


Figure III. 33: Emplacement des thermocouples sur le prototype

#### Répartition des thermocouples sur le prototype :

Nous avons utilisé 07 thermocouples, et l'emplacement de ces thermocouples est représenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau III. 1: Répartition des thermocouples sur la cabine.

N° de Thermocouples	Emplacement
T.C 01	Température de vitre extérieure
T.C 02	Température de vitre intérieure
T.C 03	Température de B13 extérieure
T.C 04	Température de B13 intérieure
T.C 05	Température de mur interne
T.C 06	Température de l'ambiance interne
T.C 07	Température de l'air extérieure

Cet enregistreur est relié à un micro-ordinateur pour la lecture et l'étude de l'évolution de chaque température sous forme de courbe ou de tableau (Figure III.34).

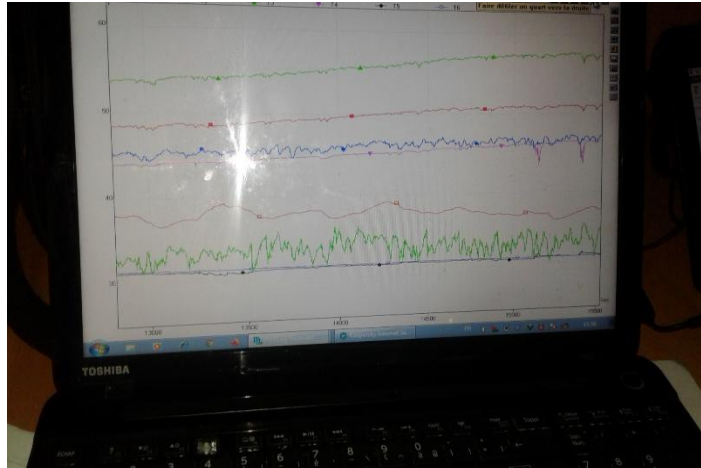


Figure III. 34 : La lecture de l'évolution de température

### Conclusion :

Ce chapitre est scindé en deux parties principales. Dans la première partie, nous avons présenté tous les matériaux utilisés, l'illustration des étapes suivies pour la préparation et l'élaboration du composite MCP et nous avons décrit tous les tests appliqués sur ce composite.

Dans la deuxième partie, nous avons décrit la méthode d'application de ce composite sur un prototype et les instruments de mesure utilisés pour faire les tests de performances thermiques de ce composite.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussion**

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les différents composants de composites MCPs et les différentes techniques d'analyse utilisées pour leurs caractérisations. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de caractérisation des propriétés et les performances thermiques lors du stockage de l'énergie thermique.

#### IV.1) Détermination du taux d'absorption du matériau à changement de phase pour chaque matrice

Afin de déterminer le taux d'absorption maximum du MCP par les matrices minérales choisies pour notre travail, plusieurs échantillons et pour différentes matrices ont été préparées avec différentes fractions massiques du MCP qui sont répertoriés dans les tableaux suivants :

Tableau IV. 1: Fractions massiques testées pour le composite MCP/Brique

<b>Echantillon</b>	<b>MCP (%)</b>	<b>Brique rouge (%)</b>
1	38	62
2	30	70
3	25	75
4	20	80

Tableau IV. 2: Fractions massiques testées pour le composite MCP/Plâtre

<b>Echantillon</b>	<b>MCP (%)</b>	<b>Plâtre (%)</b>
1	32	68
2	30	70
3	27	73
4	24	76

Tableau IV. 3 : Fractions massiques testées pour le composite MCP/Perlite expansée

<b>Echantillon</b>	<b>MCP (%)</b>	<b>Perlite expansée (%)</b>
1	62	38
2	60	40
3	58	42
4	56	44

La fraction massique optimale (sans fuite du MCP) est déterminée après traitement thermique des pastilles à 50 °C pendant 2 heures. La taille de la tâche du MCP sur le papier absorbant après le traitement thermique, nous renseigne sur la performance de la matrice à retenir le MCP à l'état fusion. Les composites obtenus sans fuite du MCP sont des composites à forme stabilisée.

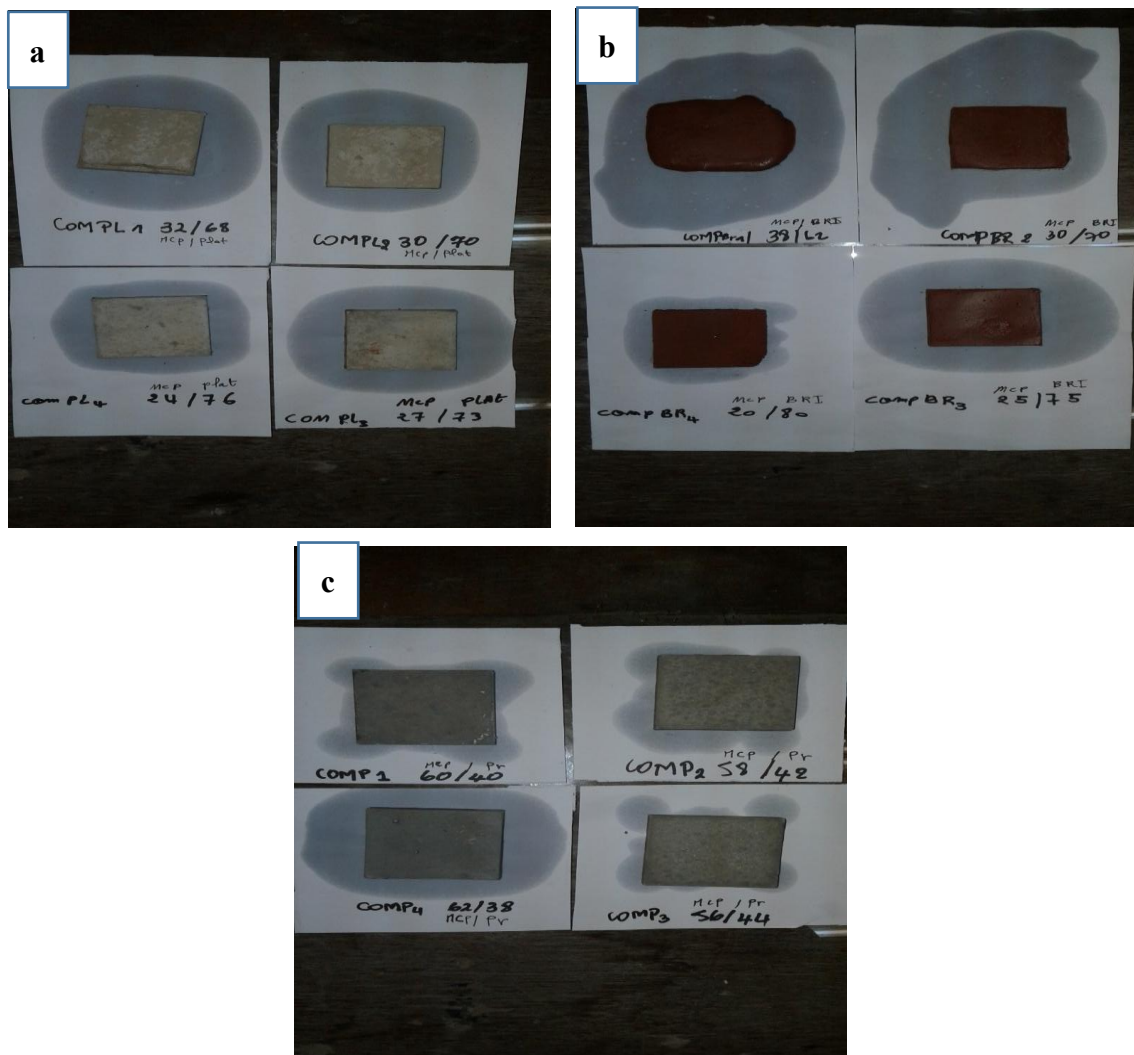


Figure IV. 1 : Test de fuite pour les composites MCPs élaborés

Ce tableau ci-dessous présente la fraction massique optimale pour chaque matrice :

Tableau IV. 4. Fraction massique optimale du MCP pour chaque matrice

<b>Matrice</b>	<b>Fraction massique optimale du MCP (%)</b>
Brique rouge	20
Perlite expansée (PE)	<b>56</b>
Plâtre (PLAT)	24

D'après le tableau IV.4, le taux d'absorption diffère d'une matrice à une autre cela est dû à la capacité de la microstructure des grains de chacune à retenir le MCP et la cristallinité du MCP. La perlite expansée présente un meilleur taux d'absorption (56%) et celle-ci est choisie comme support pour les matériaux à changement de phase pour le test de stockage thermique.

- **Ajout du graphite expansé pour le composite MCP/Perlite expansée**

Après le choix du composite MCP/Perlite avec la proportion en masse de 56% de MCP et 44% de perlite, nous avons incorporé le graphite avec une fraction massique de 7%. Puis nous avons effectué le test de fuite. Nous avons remarqué que la fraction massique du MCP est insuffisante, cela est dû à l'absorption de ce dernier par le graphite expansé.

De nouveaux composites avec graphite sont préparés afin de remédier le problème du MCP en testant deux fractions massiques 60 et 62 % du MCP (Figure IV.2). Après le traitement de test de fuite, une nouvelle fraction massique du composite MCP avec graphite expansé est choisie avec 60% du MCP, 33% de perlite expansée et 7% de graphite expansé.



Figure IV. 2 : Composite MCP avec graphite expansé après le test de fuite

## IV .2 Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

Le MCP, les supports de stockage et les composites élaborés sont caractérisés par analyse à transformée de Fourier (FT-IR) pour enquêter sur la compatibilité chimique du composite MCP.

### IV.2.1 Le MCP utilisé

Les MCPs sont caractérisés d'abord par analyse à transformée de Fourier (FT-IR) afin d'analyser l'empreinte chimique de ces composants et faciliter l'attribution des pics d'absorption.

Le diagramme de spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier pour le MCP utilisé est présenté dans la Figure IV. 3

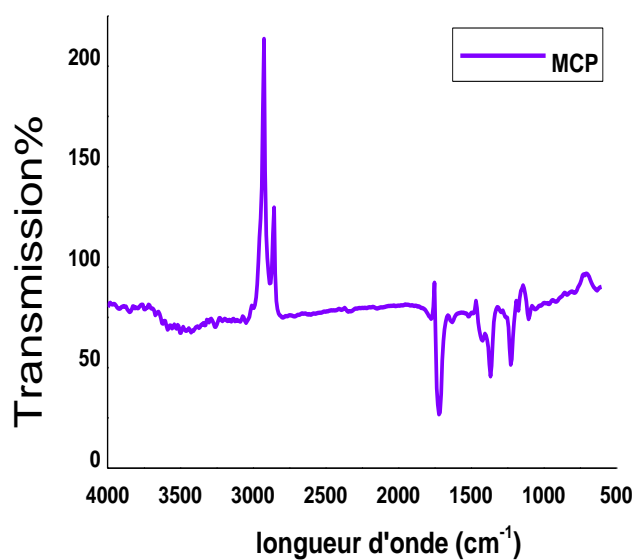


Figure IV. 3 : Spectre FT-IR du MCP (graisse végétale)

Le spectre infrarouge de la graisse végétale a met en évidence les bandes d'absorption caractéristiques Suivantes : [35]

- 2924,08 cm<sup>-1</sup> : correspond aux vibrations symétriques de la liaison C-H, CH<sub>2</sub>
- 1720,50 cm<sup>-1</sup> : correspond aux vibrations C=O.
- 1365,60 cm<sup>-1</sup> : correspond aux vibrations de déformation de la liaison CH<sub>2</sub>

## IV.2.2 La matrice utilisée

## IV.2.2.1 Perlite Expansée

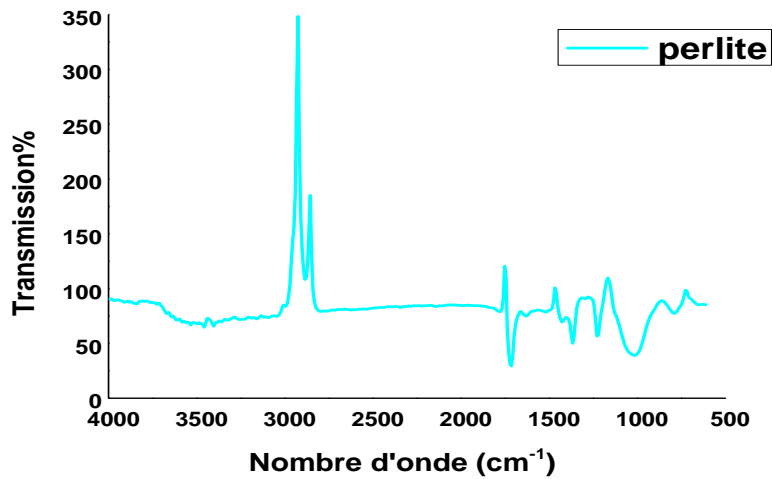


Figure IV. 4 : Spectre FT-IR de la perlite expansée

L'examen de ce spectre fait apparaître des bandes d'absorption suivantes : [35]

- $3448,72 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison Si-OH
- Le pic à  $2885,50 \text{ cm}^{-1}$  correspond aux vibrations de valence des groupes C-H, CH<sub>2</sub>
- Pic à  $1712,78 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation hors plan de la liaison OH
- Pic à  $1357,88 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison CH<sub>2</sub>
- Pic à  $1018,41 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de la liaison Si-O-Si
- Pic à  $779,24 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation hors plan de la liaison SiO-H

## IV.2.2.2 Graphite expansé

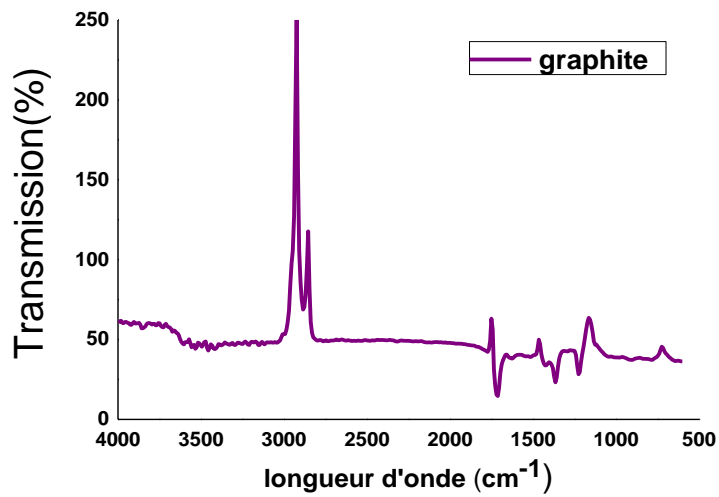


Figure IV. 5 : Spectre infrarouge du graphite

Le spectre infrarouge du graphite met en évidence les bandes d'absorption caractéristiques suivantes [35] :

- $2877,79 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de valence correspond à C-H
- $1712,78 \text{ cm}^{-1}$  : correspond aux vibrations C=O
- $1365,60 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison CH<sub>2</sub>

## IV.2.2.3 Brique rouge

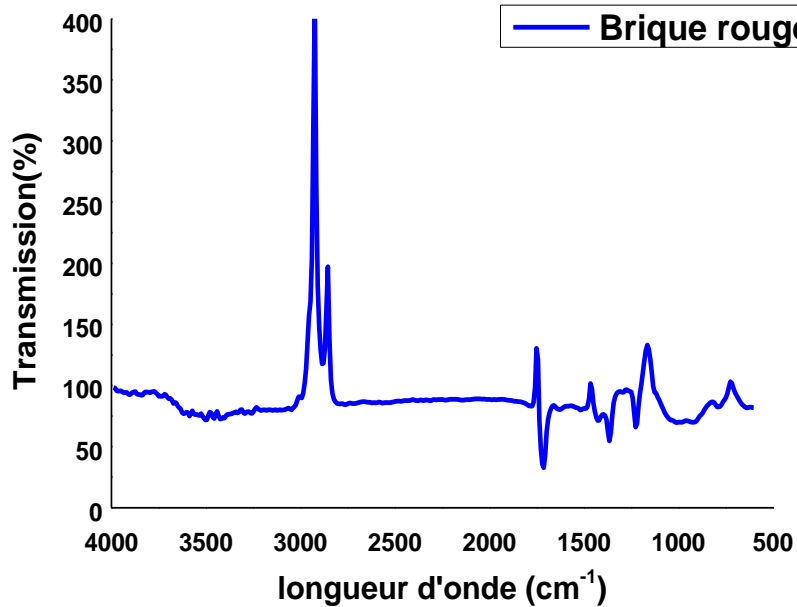


Figure IV. 6 : Spectre infrarouge de la brique

Le spectre infrarouge de la brique met en évidence les bandes d'absorption caractéristiques Suivantes : [35]

- $2885,50 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de valence correspond à C-H
- $1720,50 \text{ cm}^{-1}$  : correspond aux vibrations C=O
- $1365,60 \text{ cm}^{-1}$ ,  $1200 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison CH<sub>2</sub>
- $1157,2 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison Si-O
- $817,81 \text{ cm}^{-1}$  : cette vibration peut être attribuée à la présence quartz.
- $725,23 \text{ cm}^{-1}$  : vibration de déformation hors plan de la liaison Si-O-Al

## IV.2.2.4 Plâtre

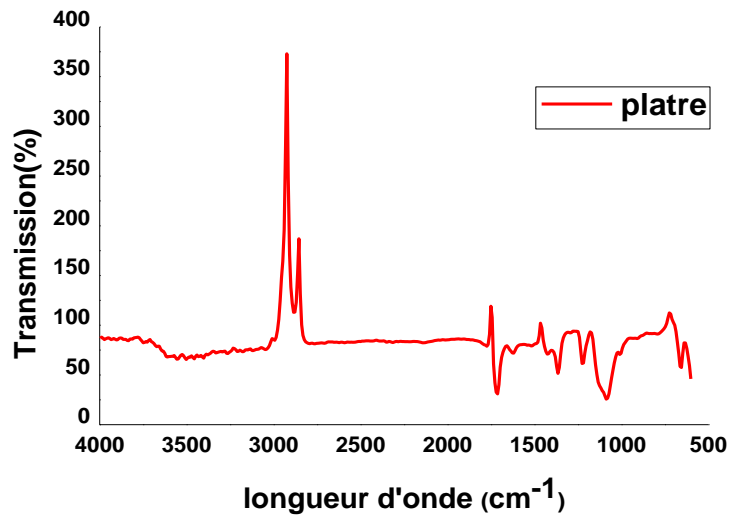


Figure IV. 7 : Spectre infrarouge du plâtre

Le spectre infrarouge du plâtre met en évidence les bandes d'absorption caractéristiques Suivantes : [35]

- 2877,79  $\text{cm}^{-1}$  : vibration de valence correspond à C-H
- 1720,50  $\text{cm}^{-1}$  : correspond aux vibrations OH
- 1080,13  $\text{cm}^{-1}$ , 1200  $\text{cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison  $\text{CH}_2$
- 1188,15  $\text{cm}^{-1}$  : vibration de déformation de la liaison Si-O-Si
- 709,80  $\text{cm}^{-1}$  : vibration de déformation de liaison Si-OH
- 663,51  $\text{cm}^{-1}$  : vibration de déformation hors plan de la liaison C=O

## IV.2.3 Composites MCPs élaborés

## IV.2.3 .1 Composite MCP/ Perlite expansée /Graphite

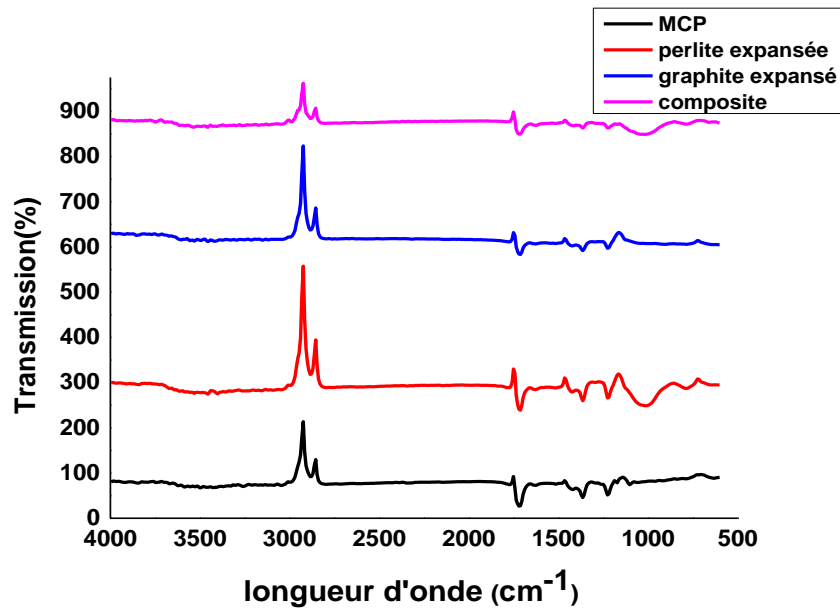


Figure IV. 8 : Spectre FT-IR du composite MCP/Perlite/Graphite

## IV.2.3 .2 Composite MCP/ Brique rouge /Graphite

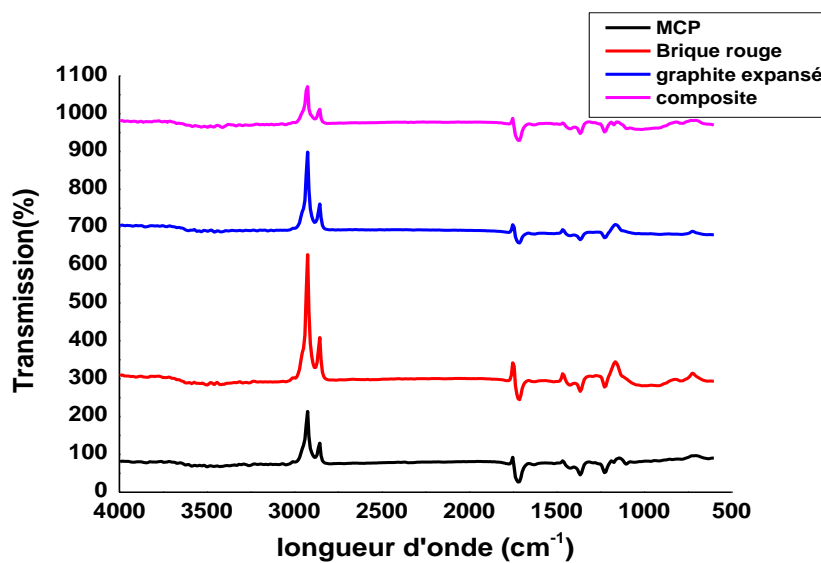


Figure IV. 9 : spectre infrarouge du composite (MCP, brique, graphite)

## IV.2.3.3 Composite MCP/ Plâtre /Graphite

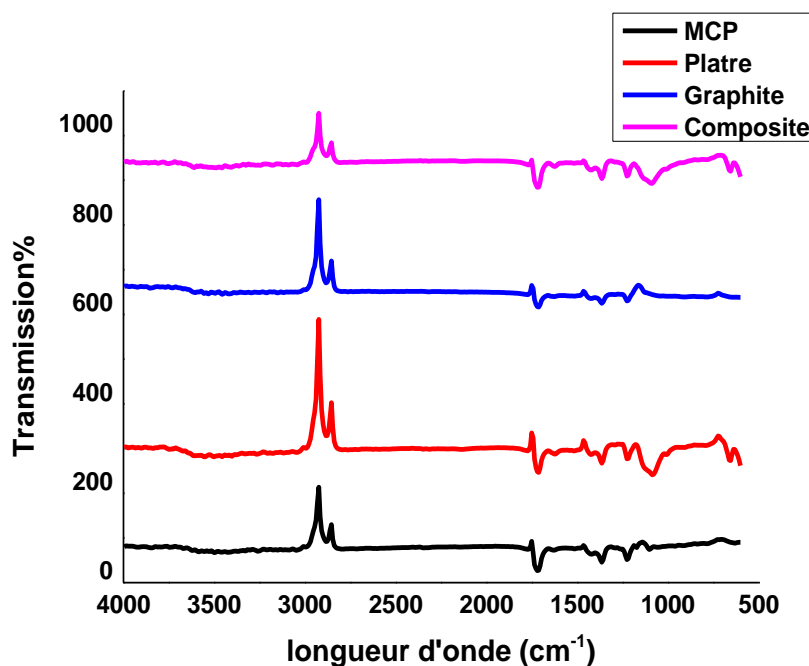


Figure IV. 10. spectre infrarouge du composite (MCP, plâtre, graphite)

La caractérisation par spectroscopie infrarouge est réalisée pour évaluer les interactions probables entre le MCP et les matrices utilisées au cours du processus d'élaboration du composite.

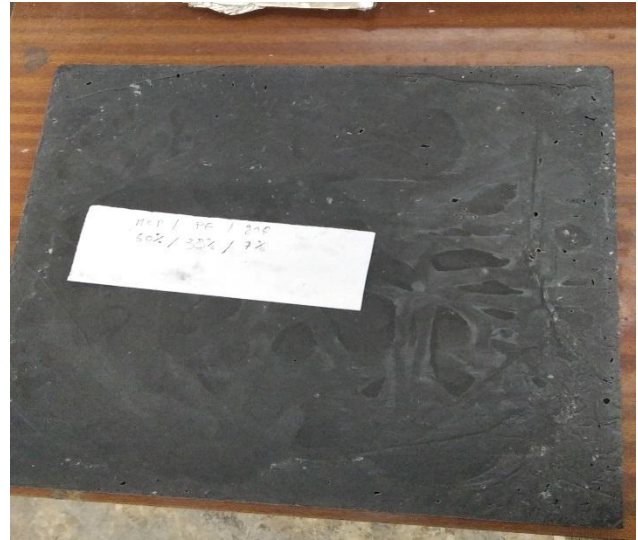
Les spectres des matrices et les composites élaborés sont illustrés dans les figures IV-8, IV-9 et IV-10. On peut clairement voir que la plupart des pics d'absorption des principaux groupes fonctionnels du MCP et des matrices correspondantes apparaissent dans le spectre des composites MCPs avec un léger décalage. Aucun nouveau pic d'absorption significatif n'est apparu dans le spectre des composites MCPs par rapport à ceux du MCP et les matrices correspondantes ; ce qui indique qu'aucune nouvelle liaison chimique n'est générée entre le MCP et la matrice (Perlite expansée, Brique rouge et Plâtre). Le décalage de fréquence du groupe fonctionnel indique qu'il existe certaines interactions physiques entre les différents éléments des composites ; ce qui pourrait empêcher la fuite de MCP fondus dans les matériaux de support.

### IV. 3 Analyse de la conductivité thermique

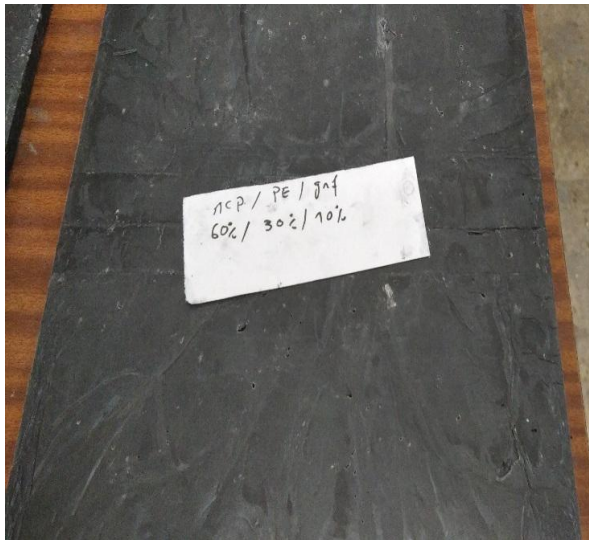
Dans cette partie, la conductivité thermique des composites MCP et composites MCP avec graphite expansé sont déterminées par le CT mètre. Pour ce faire, nous avons préparé des plaques de composites MCPs de dimension  $300 \times 300 \times 10 \text{ mm}^3$ . Pour voir l'influence de l'ajout du graphite sur la conductivité thermique des composites MCP, nous avons testé avec ces fractions suivantes : 0, 7, 10 et 15% du graphite expansé.



a) Plaque de 60 %MCP, 40% Perlite  
(Sans graphite)



b) Plaque de 60%MCP, 33% perlite,  
7% graphite



c) Plaque de 60%MCP, 30% Perlite, 10%  
graphite



d) plaque de 60%MCP, 25%perlite, 15%  
graphite

Figure IV. 11. Plaques composites MCPs élaborées pour le test de conductivité thermique

Les résultats de l'analyse de la conductivité thermique de la plaque MCP/perlite (sans graphite), et les trois autres plaques MCP/perlite/graphite à différents pourcentages de graphite (7 ; 10 ; 15).

Tableau IV. 5 : Conductivité thermique des composites MCP avec graphite expansé

Pourcentage de graphite (%)	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m. K)
0	0.1382
7	0.1626
10	0.1736
15	0.2184

La conductivité thermique est une caractéristique importante d'un MCP. Elle détermine sa charge calorifique et ses taux de décharge. D'après le tableau IV-5, on remarque que le composite MCP/ perlite expansée sans graphite présente une conductivité thermique faible ; cela est dû à la perlite qui a une très faible conductivité thermique (0.05 W/m.K) en plus de celle de l'acide gras qui est également faible. La conductivité thermique des composites MCP augmente avec la fraction massique du graphite expansé.

L'augmentation remarquable de la conductivité thermique provient de la présence du graphite expansé dans la matrice du composite. D'après ces résultats, l'incorporation du graphite expansé dans les composites MCP pourrait effectivement jouer un rôle important dans l'amélioration de la conductivité thermique. pour le test de stockage thermique, nous avons sélectionné le composite MCP avec 15% de graphite expansé.

#### IV.4) Test de performance thermique du mur stockeur

Pour étudier l'influence au cours du temps de l'incorporation d'un MCP dans les matériaux de construction du bâtiment, nous avons réalisé et expérimenté un prototype de mur stockeur composé comme suit : des plaques de composite MCP enrobées d'une feuille d'aluminium très fine pour éviter toute fuite de MCP lors de sa fusion. Ces plaques ont pour dimensions de

0.3x0.23 m et de 0.01m d'épaisseur. Elles ont été insérées entre deux plaques de BA13.

Pour les mesures de température sur les différentes surfaces des plaques, des thermocouples sont positionnés et collés au centre de chaque plaque. La disposition de ces derniers est illustrée dans la Figure III. 32)

Nous présentons dans cette partie les résultats de tests de mesure de températures effectués sur le prototype pendant les journées du 29 et 30/06/2022 à Tizi-Ouzou, avec des conditions climatiques de l'environnement (la température maximale est de 34°C ainsi l'humidité est de 73%)

#### IV.4.1) Profil de température du mur témoin (sans MCP)

Le tableau IV-6 ainsi que la figure IV-12 représentent les résultats relevés pour un test de mesures de températures pour un mur témoin dans les différents points sur le prototype en fonction de temps.

Tableau IV. 6. Evolution des températures (cas de mur sans MCP)

Heure	T1 Vitre extérieure	T2 Vitre intérieur	T3 BA13 extérieure	T4 BA13 intérieure	T5 mur interne	T6 l'ambiance interne	T7 l'air extérieure
10:00	29,96	30,73	31,51	31,25	27,65	29,94	27,14
10:30	32,38	33,39	35,69	33,32	27,55	29,85	29,27
11:00	34,63	36,48	39,61	35,65	27,86	30,09	29,33
11:30	36,51	38,88	42,6	37,45	28,25	30,02	31,48
12:00	39,13	41,23	45,28	39,11	28,86	30,22	32,02
12:30	41,29	43,69	47,68	40,46	29,67	30,65	32,09
13:00	43,3	45,22	49,3	41,89	30,29	30,93	35,97
13:30	45,33	48,19	53,19	43,71	31,01	31,28	34,39
14:00	46,14	50,34	56,34	45,4	31,51	31,58	32,13
14:30	47,24	52,09	59,05	47,4	31,96	31,93	32,96
15:00	48,22	52,32	59,24	48,42	33,41	32,78	35,52
15:30	48,15	52,51	60,14	50,04	33,29	32,97	33,88

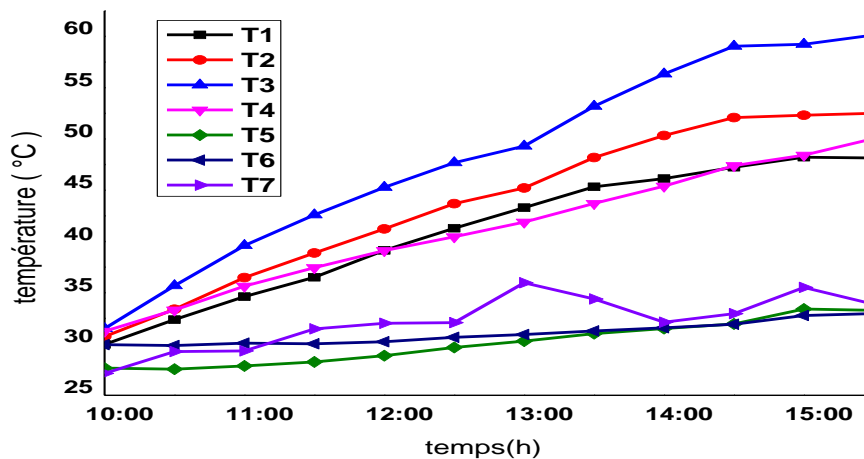


Figure IV. 12 Profil de température du mur avec la plaque BA13 sans le composite MCP allant l'intérieur vers l'extérieur

Sur le graphe IV-12 ci-dessus, nous avons représenté l'évolution de la température du mur témoin allant de l'extérieur vers l'intérieur.

Cette représentation graphique montre un profil de température tout à fait cohérent car on observe une croissance des courbes de températures. En effet, les faces extérieures recevant directement le rayonnement incident (la vitre et la face extérieure de la plaque BA13) aura tendance à s'échauffer plus que les autres couches. Les résultats expérimentaux montrent une différence de température entre la surface extérieure de la plaque BA 13 et la surface intérieure du mur en terre environs 18 à 20 °C. Cela est dû à l'inertie thermique moyenne propre de la plaque de BA13 ainsi que le mur en terre.

#### IV.4.2) Profil de température du mur avec le composite MCP:

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des températures dans les différents coins du prototype en fonction du temps.

Tableau IV. 7: Evolution des températures (cas de mur avec MCP)

Heure	T1 Vitre extérieure	T2 Vitre intérieure	T3 BA13 extérieure	T4 BA13 intérieure	T5 mur interne	T6 l'ambiance interne	T7 l'air extérieure
10:00	29,17	29,33	29,31	28,66	28,01	26,44	27,85
10:30	29,87	30,06	30,83	29,16	27,85	26,5	29,27
11:00	34	34,49	34,63	31,1	27,99	26,88	33,26
11:30	37,55	38,25	38,38	33,14	28,2	27,7	35,25
12:00	41,22	41,82	41,75	35,54	28,63	28,6	35,69
12:30	43,75	44,85	44,96	38,17	29,14	29,56	36,68
13:00	47,01	47,8	49,33	40,71	29,33	30,3	39,86
13:30	50,36	52,03	54,01	44,58	29,85	31,36	40,38
14:00	52,08	54,03	58,54	48,19	30,48	32,74	40,32
14:30	50,82	53,54	61,98	51,05	30,36	32,83	39,38
15:00	51,83	54,67	63,58	52,95	30,73	33,41	39,09
15:30	52,13	54,8	64,24	54,45	31,34	33,92	38,4

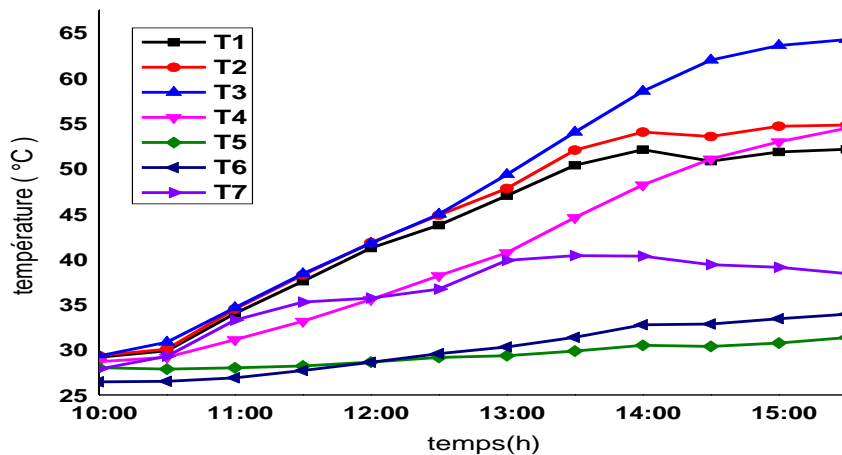


Figure IV. 13. Profil de température du mur avec la plaque BA13 remplie du composite MCP allant l'intérieur vers l'extérieur

Sous l'effet du rayonnement solaire sur la face du mur à tester de la cabine, les températures commencent à croître assez régulièrement depuis le démarrage du test. La température de l'air extérieur continue d'augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne un pic de 40°C à 13h30 mn de l'après-midi. La température de la vitre face externe et face interne (T1 et T2) ainsi que celles des deux faces la plaque de BA13 (T3 et T4) dépassent la température de l'air extérieur. Cela est dû au phénomène de l'effet de serre. Nous remarquons également que la température T3 la face extérieure de la BA13 est plus élevée que les autres températures à cause de la couleur noire de celle-ci qui permet de maximiser l'absorption du rayonnement solaire en plus de l'effet de serre.

La différence de température entre la surface extérieure de la plaque BA 13 et la surface intérieure du mur en terre est d'environ 28 à 30 °C. Cela est dû à l'inertie thermique moyenne propre de la plaque de BA13 remplie de composite MCP élaboré, ainsi celle du mur en terre.

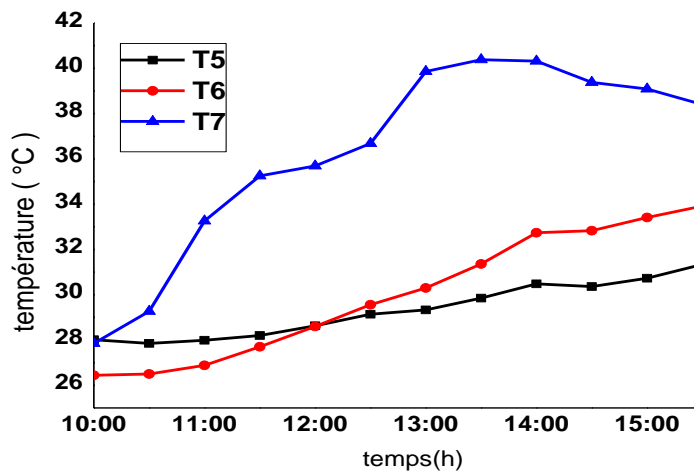


Figure IV. 14. Profil des températures de la face interne du mur en terre, ambiance interne et air extérieur

La figure ci-dessus montre qu'il existe un écart important de la température entre l'extérieure et l'intérieure de la cabine d'essai.

Nous observons également que les températures de la surface interne et celle de l'ambiance de la cabine d'essai suivent la même allure jusqu'à 12h00, puis, la température de l'ambiance interne devient supérieure à celle la paroi avec composite car l'air interne subit l'influence de l'apport de chaleur par les autres faces de la cabine qui ne sont pas isolées parfaitement. Une différence de température environ 9°C à 10 °C est observée entre l'air extérieur et l'ambiance interne ceci explique que l'inertie thermique du mur testé est renforcée.

#### IV.4.3) Comparaison entre la plaque BA13 avec et sans MCP

Pour bien comprendre le mécanisme au niveau de l'interface de la BA13 et le mur en terre, l'évolution temporelle de la température avec ou sans MCP est présentée séparément.

IV.4.3.1) La plaque BA13 sans MCP (premier cas) :

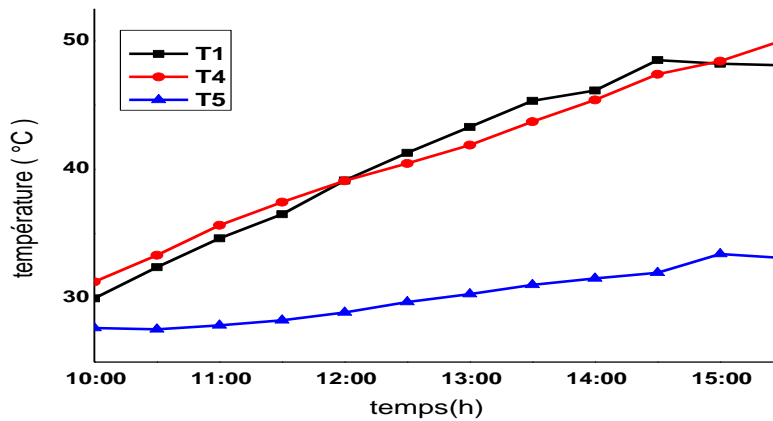


Figure IV. 15. Variation des températures de la vitre, intérieure de la BA13 et ambiance interne sans le composite MCP

La remarque qu'on peut faire pour ce cas de figure c'est que la température de la vitre extérieure et la température de BA13 intérieure sont presque identiques (ils possèdent presque les même valeurs de températures) à cause de l'absence de MCP.

On constate ainsi qu'il existe un écart important de température entre la vitre extérieure et la face interne du mur en terre, cela est dû à l'inertie de ce dernier.

IV.4.3. 2) La plaque BA13 avec MCP (deuxième cas) :

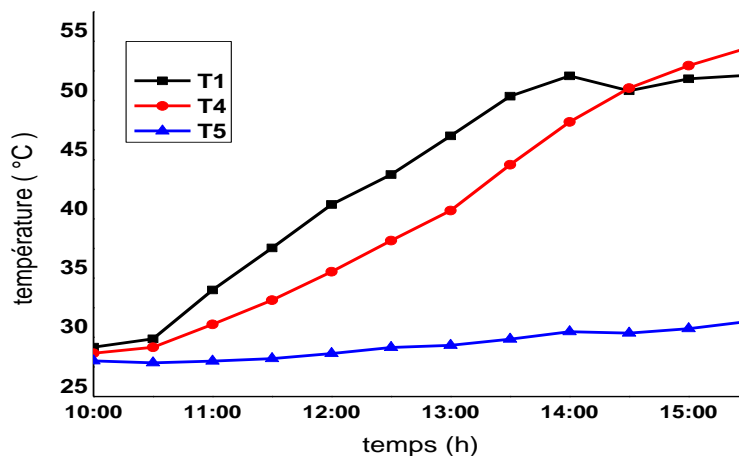


Figure IV. 16: Variation des températures de la vitre, intérieure de la BA13 et ambiance interne avec le composite MCP

La figure IV.16 montre qu'il existe une différence remarquable entre la température de la face intérieure de la plaque de BA13 et la vitre extérieure. Cela est dû à la présence du matériau à changement de phase MCP qui permet de stocker la chaleur. On constate aussi un écart important de température entre la face intérieure de la plaque BA 13 et le mur interne à cause du mur en terre qui permet ainsi de stocker la chaleur.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, le nouveau composite MCP/perlite/graphite a été élaboré. Une analyse par infrarouge nous a montré une bonne compatibilité chimique entre le MCP et les matrices minérales étudiées.

La perlite expansée présente un meilleur taux d'absorption du matériau à changement de phase. Un test par le CT mètre a été fait pour voir et déterminer l'influence de l'ajout du graphite expansé sur la conductivité thermique des composites MCP élaborés.

D'après les résultats de tests de mesures de températures effectuées sur le prototype, on conclut que le mur en terre et le MCP permettent d'avoir un écart important de température entre l'extérieure et l'intérieure du prototype qui est d'environ 28 à 30 °C.

# **Conclusion générale**

Comme nous venons de présenter à travers les différents chapitres, l'objectif de cette étude est d'intégrer des matériaux à changement de phase dans les parois du bâtiment, d'évaluer leur impact sur le confort thermique en environnement naturel.

Notre travail comprend deux grandes parties. La première partie est dédiée à la recherche bibliographique sur les matériaux à changement de phase (MCP) et leur intégration dans le bâtiment. et la deuxième partie a été consacrée à trouver et à préparer le composite idéal (MCP/matrice/graphite expansé). Ensuite son application sur un dispositif à échelle réduite fabriqué en bois avec un mur Trombe a été faite.

L'analyse chimique des matériaux composites élaborés par FT-IR a montré une bonne compatibilité entre le MCP utilisé et les matrices minérales.

Il a été également noté que l'ajout du graphite expansé peut améliorer le problème de diffusion de chaleur dans les composites MCPs.

Après un tri effectué sur ces différents composites MCPs préparés, le choix est porté sur le composite MCP/ perlite expansée. En effet, le taux d'absorption de MCP par la perlite est plus important par rapport autres matrices (briques ou plâtres).

Dans ce travail, nous avons donc préparé un composite MCP (la graisse végétale) /Perlite expansée/ Graphite, afin de faire tester sa capacité à stocker la chaleur dans un prototype mur Trombe réalisé au sein de notre département.

Ce mur est constitué principalement d'un mur fabriqué en argile, et un vitrage pour créer l'effet de serre, et une plaque remplie de composite préparé.

L'objectif de ce travail est d'analyser et de comparer deux modèles avec et sans MCP.

Les résultats obtenus montrent qu'avec l'intégration de MCP dans le dispositif cela permet de réduire la température intérieure d'environ 28 à 30°C par rapport à la température extérieure de la plaque BA 13. Ces différences de températures sont essentiellement dues à la performance thermique de la plaque BA13 chargée d'un MCP et celle du mur en terre.

Les résultats de cette étude ont montré que le nouveau composite-MCP réalisé pourrait être un candidat potentiel pour la stabilisation de la température intérieure dans le bâtiment.

- [1] G. P. Henze, and M. Krarti, "Predictive Optimal Control of Active and Passive Building Thermal Storage Inventory," University of Nebraska, Lincoln, University of Colorado, Boulder, Vol, 68. (2003), 21-26.
- [2] M. Duquesne, "Résolution et réduction d'un modèle non linéaire de stockage D'énergie par adsorption sur des zéolithes", Université de bordeaux 2013.
- [3] I. DINCER, ROSEN, (2002).thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and Sons publishing company, New York, USA.
- [4] D. Verdier-Gorcias ; Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à Un récepteur solaire à air pressurisé ; thèse de doctorat, Université de Perpignan via Domitia, 2016. France.
- [5] H. Mehling et L .F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*, Springer - Verlag Berlin Heidelberg ed 2008
- [6] Matthieu Martinelli. Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur. Thermique [physics.class-ph]. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAI084. tel-01412771v3
- [7] S. GUICHARD. Contribution à l'Étude des Parois Complexes intégrant des Matériaux à Changement de Phase : Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale.
- [8] E. OroPrim, Thermal energy storage (TES) using phase change materials (MCP) for cold applications, Université de leida, 2013.
- [9] J. Borderon, Integration Des Materiaux A Changement De Phasecomme Systeme De Regulation Dynamiqueenrenovation Thermique. Thèse de doctorat Université Lyon 2012.france
- [10] A. MAHA et Al, thermal testing and numerical simulation of a prototype cell Using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, Energy and building, volume38, issue6. (2005)
- [11] M. K. Rathodet J. Banerjee, "Thermal stability of phase change materials used in Latent heat energy storage systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 18, pp. 246-258, Feb.2013
- [12] A. Sharma, V.V. Tyagi, C.R Chen, Buddhi, D., 2009. Review on thermal energy Storage with phase change materials and application. Renewable and sustainable Energy Reviews, p 318-345.

- [13] K. Pielichowska et K. Pielichowski, "Phase change materials for thermal energy Storage", *Progress in Materials Science*, vol. 65, no. 0, pp. 67-123, Aug.2014.
- [14] D. Feldman, D. Banu, and D. Hawes, "Low chain esters of stearic acid as phase change materials for thermal energy storage in buildings," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 36, no. 3, pp. 311–322, Mar. 1995
- [15] J. Gasia, A. Gutierrez, G. Peiro, L. Miro, M. Grageda, S. Ushak, et L. F. Cabeza, "Thermal performance evaluation of bischofite at pilot plant scale", *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 826-833, Oct.2015.
- [16] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, et D. Buddhi, "Review on thermal energy storage With phase change materials and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318-345, Feb.2009.
- [17] S. Wolfgang, ' phase Change Material Heat storage : New Materials and New Solar and Other Applications ', Graz University of technology, Institut of Thermal Engineering, IEA Task 32 substask C leader (PCM), 2004.
- [18] Sano I. Maena Y. Fujitani Y,' An Experimental Investigation on Ice-Nucleating Properties of Some Chemical Substances' 'J.Met.Soc.Japan, Vol.34, n°2,1956
- [19] Damien MATHIS. Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase bio sources. Université laval.canada.2019.
- [20] H. Mehling L .F. Cabeza, Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications, 2008.
- [21] M. Delgado, A. Lazaro, J. Mazo, et B. Zalba, "Review on phase change material Emulsions and microencapsulated phase change material slurries: Materials, heat Transfer studies and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 253-273, Jan.2012.
- [22] S. Jegadheeswaran et S. D. Pohekar, "Performance enhancement in latent heat thermal Storage system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2225-2244, 2009.
- [23] M.N. Hawlader., M.S. Uddin, H.J. Zhu,' Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Experiments and simulation ', *Int J Energy Res*; 26:159-71, 2002.
- [24] S. Ekomy Ango, Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment :

développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. Génie des procédés. Arts et Métiers Paris Tech, 2011. Français.

[25] A. SARRI « Etude du Stockage d'Energie Thermique par Matériaux à Changements de Phase dans le Sud-Est Algérien » thèse de doctorat. Université KASDI MERBAH Ouargla .2021.

[26] L. Karim, A. Bontemps, A. Grados, L. Royon. Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase (MCP) dans les planchers/plafonds de bâtiment à structure légère. Amélioration du confort thermique par intégration de Matériau à Changement de Phase (MCP) dans les planchers/plafonds de bâtiment à structure légère, Nov. 2013, Marrakech, Maroc.

[27] D. David, 'Etude Expérimentale de la Convection Naturelle aux Abords de Pairs Contenant des Matériaux à Changement de Phase', Thèse doctorale en Génie Civil, INSA de Lyon, 391 p., 2010.

[28] M. P. João, Q. Delgado, C. Joana Martinho Ana Vaz Sá • Ana S. Guimarães Vitor Abrantes. Thermal Energy Storage with Phase Change Materials. A Literature Review of Applications for Buildings Materials.

[29] K. Imessad et M. Belhamel. Evaluation des Performances d'un Mur Trombe. Revu. Energ. Ren. : Valorisation (1999) 195-198. Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger.

[30] <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/isolation-murs/mur-trombe>.

[31] Fiche technique de la perlite expansée, PERLINDUSTRIA. [info@perlindustria.com](mailto:info@perlindustria.com) / [www.perlitayvermiculita.com](http://www.perlitayvermiculita.com).

[32] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/>

[33] Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot. Troisième édition des matériaux, page 624- 625.

[34] R. HESSAS, A. HAMDI « Etude expérimentale d'un mur trombe avec intégration d'un matériau a changement de phase ». mémoire de fin d'études. Université mouloud Mammeri Tizi Ouzou.2020.

[35] [www.mediachimie.org](http://www.mediachimie.org)

## Résumé

Dans le contexte énergétique actuel, l'énergie solaire est l'alternative la plus intéressante et la plus avantageuse. En effet l'énergie solaire constitue une réponse pertinente dans ce secteur, soit pour la production d'électricité, de chaleur utile ou même la climatisation. L'une des solutions proposées est l'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) dans les parois du bâtiment. Les matériaux à changement de phase solide-liquide sont utilisés pour stocker de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Un MCP de type acide gras est utilisé avec comme température de fusion de l'ordre de 35 °C. Des composites à base d'acide gras sont préparés, une caractérisation physico-chimique de ces composites a été faite. Des mesures de la conductivité thermique ont été faites en utilisant le CT mètre. L'efficacité thermique du composite MCP élaboré a été testée expérimentalement sur un prototype expérimental réalisé à cet effet. Les résultats de cette recherche montrent que le nouveau matériau composite MCP convient aux applications dans le secteur du bâtiment.

**Mots clés :** Stockage d'énergie thermique / Matériaux à changement de phase / Propriétés thermiques / Matrices minérales / Matériaux composites.