

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



En vue de l'obtention du Diplôme Master
Option : Energétique

Thème :

***Optimisation d'un Echangeur de Chaleur
pour un Meilleur Confort***

Proposé et dirigé par :
I. BOUMRAR

Réalisé par :
AMEUR Amayes

Promotion : 2020-2021

Remerciements

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU de m'avoir accordé la

Puissance et la volonté de terminer ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur

Monsieur I. BOUMRAR enseignant à l'Université Mouloud

Mammeri de Tizi-Ouzou qui m'a permis et aidé à réaliser ce

mémoire ainsi que pour ses précieux conseils et sa disponibilité tout

le long de ce travail.

Je remercie les membres de jury d'avoir accepté de juger mon

travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes ces années de sacrifice.

Mes frères

Toute ma famille

Mes chers amis et amies, les étudiants de la Faculté du Génie de la Construction

Tous les étudiants de ma promotion

A. Amayas

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Introduction Générale..... 01

Chapitre I : Matériaux à Changement de Phase

I.1. *Introduction* : 3

I.2. Définition d'un matériau a changement de phase :..... 3

I.3. Le stockage de l'énergie thermique 4

I.3.1. Stockage de la chaleur sensible 4

I.3.2 Stockage de la chaleur latente 5

I.3.1. Stockage thermochimique..... 6

I.4. Type des MCP..... 7

4.1 *Les MCP organiques 7

4.2 *La paraffine : 7

4.3 * Les acides gras :..... 8

4.4 *MCP inorganiques 8

4.5 * Hydrates de sels :..... 8

4.6 *les métaux :..... 9

4.7 *Les MCP eutectiques 9

I.5. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage 10

I.5.1. La surfusion:..... 10

I.5.2. La ségrégation 10

I.5.3. La dilatation..... 11

I.6. Domaine d'utilisation des MCP 11

I.6.1. Le transport des produits alimentaires 11

I.6.2. L'industrie textile	12
I.6.3. Application aux bâtiments.....	12

Chapitre II : Utilisation des MCP dans le Bâtiment

II.1. Introduction :	14
II.2. Méthodes d'utilisation des MCP dans le bâtiment :	14
II.2.1. MCP intégré aux matériaux de construction :	14
II.2.1.1. Intégration directe:	14
II.2.1.2. Encapsulation avant intégration:	14
-Macro-encapsulation :	15
-Micro encapsulation :	16
II.2.2. MCP en tant que composant :	16
1. Dans les planchers :	16
2. Dans les plafonds :	17
3. Les Fenêtres avec MCP :	18
4. En panneaux intérieurs :	19
5. MCP intégrer aux murs extérieurs :	20
II.2.3. Les murs solaires :	20
II.2.3.1 Les murs solaires à effet de serre :	20
II.2.3.2. Mur de trombe :	21
II.2.3.2.1. Mur de trombe isolé :	22
II.2.3.2.2. Mur de trombe composite :	23
II.2.4. Mur de trombe intégrant des MCP:	24

Chapitre III : Réalisation Expérimentale

III.1. Introduction :	26
III.2. Prototype du mur capteur/stockeur :	26
III.2.1. Réalisation des structures en bois :	26

III.2.2. Réalisations des parois en béton armé :	27
III.3. Montage des parois.....	29
III.3. 1. Réalisation du mur stockeur.	29
III.4. Présentation des matériaux utilisés :	31
III.4.1. la graisse végétale :.....	31
III.4.2. Le graphite :.....	31
III.4.3. La perlite expansée :	32
III.4.4. Préparation des matériaux :	32
III.5. Méthode et instrumentation.....	34
III.5. 1. Les instruments de mesure :	34
III.5. 2. Étalonnages.....	34
III.5. 2. 1. Etalonnages des sondes.....	34
III.5. 2. 2. Etalonnage des deux modèles:.....	36
III.6. Conclusion.....	36

Chapitre IV :Analyse des Résultats

IV.1. Premier Essai.....	40
IV.2. Deuxième Essai.....	42
Conclusion Générale.....	46
Bibliographie	

Nomenclature

Liste des symboles :

Symboles	Signification	Unité
A	réactif solide ou liquide	
B	Produits de la réaction	
C	Produits de la réaction	
CP	la chaleur massique du matériau	J/(kg.K)
$C_{p,l}$	chaleur spécifique à l'état liquide	J. kg ⁻¹ . K ⁻¹
$C_{p,s}$	chaleur spécifique à l'état solide	J. kg ⁻¹ . K ⁻¹
Hr	humidité relative	%
L_f	la variation d'enthalpie lors du changement de phase	J.kg ⁻¹
L_s	la chaleur massique de changement d'état du matériau	J/kg
m	la masse	kg
$Q_{latente}$	la chaleur latente	J
$Q_{stockée}$	la chaleur sensible	J
T	La température	K
t	temps	s
T_{fusion}	Température de fusion	K
ΔT	la différence entre températures	K
ΔHr	Chaleur de réaction	J/mol
λ	Conductivité thermique	W.m ⁻¹ .K ⁻¹

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Exemple : l'eau.....	5
Figure I.2: Changement de phase solide/liquide	7
Figure I.3: Classification des matériaux à changement de phase (Sharma et al., 2009)[7].....	8
Figure I.4: Formule chimique des paraffines(a) n-paraffiné (b) iso-paraffiniques.	9
Figure I.5: Illustration du phénomène de surfusion (Kuznik et al., 2010)[19].....	11
Figure I.6: Ségrégation d'un sel hydraté [21].....	12
Figure I.7: Les applications Transport de produits alimentaires.	13

Chapitre II

Figure II.1: Exemple de MCP macro-encapsulés	15
Figure II.2: paraffine encapsulé.....	16
Figure II.3: Profilés plats pour une installation sous le plancher.....	17
Figure II.4: Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP.....	17
Figure II.5: Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP.....	18
Figure II.6 : Applications actives de systèmes de plafond amélioré par MCP.....	18
Figure II.7 : Panneau de gypse amélioré avec MCP	19
Figure II.8: Mur Capteur.....	21
Figure II.9: Mur de Trombe.....	22
Figure II.10: Mur de trombe isolé.....	23
Figure II.11: Mur solaire composite.	24
Figure II.12: Mur de trombe incorporant des MCP.....	25

Chapitre III

Figure III.1: photos qui montrent l'épaulement.	26
Figure III.2: la structure en bois.	27
Figure III.3: composition du béton.....	27

Figure III.4: moule en bois	28
Figure III.5: remplir les moules par le béton.....	29
Figure III.6: vue intérieur de la chambre.....	30
Figure III.7: réceptions en verre	30
Figure III.8: quadrillage en bois pour les conteneurs.....	31
Figure III.9: Graisse végétale 38-40°C.....	32
Figure III.10: la perlite expansée.....	33
Figure III.11: conteneur a MCP	33
Figure III.12: unité de stockage.....	34
Figure III.13: Photos des modèles finis.....	34
Figure III.14: Evolutions des températures des sondes et de thermomètre.....	36
Figure III.15: variation des températures ambiantes.....	38
Figure III.16: variation de la température à l'intérieur des modèles	38
Figure III.17: variation de l'humidité relative à l'intérieur des modèles	39
Figure III.18 : variations des températures ambiantes et intérieures des modèles	39

Chapitre IV

Figure IV.1: variations des températures a l'intérieur des modèles avec et sans MCP.....	41
Figure IV.2: Evolution des températures.	42
Figure IV.3: Evolution de la température à l'intérieur ambiante et intérieur du modèle avec MCP.	44
Figure IV.4: Evolution de la température à l'intérieur des modèles.....	44
Figure IV.5: Evolution de la température ambiante et à l'intérieur des modèles.....	45

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Résumé des avantages et inconvénients (Zalba et al.2003)..... 9

Chapitre III

Tableau III.1: représentation des températures enregistrées pour le premier test..... 35

Tableau III.2: Évolutions des températures (cas des deux modèles sans unité de stockage).. 36

Chapitre IV

Tableau IV.1: Evolutions des températures (cas avec mur à MCP) 40

TableauIV.2: Evolutions des températures (deuxièmes essais)..... 42

Introduction Générale

Au niveau mondial, 40 % de l'énergie consommée annuellement est utilisée dans le secteur du bâtiment, ce qui signifie que ce secteur prend une part de plus en plus importante, cette consommation d'énergie est responsable de l'émission d'un tiers des gaz à effet de serre.

Dans un contexte de diminution des ressources énergétiques non-renouvelables, d'inquiétude vis-à-vis du nucléaire et de ses dangers, et surtout du réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire de diminuer nos consommations énergétiques et de s'orienter vers d'autres sources d'énergies propres.

Aujourd'hui nous disposons de ressources en énergies renouvelables inépuisables et nous sommes capables de les exploiter de plus en plus efficacement, facilement et de façon propre. Par exemple, l'énergie envoyée par le soleil à la Terre annuellement représente l'équivalent de plus de 10 000 fois la consommation d'énergie mondiale actuelle sous toutes ses formes. Cependant, la conversion de ces énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie, ...) en énergies exploitables par les installations humaines (électricité, thermique notamment) a besoin d'être encore améliorée. En effet, les techniques d'extraction de la puissance de ces énergies doivent gagner en fiabilité, en compétitivité et en efficacité énergétique.

L'énergie solaire se présente comme l'une des plus prometteuses pour l'avenir. En effet, l'énergie thermique produite par voie solaire est une forme d'énergie très écologique sans émission de CO₂ et des gaz à effet de serre.

Un mur solaire stockeur a été développé afin de capter l'énergie provenant du rayonnement solaire, de la stocker et de la restituer à l'air neuf entrant. Le principe du mur solaire est connu depuis le 19^{ème} siècle. Il permet d'optimiser les apports solaires incidents à un mur par effet de serre en plaçant une vitre devant ce dernier. À ce mur solaire est associée une unité de stockage d'énergie latente. Depuis plus de 30 ans, le stockage latent dans le bâtiment par l'exploitation des **Matériaux à Changement de Phase (MCP)** est traité dans la littérature. Le stockage latent permet de développer des unités de stockage thermique (UST) compactes,

dans des plages de températures réduites. Ceci permet d'optimiser les performances du stockage et de la restitution de chaleur.

L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans les bâtiments en particulier au niveau de leurs murs fait l'objet depuis plus d'une dizaine d'années d'un intérêt croissant et d'un nombre important de travaux.

Notre travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude expérimentale du comportement thermique d'un mur Trombe intégrant un matériau à changement de phase.

Le travail est divisé en deux grandes parties : la première est la partie théorique, qui présente des généralités sur les matériaux à changement de phase, quelques notions sur le stockage thermique et la thermique du bâtiment. Quant à la deuxième partie, c'est une description de l'étude expérimentale répartie comme suit:

1. Réalisation expérimentale,
2. Méthode et instrumentation utilisée,
3. Résultats et discussion

Et on termine avec une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Matériaux à Changement de Phase

I.1. Introduction :

Dans le contexte actuel de la demande en énergie croissante, la dépendance aux énergies fossiles conduira à une crise énergétique dans un futur proche. Ce qui a motivée la communauté scientifique à tourner vers d'autres horizons, afin d'améliorer le confort thermique.

I.2. Définition d'un matériau à changement de phase :

On appelle matériau à changement de phase - ou MCP - tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Les MCP, sont des éléments de stockage de chaleur latente lors du processus de fusion et de sa restitution pendant la solidification en conservant une température constante [1, 2]. Ces matériaux possèdent une densité importante de stockage d'énergie et une capacité à maintenir une température constante tout en absorbant la chaleur pendant la fusion et en la restituant lors de la solidification [2]. Un MCP permet donc de stocker la chaleur du milieu lorsque la température ambiante dépasse la température de fusion et de libérer cette chaleur quand la température devient inférieure.

Dans le bâtiment, le stockage par chaleur latente offre un regain en raison de sa capacité à fournir une densité de stockage élevée. Ceci peut être réalisé en y incorporant des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en profitant de leur chaleur latente qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie. Les MCP ont trouvé des applications dans de nombreux domaines, y compris le stockage d'énergie solaire, l'efficacité énergétique du bâtiment, le refroidissement des produits alimentaires, l'emballage, le transport, les systèmes thermiques à vaisseaux spatiaux, les centrales solaires et les équipements électroniques [3-4].



Figure I.1: Exemple : l'eau.

I.3. Le stockage de l'énergie thermique

Le stockage d'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.

On distingue trois types de stockage de l'énergie thermique :

I.3.1. Stockage de la chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible s'effectue par variation de la température d'un matériau solide ou liquide sans changement de phase. L'énergie stockée dépend de la masse et de la chaleur spécifique du matériau, ainsi que l'écart entre sa température initiale et finale. L'expression de la chaleur sensible pouvant être stockée découle du premier principe de la thermodynamique :

$$Q_{\text{stockée}} = m C_p \Delta T$$

Avec $Q_{\text{stockée}}$, la chaleur sensible (J), m , la masse du matériau de stockage (kg), C_p , la chaleur massique du matériau ($J.kg^{-1}K^{-1}$), ΔT , la différence entre températures moyennes finale et initiale (K).

Ce mode de stockage est le plus ancien et le plus facile à évaluer, cependant, il peut présenter un certain nombre d'inconvénients, notamment la gamme de températures de fonctionnement pouvant être limitée, les pertes thermiques de stockage et la nécessité de systèmes volumineux étant donné que la quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle au volume du système.

Les critères de choix des matériaux pour le stockage par chaleur sensible sont les suivants :

- Chaleur spécifique élevée,
- Stabilité à long terme avec cycles thermiques
- Compatibilité avec son contenant
- Faible coût.

I.3.2 Stockage de la chaleur latente

Le principe de fonctionnement repose sur l'absorption où la libération de la chaleur latente pendant la transformation de phase du solide au liquide ou vice versa. Sur la base du processus de transformation de phase, la capacité de stockage par chaleur latente est obtenue grâce à une transformation en phase solide-solide, solide-liquide, gaz-solide et liquide-gaz [5-6].

Le stockage d'énergie par chaleur latente s'exprime alors :

$$Q_{\text{latente}} = m L_s$$

Avec : m , la masse du matériau de stockage (kg).

L_s la chaleur massique de changement d'état du matériau ($J.kg^{-1}$).

L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état.

La figure III-3 ci-après montre la relation entre la température et l'enthalpie lors d'un changement de phase solide/liquide. La chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans le processus thermique.

La chaleur stockée dans ce cas est donnée par :

$$Q = m \cdot C_{p,s} \cdot (T_f - T_1) + m \cdot L_f(T_f) + m \cdot C_{p,l} \cdot (T_2 - T_f)$$

Dans cette équation, le premier terme correspond à la chaleur sensible stockée à l'état solide.

Le terme $L_f(T_f)$ correspond à la variation d'enthalpie lors du changement de phase [$J.kg^{-1}$] et, enfin, le dernier terme désigne la chaleur sensible stockée à l'état liquide.

Dans cette expression, nous avons adopté les notations suivantes :

$C_{p,l}$: la capacité thermique massique (chaleur spécifique) à l'état liquide [$J. kg^{-1}. K^{-1}$]

$C_{p,s}$: la capacité thermique massique (chaleur spécifique) à l'état solide [$J. kg^{-1}. K^{-1}$]

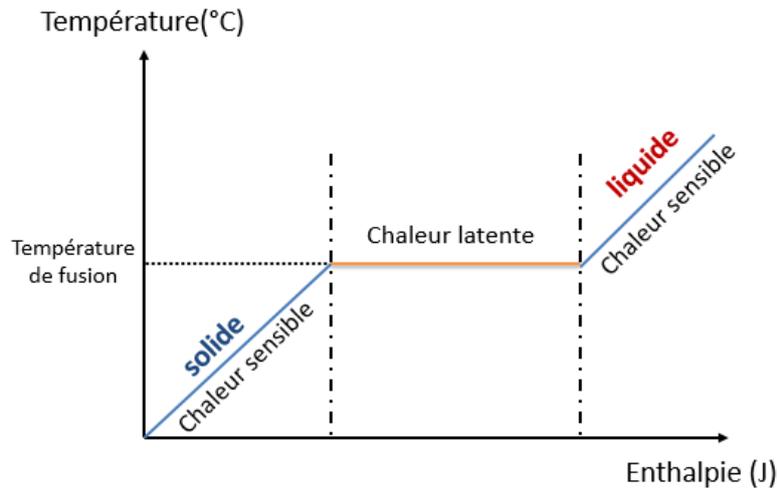
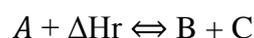


Figure I.2: Changement de phase solide/liquide

L'énergie stockée par chaleur latente est beaucoup plus importante que celle du stockage par chaleur sensible. Par exemple, l'enthalpie de fusion de 1 kg de glace (passage de 1°C à 0°C) est de l'ordre de 336 kJ. Cette énergie est 80 fois plus élevée que l'énergie fournie à 1kg d'eau pour élever sa température de 1°C.

I.3.1. Stockage thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout où partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu.



Avec

A : réactif solide ou liquide

ΔH_r : Chaleur de réaction en J/mol

B et C : Produits sous forme gaz, liquide ou solide

Une condition pour que le stockage ait une taille suffisamment petite est que les réactifs soient plutôt solides ou liquides. Les produits obtenus peuvent être indépendamment des gaz, liquides ou solides. Lorsque la réaction se fait avec un gaz, le système de stockage peut se présenter sous la forme d'un réacteur à lit fluidisé. Par ailleurs, dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés pour être utilisés ultérieurement et ce système est propice au stockage inter-saisonnier.

I.4. Type des MCP

Les matériaux à changement de phase se répartissent, généralement, en trois catégories comme l'illustre la figure I-3. Les composés organiques, inorganiques et eutectiques. Les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques.

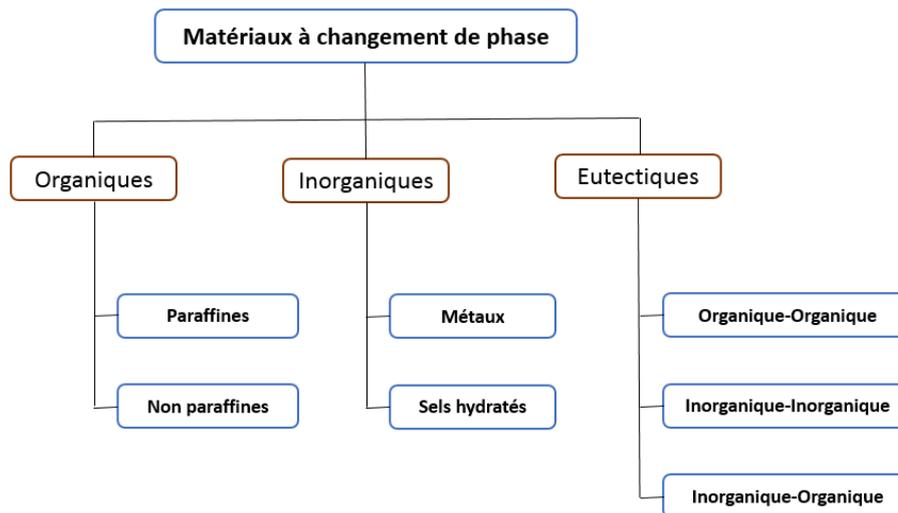


Figure I.3: Classification des matériaux à changement de phase (Sharma et al., 2009)[7]

Les MCP organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre.

***La paraffine :**

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes composées de chaînes de **-n-** atomes de carbone auxquels sont attachés $2n+2$ atomes d'hydrogène (C_nH_{2n+2}). Elles sont soit fabriquées à partir du pétrole brut ou soit synthétisées à l'aide du procédé Fischer-Tropsch. Les molécules de ces hydrocarbures saturées peuvent se présenter soit sous la forme de chaînes rectilignes (hydrocarbures n-paraffinées) soit en plusieurs branches (hydrocarbures iso-paraffinées) (figure I.4) [7].

La paraffine la plus simple est le méthane (CH_4). Sa température d'ébullition est très basse : -162°C. C'est le constituant principal du gaz naturel [8].

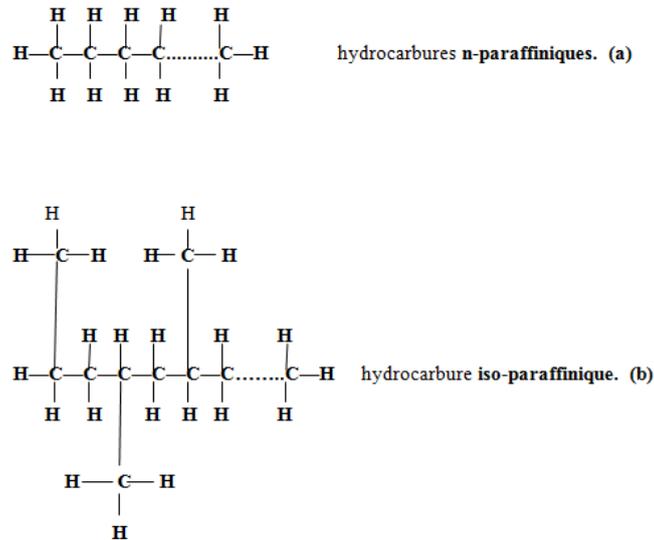


Figure I.4: Formule chimique des paraffines(a) n-paraffiné (b) iso-paraffiniques.

* Les acides gras :

Les acides gras ont une formule générale de $(\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_n \text{COOH})$, ils proviennent de sources animales et végétales ; et sont qualifiés comme non polluants [9]. Ils sont des MCP prometteurs qui sont attractifs pour diverses architectures du bâtiment éco énergétique. Ils ont de nombreuses caractéristiques souhaitables, y compris une forte densité de stockage d'énergie.

Les propriétés thermiques des acides gras lors de changement de phase sont très étudiées par plusieurs auteurs [9-10]. Les températures de fusion des acides gras varient entre 5 et 70 °C et celle de la chaleur latente de 45 à 210 kJ / kg [11].

MCP inorganiques

Les MCP inorganiques couvrent un intervalle de température étendu. Bien qu'ils contiennent une chaleur latente similaire, par unité de masse que celle des MCP organiques, mais leur densité élevée et à l'origine de leur grande capacité de chaleur latente par unité volumétrique [12].

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels et les métaux.

* Hydrates de sels :

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est $\text{AB} \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Pendant la charge, la déshydratation du sel a lieu. Le produit de cette

déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins molécules d'eau. Les hydrates de sel sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente ($\approx 100-300$ kJ/kg), une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 8-100$ °C) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité [13].

***les métaux :**

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP, notamment J. P. Kotzé *et al.* [14] ou encore H. Ge *et al.* [15]. On peut citer notamment le Potassium ($T_{\text{fusion}} = 63.2$ °C), le $\text{Bi}_{58}\text{Sn}_{42}$ ($T_{\text{fusion}} = 138$ °C) ou encore le Lithium ($T_{\text{fusion}} = 186$ °C) [15]. Les avantages que présentent les métaux sont leur conductivité thermique bien plus grande que les autres types de MCP, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à long terme.

Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse [16].

Tableau I.1 : Résumé des avantages et inconvénients (Zalba *et al.* 2003) [17]

	Organiques	Inorganiques
Avantages	Non corrosif Pas ou peu de surfusion Bonne stabilité chimique et thermique	Grande chaleur latente
Inconvénients	Chaleur latente moindre Faible conductivité thermique Haute inflammabilité	Surfusion Corrosif Séparation de phase Ségrégation de phase et instabilité thermique

Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques. Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [18].

I.5. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

I.5.1. La surfusion:

Pour certains MCP tels que les sels hydratés, la solidification s'amorce à une température inférieure à la température de solidification. Le MCP atteint donc ainsi une température inférieure à la température de solidification sans que celle-ci soit amorcée, puis remonte à la température de solidification (sans apport d'énergie thermique externe). La Figure 5 illustre ce phénomène.

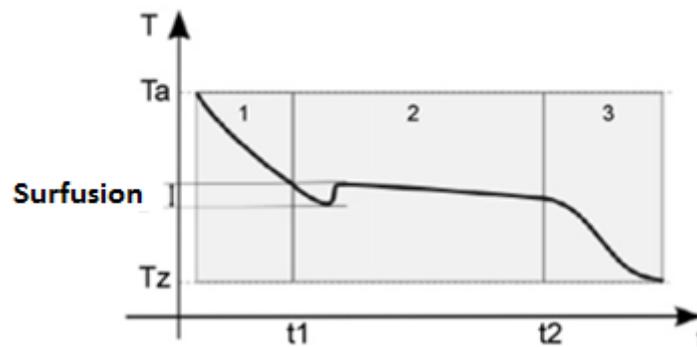


Figure I.5: Illustration du phénomène de surfusion (Kuznik et al., 2010) [19]

I.5.2. La ségrégation

Ce phénomène concerne les sels hydratés. La fusion est congruente ce qui induit l'apparition de cristaux dit « inférieurs ». La conséquence directe est la dégradation des propriétés thermiques et des performances de stockage suite à des cycles répétés de fusion et de solidification [20].



Figure I.6: Ségrégation d'un sel hydraté [21].

I.5.3. La dilatation

Certains MCP, telles que les paraffines, présentent une différence de densité élevée entre la phase solide et la phase liquide. Ce phénomène de dilatation doit être pris en compte lors du dimensionnement de la structure d'accueil du MCP.

I.5.4. Le cycle de vie thermique

Il s'agit du nombre de cycles fusion/solidification au bout duquel les performances thermiques du MCP se dégradent. Les paraffines ont des cycles de vie thermique élevés [22]. La plupart des MCP commercialisés et pouvant être utilisés dans le bâtiment ont une durée de vie comprise entre 3000 et 10000 cycles thermiques.

I.6. Domaine d'utilisation des MCP

I.6.1. Le transport des produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent

principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver [23].



Figure I.7: Les applications Transport de produits alimentaires.

I.6.2. L'industrie textile

Les matériaux à changement de phase peuvent être appliqués dans des nombreux domaines d'application de l'industrie qui sont appropriés pour optimiser le confort thermo physiologique de vêtements, de couil à matelas, de sacs de couchage.

Il devient alors particulièrement important de trouver des matériaux dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain [24].

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications sont généralement des paraffines qui ont une température moyenne de 30-34°C, ce qui devient très confortable pour le corps humain.

I.6.3. Application aux bâtiments

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) en vue du stockage de chaleur dans les bâtiments a été l'une des premières applications pour ces matériaux. Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les MCP sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb [25]. Actuellement, la majorité des études concernant les matériaux à changement de phase (MCP) sont orientés vers :

- _ Leur utilisation, lorsqu'ils sont intégrés à l'enveloppe du bâtiment, pour des applications de chauffage.
- _ Leur intégration à l'enveloppe de bâtiments à faible inertie thermique dans le but d'améliorer le confort d'été.

L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes [26].

- 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.

L'intégration de matériau à changement de phase (MCP) dans l'enveloppe d'un bâtiment constitué une solution pour améliorer la performance thermique de celui-ci, notamment en termes de confort d'été.

Chapitre II

Utilisation des MCP dans le Bâtiment

II.1. Introduction :

Les bâtiments ont besoin d'une attention particulière pour réduire la consommation énergétique mondiale et les émissions de gaz à effet de serre. L'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans les techniques de construction de bâtiments est une solution prometteuse pour l'avenir. De ce fait, ces matériaux font l'objet de très nombreuses recherches afin d'étudier et exploiter leurs propriétés pour une meilleure contribution à l'optimisation des performances énergétiques.

L'utilisation des MCP peut être élaborée de manière passive ou active. La technique dite passive consiste à intégrer le matériau à changement de phase dans les éléments constitutifs de l'enveloppe du bâtiment (murs, toitures, planchers, fenêtres,...). Pour le système passif, l'objectif recherché est d'offrir un confort thermique avec une exploitation minimale d'énergie CVC [27-28]. Dans le cas de la deuxième technique, le stockage se fait à l'aide d'un fluide caloporteur mis en mouvement par un système mécanique (pompe ou ventilateur, ...).

II.2. Méthodes d'utilisation des MCP dans le bâtiment :

Certains auteurs [29,30] ont classé les applications de systèmes passifs de l'enveloppe du bâtiment en deux catégories principales :

II.2.1. MCP intégré aux matériaux de construction :

II.2.1.1. Intégration directe:

Les MCP sont incorporés directement à un matériau de construction tel que le plâtre, le béton, ou la brique. Cette méthode d'intégration doit se conformer au besoin de l'application. Par ailleurs, afin d'assurer le bon fonctionnement et la durabilité du système et afin d'éviter d'éventuel problème de corrosion ou de fuite du MCP, la nature de ce dernier doit être adaptée.

II.2.1.2. Encapsulation avant intégration:

Afin d'assurer le bon fonctionnement du système les MCP sont soit en micro encapsulation, soit en macro encapsulation. Ces derniers sont intégrés soit dans les matériaux de construction, soit dans les échangeurs de chaleur.

-Macro-encapsulation :

La macro-encapsulation consiste à encapsuler le matériau à changement de phase dans des tubes, sachets, de sphères ou de panneaux. Ces conteneurs doivent être fabriqués avec des matériaux de bonnes conductivités et assez rigides pour limiter les risques de fuite du MCP, tels que l'aluminium, le cuivre, etc. La macro-encapsulation offre l'avantage de limiter les risques de fuite.

**Capsules en métal****Capsules sphériques****Plaques en aluminium****Conteneurs en plastique****Capsules cylindriques****Sacs en plastique ou aluminium****Figure II.1:** Exemple de MCP macro-encapsulés

-Micro encapsulation :

La micro-encapsulation consiste à encapsuler le matériau dans des sphères ou des capsules de diamètre allant de 1 μm à 1000 μm (Waqas et Din, 2013) [31]. Les particules peuvent être incorporées aux matériaux de construction. La technique d'encapsulation permet d'éviter la fuite du matériau à changement de phase lors de la fusion, et ainsi toute interaction avec les autres matériaux de construction.

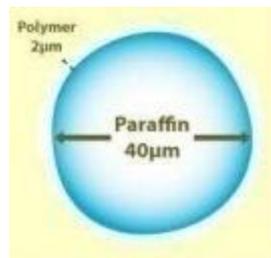


Figure II.2: paraffine encapsulé.

II.2.2. MCP en tant que composant :

Cette méthode consiste à ajouter des composants fabriqués à base des MCP tel que panneaux muraux, les plafonds suspendus et les stores avec MCP [32].

1. Dans les planchers :

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.

Dans le cas d'absence du soleil la couche contenant du matériau à changement de phase peut être insérée entre le plancher chauffant et la pièce. Le MCP stocke, pendant la période creuse, de la chaleur apportée par le chauffage au sol, et la restitue durant la journée.



Figure II.3: Profilés plats pour une installation sous le plancher

2. Dans les plafonds :

Des MCP peuvent également être intégrés dans les plafonds de manière passive naturelle (figure II.4).

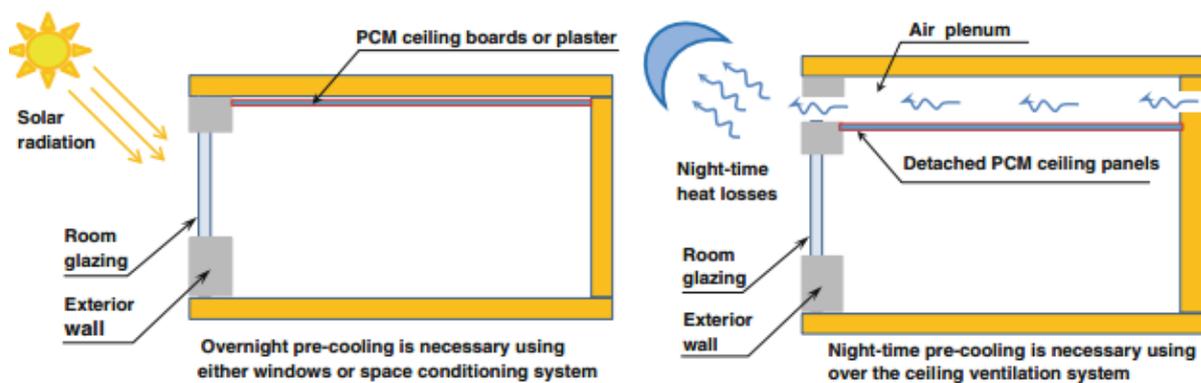


Figure II.4: Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP

Dans ce cas, les MCP peuvent par exemple être macro-encapsulés puis placés au-dessus du gypse ou dans un faux-plafond, comme présenté en figure 5.



Figure II.5: Applications passives de systèmes de plafond amélioré par MCP

Soit à l'aide d'un système actif par l'intermédiaire de systèmes de conditionnement d'air dynamique plus complexe à savoir les systèmes hydrauliques, les échangeurs de chaleur à micro-tubes et les canaux d'air (figure.6).

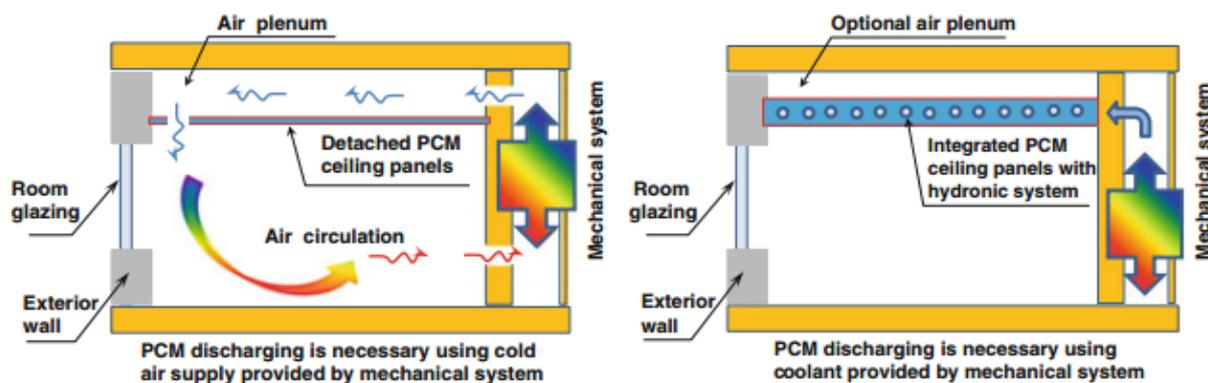


Figure II.6 : Applications actives de systèmes de plafond amélioré par MCP

3. Les Fenêtres avec MCP :

La plupart des études et des applications ont porté sur la partie "opaque" de l'enveloppe du bâtiment, tels que les murs, les plafonds et les planchers. Cependant, on devrait s'intéresser

encore à la partie « transparente », c'est-à-dire les vitrages de fenêtre. A partir de l'utilisation de l'énergie de la perspective thermique, les fenêtres et les vitrages ne représentent qu'un faible lien entre les conditions internes et externes dans le bâtiment (une résistance thermique beaucoup plus faible que les autres parties des enveloppes). Dans les climats froids, les fenêtres sont responsables de pertes importantes de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. Par contre dans les climats chauds, la chaleur expressive qui pénètre à travers les vitrages exige une consommation d'énergie considérable pour le refroidissement. Par conséquent afin de maintenir un ratio élevé de vitrage aux zones opaques, ces types d'enveloppes externes devraient être en mesure de changer leurs propriétés thermiques et optiques et de fournir la meilleure réponse possible aux différentes conditions extérieures. Également les gains solaires, qui doivent être bloqués pour pénétrer dans le bâtiment à travers les enveloppes transparentes pendant les journées d'été, devraient être maximisés en hiver.

4. En panneaux intérieurs :

Les murs sont très adaptés à l'incorporation de MCP, en raison de leur faible coût et de leur utilisation répandue dans les bâtiments. Les MCP dans les murs, peuvent être intégrés sous forme de panneaux muraux. Cette méthode consiste à installer le panneau de MCP comme une ou plusieurs couches qui appartient au mur (figure 6). Dans ce cas, le MCP est considéré uniquement comme un panneau mural au lieu d'un mur principal et donc il peut être appliqué comme faisant partie du travail de décoration intérieure après la construction des enveloppes du bâtiment. L'avantage présenté par cette solution réside dans son efficacité par l'utilisation de certains panneaux produits en séries par des entreprises tels que les panneaux de gypse avec MCP et également le coût global réduit pour son application [33] (figure 7).



Figure II.7 Panneau de gypse amélioré avec MCP

5. MCP intégré aux murs extérieurs :

Des matériaux à changement de phase peuvent également être intégrés directement dans les cavités murales d'un bâtiment. Pour ce faire, les MCP sont généralement conditionnés en sachets. Il est également possible d'ajouter des MCP micro-encapsulés directement dans de la cellulose (Kośny, 2007)[34]. Cette façon d'intégrer des MCP permet en climat chaud d'éviter la surchauffe ; l'utilisation d'un climatiseur est réduite. Zhang et Medina ont développé en 2005 une ossature bois qui intégrait des MCP paraffinés permettant une réduction du pic maximal de chaleur dans le mur de 38 % (Zhang et al., 2005) [35]. Il convient de réaliser que ce type de système peut modifier les échanges d'humidité dans le bâtiment, tant il constitue une barrière étanche permettant de protéger le MCP (Kosny et al., 2008) [36].

II.2.3. Les murs solaires :

Le principe des murs solaires est de recueillir l'énergie solaire incidente à leur surface et de la restituer à l'intérieur du bâtiment. Il existe différents types de murs capteurs que l'on peut regrouper en deux catégories :

II.2.3.1 Les murs solaires à effet de serre :

Les unités de verre sont placées en face d'un mur de béton (Figure 8) pour recueillir le rayonnement solaire par l'effet de serre. Capturé par conduction à travers la paroi, puis par convection et rayonnement locale. En supposant que l'épaisseur du mur de béton soit

d'environ 40 cm, le transfert d'énergie atteindra 11 heures, ce qui indique que la pièce est chauffée en l'absence de soleil, afin de réduire les pertes et d'améliorer l'absorption de chaleur capturée pendant la journée. Assombrissez la surface du mur de stockage ou placez un double vitrage [37].

Ce mur est appelé le mur Trombe-Michel. Il est souvent considéré comme le premier mur solaire. Il a été conçu par le professeur Trombe et l'architecte Michel. En réalité la paternité du principe revient à Edward Morse, qui breveta le concept dès 1881.

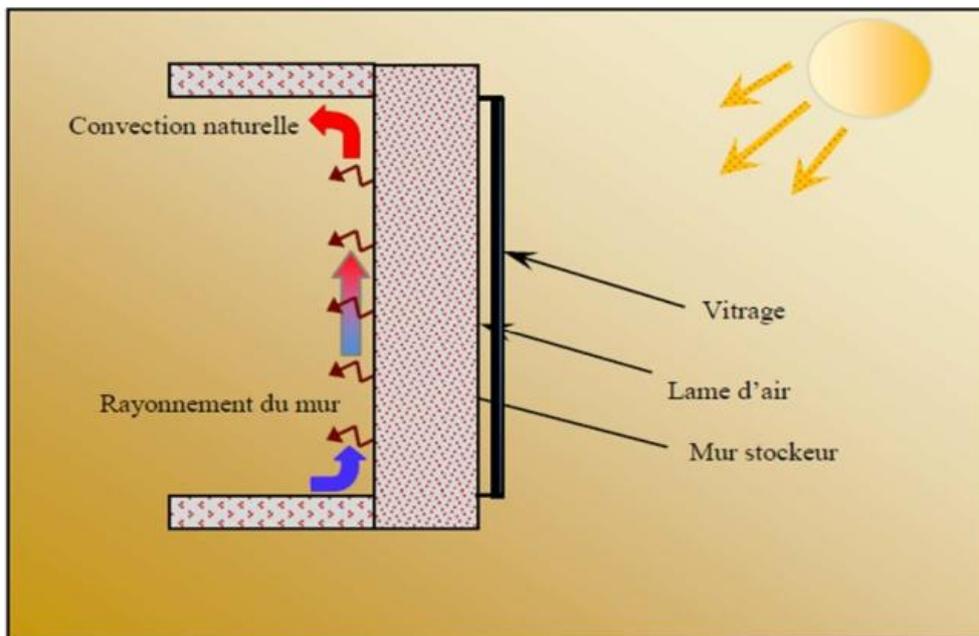


Figure II.8: Mur Capteur

II.2.3.2. Mur de trombe :

Le mur de trombe (figure 9) est une solution qui permet de réduire les besoins de chauffage. Il est constitué d'un vitrage suivi d'une lame d'air et d'un mur en béton.

Dans un mur trombe l'air peut circuler par convection naturelle dans la lame d'air via des ouvertures localisées en partie haute et basse du mur. Cela permet de transmettre immédiatement à l'intérieur du bâtiment une partie des apports solaires. Ceci est possible tant que la température de l'air intérieur est inférieure à celle de la lame d'air. Par ailleurs, on conserve une restitution de chaleur retardée due au transfert de chaleur par conduction à travers la masse thermique. Un clapet peut être installé au niveau des ouvertures afin de

neutraliser, si besoin, la circulation d'air dans la lame d'air. On retrouve le problème d'absence d'isolant du mur solaire non ventilé, et à cela s'ajoute la transmission lumineuse par les ouvertures qui peut être un inconvénient pour certaines pièces (les chambres par exemple).

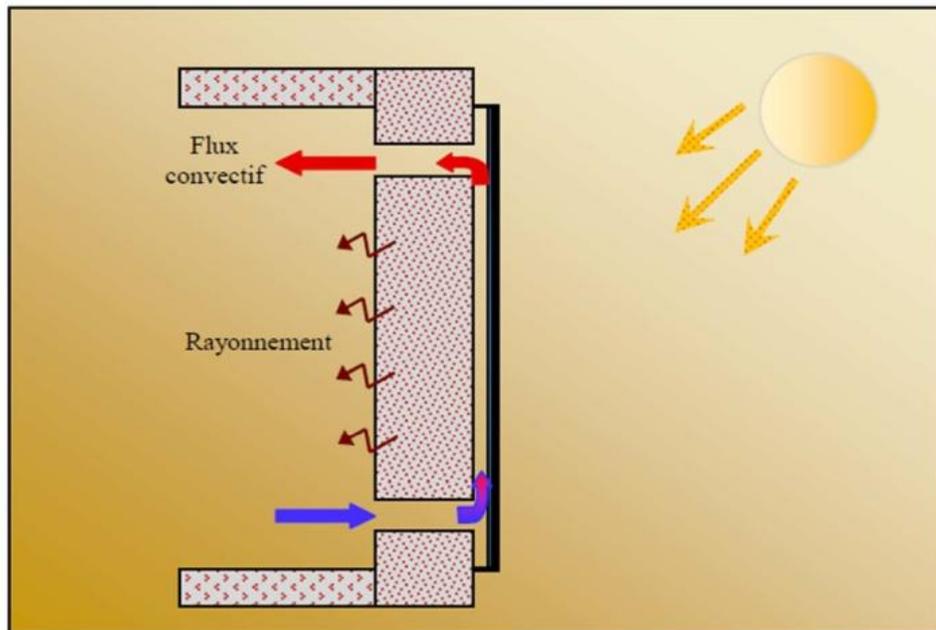


Figure II.9: Mur de Trombe.

Pour les murs de trombe, le chauffage est réalisé par deux manières distinctes : par rayonnement, grâce au déphasage du mur, et par convection grâce à la circulation d'air à l'intérieur de la lame.

La surface totale des ouvertures supérieur et inférieur doit représenter 3% de la surface totale du mur.

II.2.3.2.1. Mur de trombe isolé :

Ce mur est identique au mur de Trombe hormis que la pose d'isolant réduit les pertes nocturnes éventuelles. De plus l'isolant favorise la restitution de l'énergie captée par le vecteur air.

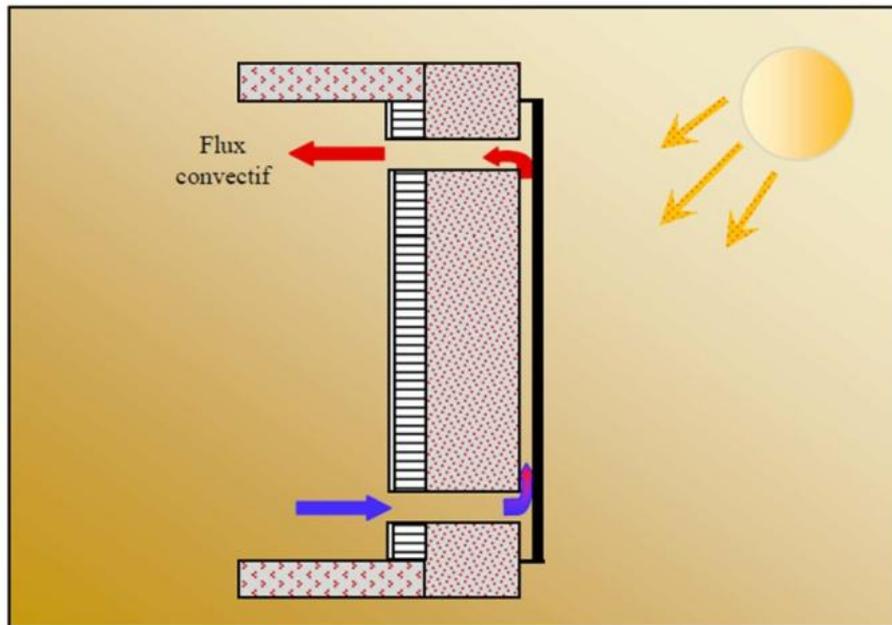


Figure II.10: Mur de trombe isolé.

II.2.3.2.2. Mur de trombe composite :

Le mur solaire composite est une combinaison du mur trombe isolé et du mur solaire non ventilé. Les apports solaires sont dans un premier temps restitués avec un certain délai, le temps que le flux traverse la masse thermique, puis ils sont récupérés par l'air circulant dans une lame d'air située entre la masse thermique et l'isolant. L'avantage est de retarder les apports par le mur solaire par rapports aux apports directs transmis par les vitres du bâtiment. Sa conception permet d'éviter l'apport d'air froid (par rapport au mur trombe et au mur trombe isolé), et la pénétration de lumière.

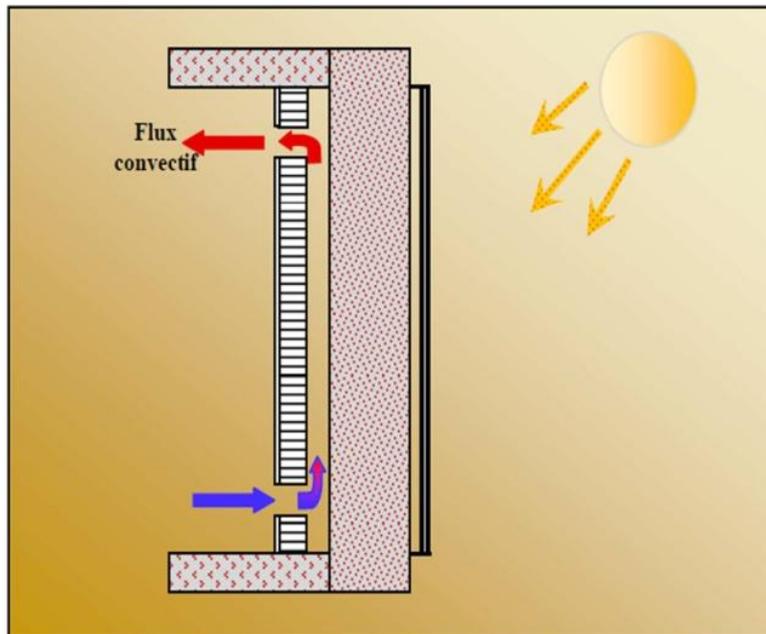


Figure II.11: Mur solaire composite.

II.2.4. Mur de trombe intégrant des MCP:

Le mur trombe à base de MCP est constitué d'un mur en béton intégrant des matériaux à changements de phase soit micro ou macro encapsulés (Figure 12). Ces matériaux de construction permettent un phénomène de production de changement de phase, assurent une gestion active de la température, et maintiennent la température de l'air dans les locaux à une valeur constante pendant la durée de changement de phase (point de fusion).

L'avantage de ces produits consiste dans le fait qu'une faible quantité (volume et poids) est suffisante pour conférer aux matériaux un pouvoir de stockage / déstockage de la chaleur élevé.

L'objectif de cette intégration des MCP est d'augmenter l'inertie et d'avoir le meilleur rendement thermique de ce type des murs. Différents MC Pont été expérimentés, Askew(1978) a utilisé de la cire paraffine [38]. Ces travaux ont affiné que les murs trombe intégrant des matériaux à changements de phase nécessitent moins d'espace entre le sont plus légers que les murs trombe traditionnels. Des différents essais sur des blocs de béton-MCP fabriqués de manière ordinaire et en utilisant le paraffine comme MCP, ont montré que le rendement thermique de ces dernières a la capacité de stockage d'énergie plus importantes que les autres MCP expérimentés.

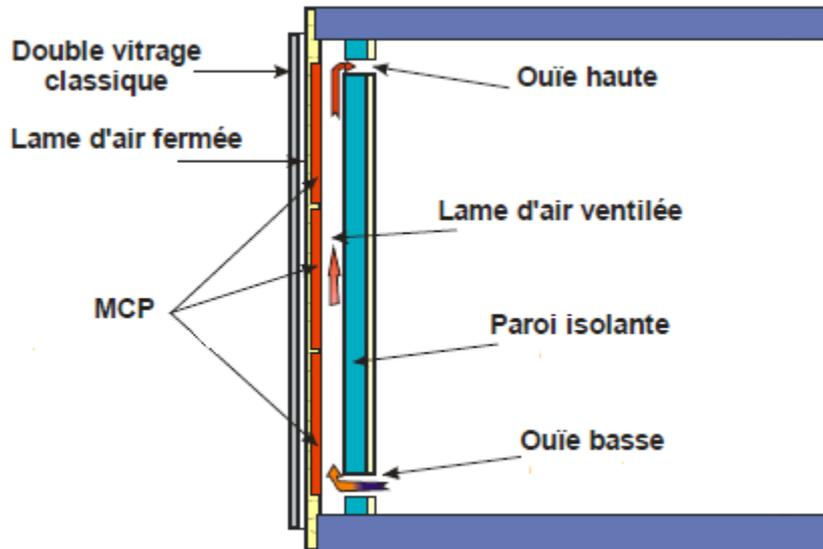


Figure II.12: Mur de trombe incorporant des MCP.

Chapitre III

Réalisation Expérimentale

III.1. Introduction :

Une étude expérimentale comparative sera menée sur deux prototypes, à échelle réduite, pour se faire, deux modèles de chambres à échelle réduites ont été construites au pavillon de Génie Mécanique. La première chambre modèle a un mur constitué uniquement d'un vitrage et les autres parois sont construites avec du béton. La deuxième chambre modèle contient un mur sombre à base d'un MCP, orienté plein sud auquel on colle un vitrage. Une étude comparative des performances thermiques de ces deux modèles sera présentée dans le présent chapitre.

III.2. Prototype du mur capteur/stockeur :

Selon le principe de fonctionnement des murs solaires, notre prototype de mur capteur/stockeur capte l'énergie solaire par effet de serre. Celle-ci est stockée dans un MCP et enfin restituée à l'air pendant la soirée. Le mur capteur/stockeur est composé d'une partie captatrice, siège de l'effet de serre permettant d'accroître les apports solaires par rapport à un mur classique, d'un élément de stockage qui assure le stockage d'énergie et permet la restitution à l'air entrant ou circulant.

III.2.1. Réalisation des structures en bois :

*On découpe les chevrons d'épaisseur de 5cm à l'aide d'une tronçonneuse, en 16 bouts de 60 cm pour les deux plates formes et les toits, et 8 bouts de 50 cm pour les parois extérieurs.

* On a réalisé un épaulement de 4cm x 2cm le long des bouts de chevrons.



Figure III.1: photos qui montrent l'épaulement.

*Pour assembler les deux structures extérieures on utilise des supports métalliques et des vis.



Figure III.2: la structure en bois.

III.2.2. Réalisations des parois en béton armé :

1sac de ciment, gravier, sable et l'eau.



Figure III.3: composition du béton.

On prépare 4 moules en bois (0.6m x 0.6m) pour réaliser 2 plate forme et 2 toit.

On place un grillage de trie a souder.

On remplit le moule avec du béton.

Il faut laisser le béton quelques jours pour bien sécher.



Figure III.4: moule en bois



Figure III.5: remplir les moules par le béton.

(60 cm x 60cm) pour réaliser les deux plates formes et dalles.

(60 cm x 50 cm) pour les parois extérieurs.

III.3. Montage des parois

Après que le béton sèche, on monte les parois en béton sur la structure en bois.

On a utilisé un ciment prompt pour fermer les joints et minimiser les ponts thermiques.



Figure III.6: vue intérieure de la chambre.

III.3. 1. Réalisation du mur stockeur.

Nous avons optée pour des conteneurs en verre pour la macro encapsulation du matériau a changement de phase, est ceci pour éviter toutes infiltration lors de processus de fusion. Pour cela on coupe des morceaux de verre d'épaisseur 0.005 m et on les colle.

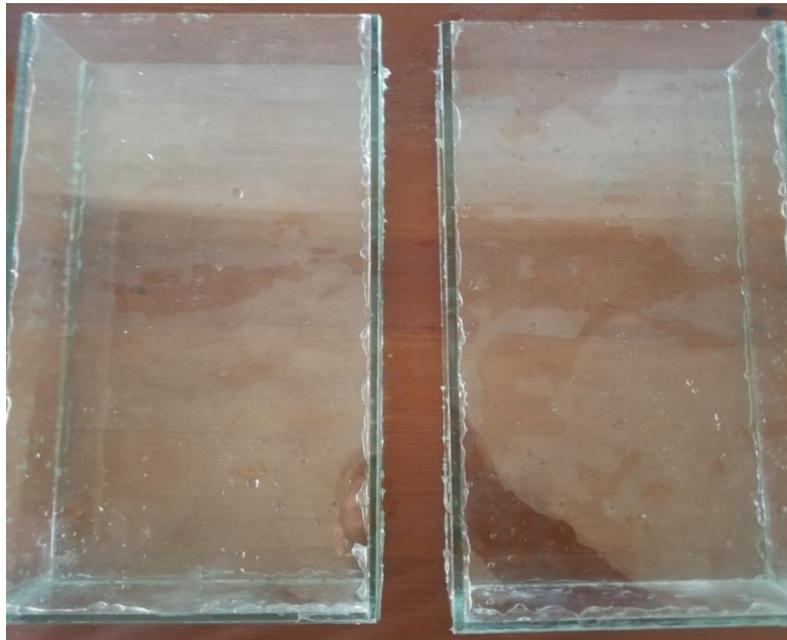


Figure III.7: récepteurs en verre

On coupe des planches (2x0.54m; 2x0.46m) qu'on assemble pour avoir une forme rectangulaire. On coupe 4 planches de 0.05m et deux planches de 0.1m pour réaliser les deux ouvertures supérieures et inférieure de mur,



Figure III.8: Quadrillage en bois pour les conteneurs.

III.4. Présentation des matériaux utilisés :

III.4.1. la graisse végétale :

Les graisses végétales sont des matières solides à températures ambiantes, elles ont pour rôle le stockage de l'énergie lors du processus de fusion. C'est un composant naturel présent dans de nombreux aliments et elle constitue une part essentielle de notre alimentation. Elles sont considérées comme des MCP, Nous voulons exploiter cette caractéristique dans le stockage de chaleur dans le bâtiment.

Les graisses végétales possèdent une faible conductivité thermique d'ordre de $0,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Ceci nous amène à conclure que les taux d'absorption ou de libération de la chaleur tout au long du MCP sont réduits, ainsi la diminution de l'efficacité du MCP. Pour cela nous avons opté pour le graphite pour améliorer leur conductivité thermique.



Figure III.9: Graisse végétale 38-40°C

III.4.2. Le graphite :

C'est un matériau connu pour avoir une conductivité thermique élevée autour de la température ambiante qui varie de 24 à 470 W. m⁻¹. K⁻¹ et son taux d'absorption élevé.

Le graphite est plus lourd que la graisse végétale en termes de densité, ce qui signifie que le graphite se sépare et reste au fond de conteneur, pour remédier à ce problème nous avons utilisé la perlite expansé pour avoir un mélange homogène et minimiser les fuites (forme stabilisée).

III.4.3. La perlite expansée :

La perlite est un matériau d'aspect granuleux ou poudreux, de couleur blanche. c'est un sable siliceux d'origine volcanique contenant un faible pourcentage en eau, qui est une fois expansé se présente sous forme de microbilles blanches plus ou moins petites, aérées et très légères.



Figure III.10: la perlite expansée

III.4.4. Préparation des matériaux :

- En premier, nous avons séché et broyé la perlite.
- Ensuite, nous avons procédé au tamisage du graphite et la perlite.
- Mélange des composants poudreux (perlite, graphite) au préalable.
- Nous avons fait fondre le MCP au bain marie, une fois le MCP est à l'état liquide on a effectué l'ajout des poudres puis malaxé le mélange final afin d'obtenir une meilleure homogénéité.
- En fin, nous avons versé le composite dans les conteneurs.



Figure III.11: conteneur a MCP.

-Mise en place des récepteurs sur le quadrillage dimensionné selon les réceptions et le mur.
Fait avec des planches en bois.



Figure III.12: unité de stockage.

-Insertion du quadrillage à l'intérieur du prototype.



Figure III.13: Photos des modèles finis

III.5. Méthode et instrumentation

Après avoir finalisé la réalisation des deux prototypes, exposés dans la partie précédente. Nous avons procédé aux mesures de températures faites sur trois étapes.

- étape 1 : étalonnage des deux instruments à l'aide d'un thermomètre à mercure fiable.
- étape 2 : comparaison des deux modèles sans unité de stockage.
- étape 3 : mesurer les températures interne des deux chambres.

III.5. 1. Les instruments de mesure :

Il s'agit de mesurer l'évolution des températures internes des deux prototypes, à l'aide des thermocouples introduit à l'intérieur par deux ouvertures sur le toit. L'enregistrement des températures se fait manuellement chaque 15 minute.

III.5. 2. Étalonnages

Nous présentons dans cette partie les résultats des relevés de températures lors de nos deux tests cités précédemment, pendant les journées du 22 et 26/01/2022. Que nous avons lancé à 08h00mn.

III.5. 2. 1. Etalonnages des sondes

Le tableau si dessous représente les températures mesurées à l'aide des sondes comparées à celle mesurée avec un thermomètre à mercure.

Tableau III.1: Représentation des températures enregistrées pour le premier test.

Temps (s)	Sonde 1		Sonde 2		Thermomètre
	T (sonde 2)	T (sonde1)	T (sonde 2)	T (sonde2)	
0	0,6	0,6	0,7	0,7	1
15	0,7	0,7	0,6	0,8	1
30	0,7	0,8	0,7	0,8	1
45	1,4	1,3	1,6	1,4	2
60	2,2	2,2	2,4	2,3	2
75	2,8	2,7	2,9	2,7	3
90	3,4	3,4	3,6	3,5	4
105	3,8	4,1	4	4	4
120	4,4	4,6	4,6	4,5	5
135	8,2	8,1	7,9	8,2	8
150	9,9	9,7	9,8	9,8	10
165	10,4	10,2	10,5	10,4	10
180	11,3	11,5	11,7	11,6	11
195	14,7	14,5	14,6	14,6	14
210	16,1	16	15,9	16,1	16
225	17,4	17,4	17,1	17,3	17
240	18,6	18,4	18,1	18,1	18
255	20	19,7	19,4	19,8	21
270	21,9	21,8	21,6	21,8	22
285	22,1	22,3	21,1	22,4	22
300	24,1	24	24,3	24,1	24
315	23,7	23,9	23,8	24	24
330	26,8	26,7	26,5	26,6	27
345	27,7	27,7	27,5	27,6	28
360	27,9	27,7	27,6	27,7	28

375	26,9	27	26,8	27,1	25
390	25,6	25,5	25,4	25,6	25
405	25,3	25,4	25,4	25,4	25

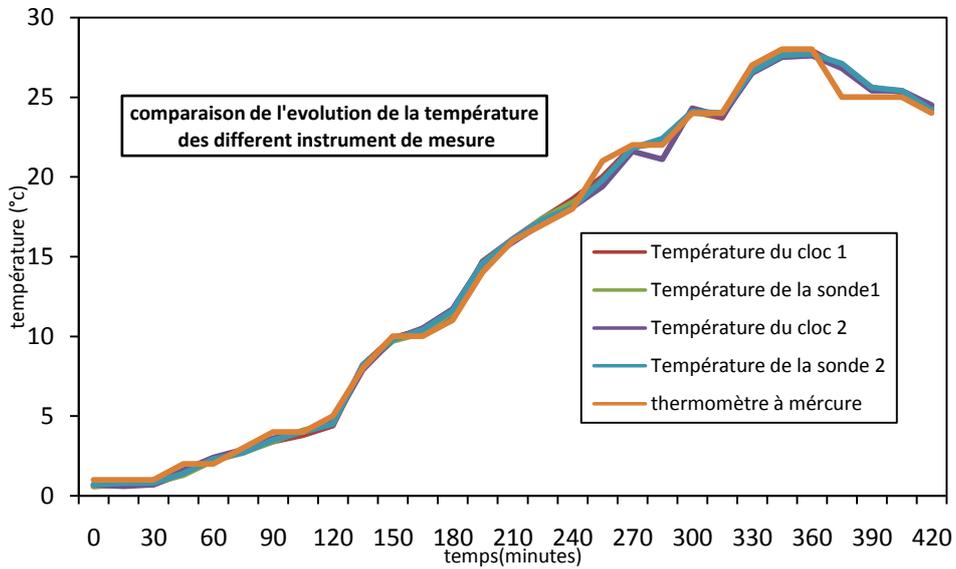


Figure III.14: Evolutions des températures des sondes et de thermomètre.

On remarque que les courbes sont confondues, donc les sondes sont fiables pour les autres tests qui vont suivre.

III.5. 2. 2. Etalonnage des deux modèles:

Le tableau ci-dessous représente l'évolution des températures intérieure et extérieure des modèles en fonction de l'heure locale de la ville de Tizi-Ouzou en absence d'un MCP.

Tableau III.2: Évolutions des températures (cas des deux modèles sans unité de stockage).

Temps (s)	Modèle 1			Modèle 2		
	Température ambiante	Température interne	Humidité relative	Température ambiante	Température interne	Humidité relative
0	0,7	0,7	99	1	0,7	99
15	0,7	0,8	99	1	0,6	99
30	0,9	0,7	99	1,2	0,7	99
45	1,4	0,8	99	1,6	0,6	99
60	2,2	1,1	99	2,4	0,9	99
75	2,8	1,2	99	2,9	1,1	99
90	3,4	1,5	99	3,5	1,4	99

105	3,8	1,7	97	4,1	1,7	96
120	4,4	2,3	94	5,7	3,2	94
135	8,2	8,9	77	9,7	9,3	74
150	9,9	12,5	74	9,8	12	74
165	10,4	14,4	73	10,5	13,7	74
180	11,3	16,1	70	11,7	15,9	71
195	14,7	19	58	14,6	18,8	60
210	16,1	20,6	52	15,9	20,6	55
225	17,4	22	52	17,1	22,1	54
240	18,6	22,2	49	18,1	23	49
255	20	23,6	45	19,4	24,3	47
270	21,9	25,1	40	21,6	25,5	43
285	22,1	26,4	38	21,1	26,4	39
300	24,1	27,5	38	24,3	27,5	42
315	23,5	28,3	34	22,9	28,4	36
330	25,8	29,1	36	25,9	29	37
345	26,7	29,9	33	26,5	29,7	36
360	26,7	30,4	33	26,7	30,5	33
375	25,9	30,1	31	25,8	30,7	36
390	25,7	31,2	30	25,3	31,5	32
405	26,9	31,5	29	26,6	32,4	33
420	23,5	26,4	37	21,6	26,1	42
435	18,4	23,7	38	16,8	23,6	40
450	17,3	22,7	46	16,1	22,6	57
465	16	21,7	43	15,9	21,5	53
480	15,5	20,6	47	15,1	20,2	54
495	14,8	19,6	48	14,6	19,3	55
510	14,5	18,5	44	14,5	18,1	46
525	13,9	17,7	46	13,9	17,4	48
540	13	16,7	55	12,9	16,5	59
555	12,8	15,8	55	12,6	15,5	56
570	12	14,9	59	11,9	14,9	60
585	11,8	14,3	62	11,8	14	63
600	11,4	13,5	67	11,4	13,4	69

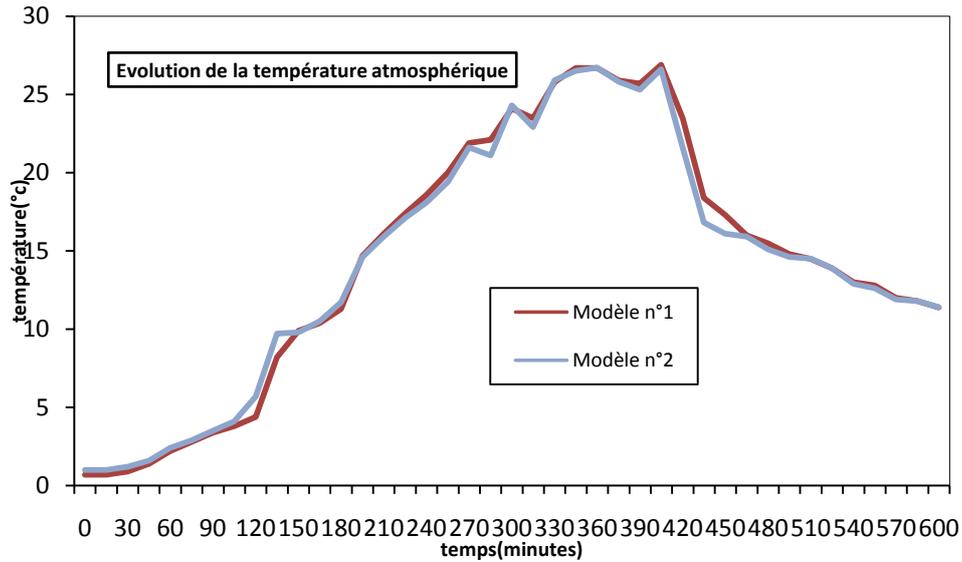


Figure III.15: variation des températures ambiantes.

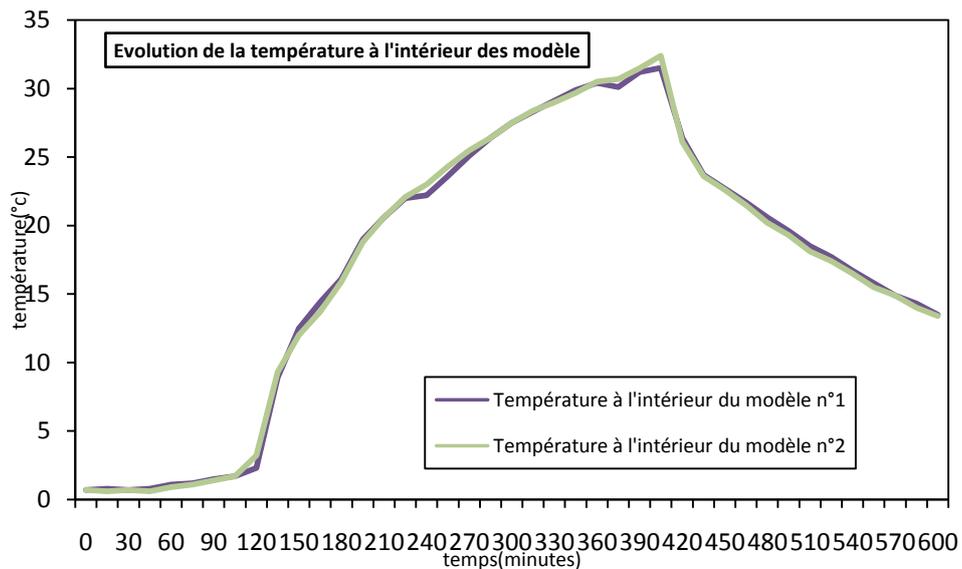


Figure III.16: variation de la température à l'intérieur des modèles.

A partir des figures ci-dessus on remarque que les deux courbes des températures sont confondues, ceci signifie que nos deux modèles sont soumis à la même condition de températures et d'humidité.

A 10h nous remarquons une augmentation significative de température, ce qui correspond à l'arrivée du soleil sur les deux modèles placés côte à côte, elle continue d'augmenter jusqu'à 15h, avant que ça commence à diminuer car le soleil n'atteint plus les deux modèles.

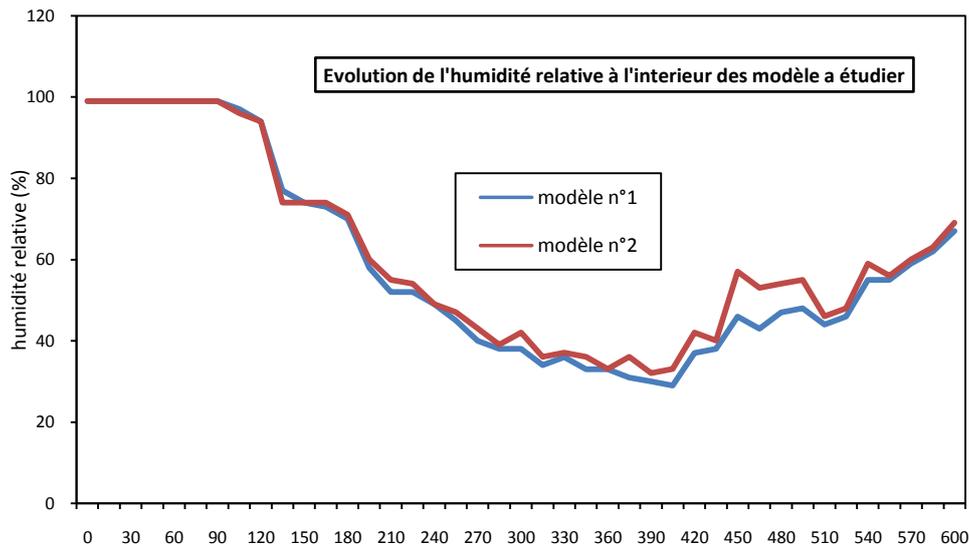


Figure III.17: variation de l'humidité relative à l'intérieur des modèles.

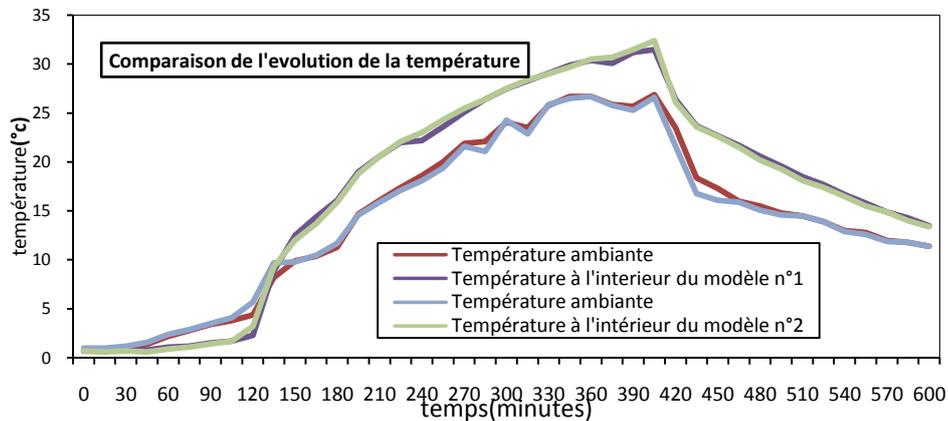


Figure III.18 : variations des températures ambiantes et intérieures des modèles

La figure ci-dessus représente l'évolution des températures internes et ambiante des deux modèles en fonction de l'heure locale à Tizi-Ouzou. On peut remarquer un écart entre la température ambiante et les températures internes des modèles, cette dernière est très importante et ceci est due à l'effet de serre provoqué par les vitrages.

IV.6. Conclusion :

Après étalonnage des outils de mesure et des prototypes d'étude on procède aux essais réels sur site, les résultats obtenus pour deux journées différentes seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Analyse des Résultats

Nous présentons dans le présent chapitre les résultats de mesures effectuées sur site lors de deux journées du 26/01/2022 et le 16/02/2022, avec des conditions climatiques réelles.

IV.1. Premier Essai (26/01/2022)

Tableau IV.1: Evolutions des températures (cas avec mur à MCP)

temps	Modèle avec MCP		Modèle sans MCP	
	température ambiante	Température interne (MCP)	Température ambiante	Température interne (sans MCP)
0	1,6	3,4	1,6	1,2
15	2,6	3,5	2,9	1,6
30	3,7	3,6	3,6	2,3
45	3,7	3,9	3,7	2,4
60	4,2	3,9	4,2	2,6
75	4,6	4,1	4,4	3
90	5	4,3	4,9	3,3
105	5,5	4,4	5,6	3,7
120	6	4,4	6	4
135	7,1	4,7	10,5	8,3
150	12,6	5,4	12,9	13,7
165	13,6	7,2	13,4	15,4
180	15,1	8,5	14,9	18,8
195	15,8	10	15,8	20,8
210	17	11,2	16,9	22,2
225	17,7	12,5	17,2	23,7
240	19,1	13,3	19,3	25,1
255	20,4	14,4	20,4	26,3
270	21,3	15,4	21,6	26,8
285	23,2	15,9	23,8	28,4
300	24,7	16,7	25	29,6
315	25,7	17,5	26,7	30,5
330	27,9	18,3	27,8	31,6
345	28,7	19,3	28,8	32,5
360	30,3	20,3	30,3	33,3
375	29,9	21,3	30,2	33,9
390	29,7	22	30,4	34,4
405	30,6	22,7	31,6	35,5
420	30,7	23,3	31,4	32,6
435	22,2	23,6	22,6	28,4

450	20	23,5	20,7	26,8
465	19	23,2	19,2	25,6
480	18,4	23,2	18,6	24,3
495	17,5	23,2	17,7	23,2
510	17	22,9	17,1	22,2
525	16,6	22,6	16,6	21,4
540	15,9	22,2	15,7	20,2
555	15,1	21,6	14,9	19,2
570	14,4	20,9	14	18,3
585	13,4	20,2	13,2	17,4
600	12,2	19,6	12,1	16,3

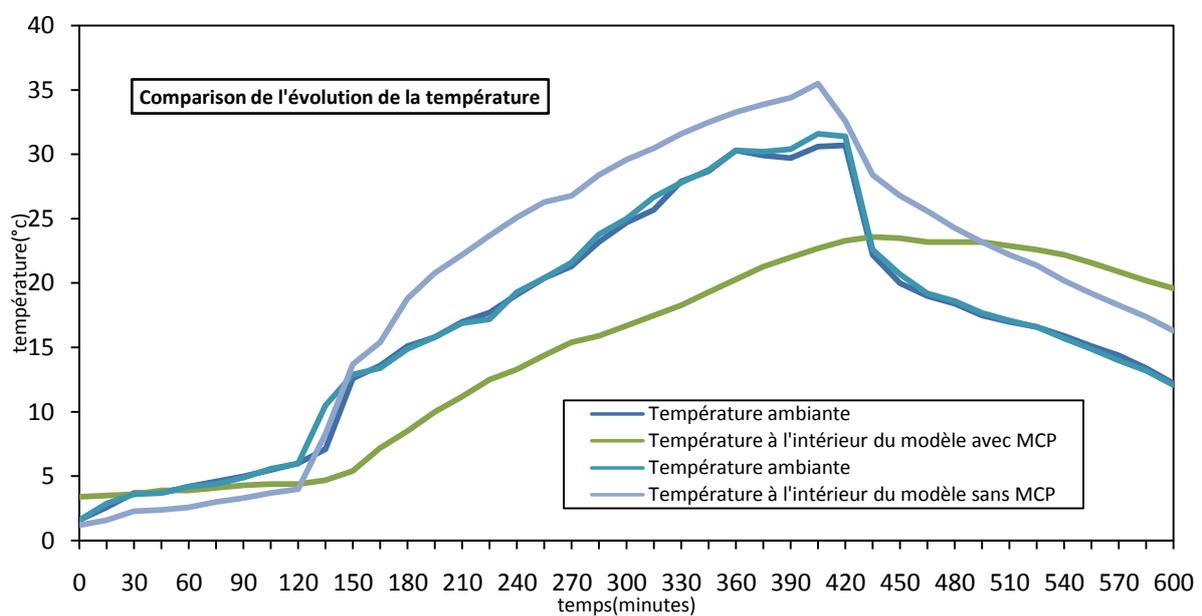


Figure IV.1: Evolution des températures.

A 10h, le soleil arrive sur les modèles, les températures commencent à augmenter jusqu'à atteindre le pic à 15h, à partir de 15h, le soleil n'atteint plus les modèles à cause d'un immeuble situé à l'ouest du Département de Génie Mécanique.

A 15h, on remarque une baisse significative de toutes les températures considérées mais celle du modèle avec MCP persiste dans la zone du confort thermique.

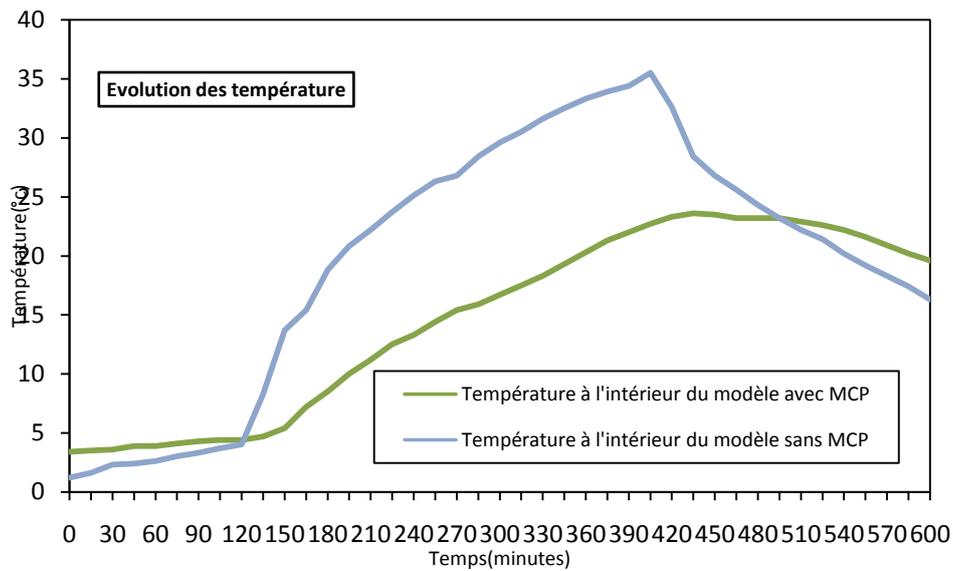


Figure IV.2: variations des températures a l'intérieur des modèles avec et sans MCP.

Le modèle sans MCP a atteint les 17 °C à 10h30 et continue à augmenter jusqu'à atteindre les 35 °C à 14h45, avant qu'elle ne tombe au dessous de la zone du confort avant la fin de l'essai.

On remarque que la température à l'intérieur du modèle avec MCP a atteint la zone du confort thermique (17 à 22 °C) à 13h, elle reste presque stable sur cette plage de température pendant 5h (jusqu'à la fin de notre test).

IV.2. Deuxième Essai (16/02/2022)

Tableau IV.2: Evolutions des températures (deuxième essais)

temps	Modèle avec MCP		Modèle sans MCP	
	température ambiante	Température interne (MCP)	Température ambiante	Température interne (sans MCP)
0	1,6	3,4	1,6	1,2
15	2,6	3,5	2,9	1,6
30	3,7	3,6	3,6	2,3
45	3,7	3,9	3,7	2,4
60	4,2	3,9	4,2	2,6
75	4,6	4,1	4,4	3
90	5	4,3	4,9	3,3
105	5,5	4,4	5,6	3,7
120	6	4,4	6	4
135	7,1	4,7	10,5	8,3
150	12,6	5,4	12,9	13,7
165	13,6	7,2	13,4	15,4

180	15,1	8,5	14,9	18,8
195	15,8	10	15,8	20,8
210	17	11,2	16,9	22,2
225	17,7	12,5	17,2	23,7
240	19,1	13,3	19,3	25,1
255	20,4	14,4	20,4	26,3
270	21,3	15,4	21,6	26,8
285	23,2	15,9	23,8	28,4
300	24,7	16,7	25	29,6
315	25,7	17,5	26,7	30,5
330	27,9	18,3	27,8	31,6
345	28,7	19,3	28,8	32,5
360	30,3	20,3	30,3	33,3
375	29,9	21,3	30,2	33,9
390	29,7	22	30,4	34,4
405	30,6	22,7	31,6	35,5
420	30,7	23,3	31,4	32,6
435	22,2	23,6	22,6	28,4
450	20	23,5	20,7	26,8
465	19	23,2	19,2	25,6
480	18,4	23,2	18,6	24,3
495	17,5	23,2	17,7	23,2
510	17	22,9	17,1	22,2
525	16,6	22,6	16,6	21,4
540	15,9	22,2	15,7	20,2
555	15,1	21,6	14,9	19,2
570	14,4	20,9	14	18,3
585	13,4	20,2	13,2	17,4
600	12,2	19,6	12,1	16,3

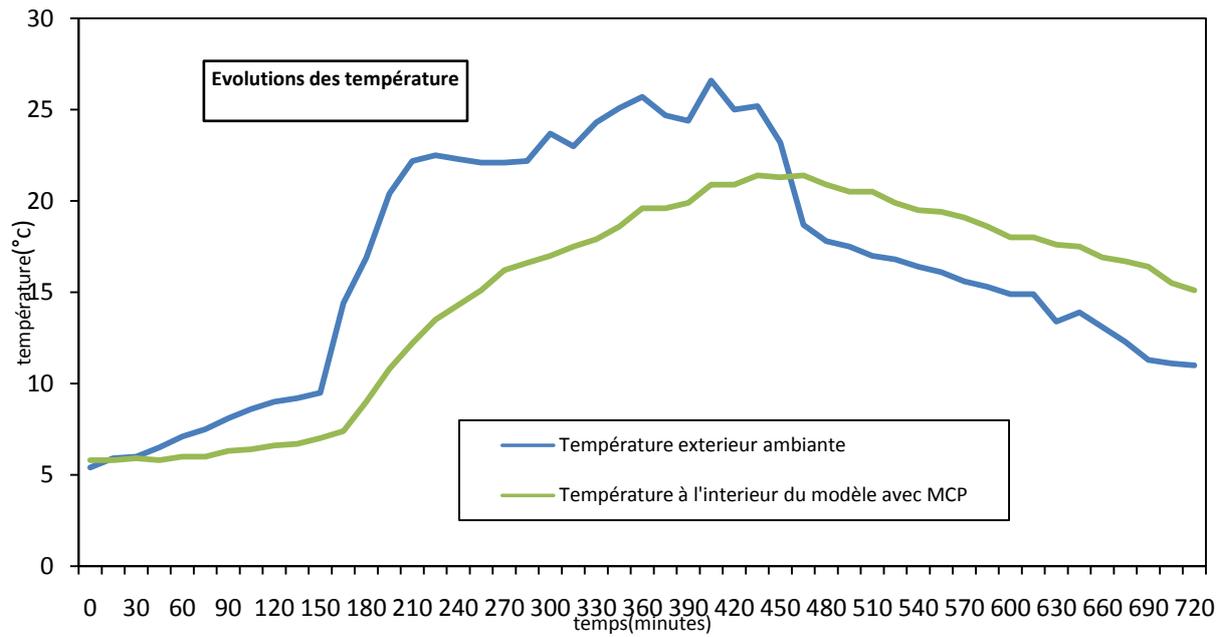


Figure IV.1: Evolution de la température à l'intérieur ambiante et intérieur du modèle avec MCP.

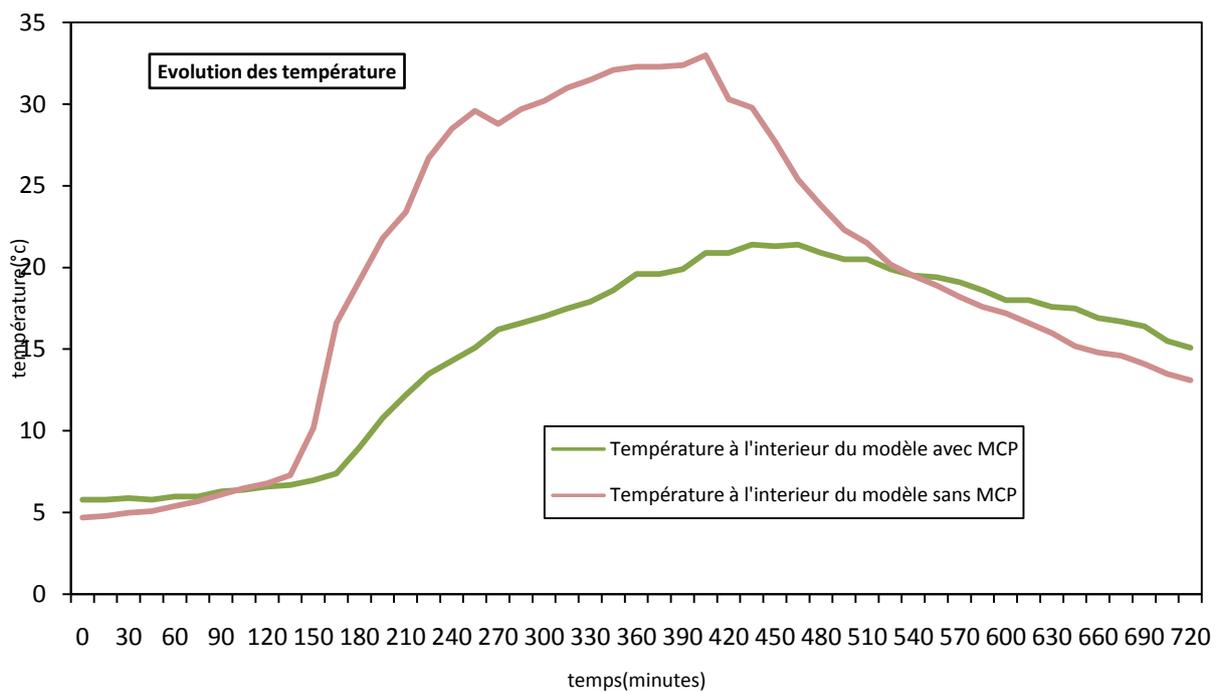


Figure IV.2: Evolution de la température à l'intérieur des modèles.

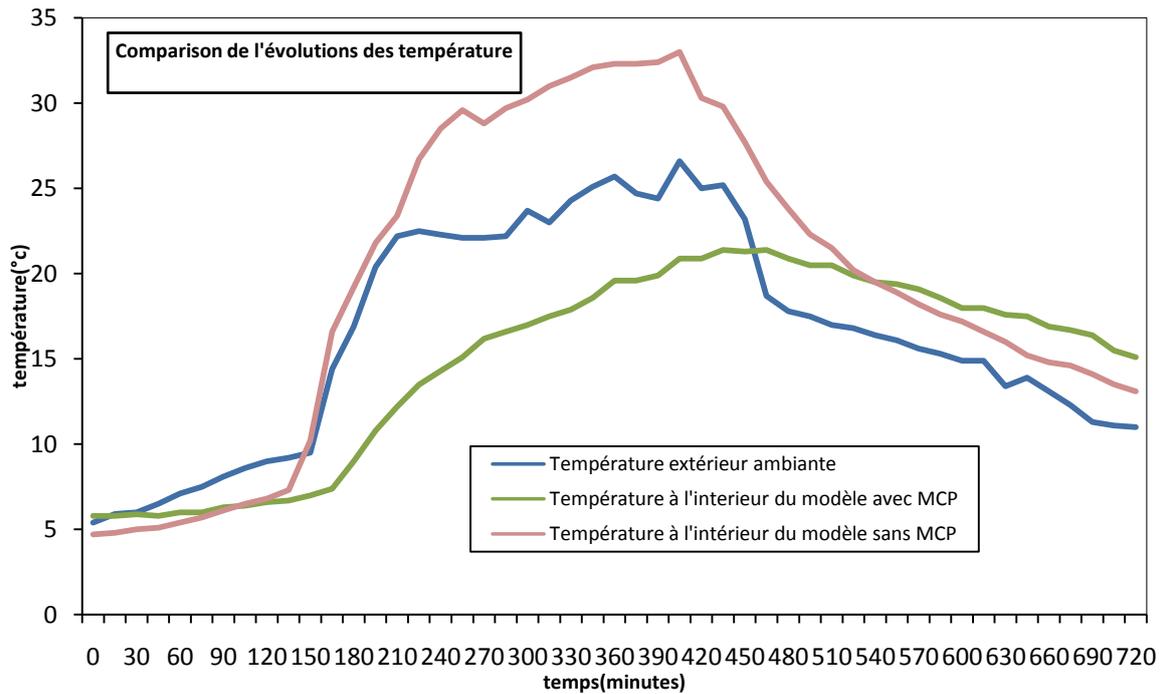


Figure IV.3: Evolution de la température ambiante et à l'intérieur des modèles.

La remarque qu'on peut faire pour ce cas de figure, c'est que les températures internes de la chambre avec MCP sont plus au moins en équilibre. Les températures affichées sont dans la zone du confort thermique.

Conclusion Générale

L'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment doit être un des axes primordiaux de la recherche en Algérie qui présente un potentiel d'énergie solaire considérable.

Cette étude est constituée de deux parties, une première partie comportant deux chapitres consacrés à faire une aperçue sur la thermique du bâtiment et l'état de l'art sur les matériaux à changement de phase. Une deuxième partie est consacrée à la réalisation de deux prototypes et l'étude du comportement et du stockage par chaleur latente du composite MCP.

Dans ce travail nous avons présenté le résultat d'une étude expérimentale sur deux dispositifs à échelle réduite fabriqués en béton armé. La face sud d'un des modèles a été dotée d'une unité de stockage thermique. Cette expérience a été faite avec des conditions climatiques réelles.

Le but de cette manipulation est d'effectuer une analyse et une comparaison entre les deux modèles avec et sans MCP.

EN regard aux résultats obtenus, nous pouvons conclure que pendant la journée les températures internes sont plus au moins stables, elles varient entre 15 et 23 °C pour le cas avec MCP. En revanche les températures externes varient entre 15 et 35 °C.

Le déphasage obtenu dans le modèle avec MCP varie entre 2 à 3h qu'on peut qualifier d'insuffisant. On peut l'améliorer avec une isolation des murs et toit.

Le béton est un matériau à conductivité thermique élevée, l'étude nous a montré que l'isolation thermique est indispensable dans la construction de l'habitat pour que cette dernière soit confortable.

Bibliographie

- [1] J. Li, P. Xue, W. Ding, J. Han and G. Sun, 'Micro-Encapsulated Paraffin/High-Density Polyethylene/Wood Flour Composite as Form-Stable Phase Change Material For Thermal Energy Storage', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, N°10, pp. 1761 - 1767, 2009.
- [2] C. Alkan and A. Sari, 'Fatty Acid/Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) Blends as Form-Stable Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage', *Solar Energy*, Vol. 82, N°2, pp. 118 - 124, 2008.
- [3] B Jones, K Hsieh, M Hashinaga, *The effect of air velocity on thermal comfort at moderate activity levels*, *ASHRAE Transactions* 92 (1986) 761–769, Part 2B (CONF-8606125).
- [4] Bo Zhao¹, Chuan Li, Yi Jin¹, Cenyu Yang¹, *Heat transfer performance of thermal energy storage components containing composite phase change materials*, *IET Renewable Power Generation*, 10 (2016) 1515 – 1522.
- [5] A. Sari, A. Karaipekli, *Thermal conductivity and latent heat thermal energy storage characteristics of paraffin/expanded graphite composite as phase change material*, *Appl. Therm. Eng.* 27 (2007) 1271–1277.
- [6] F Kuznik, D David, K Johannes, J. J Roux, *A review on phase change materials integrated in building walls*. *Renewable and Sustainable Reviews* 15 (2010) 379-391.
- [7] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009). *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345.
- [8] fiche technique Marques de commerce de la Compagnie, Pétrolière Impériale, Licencié. Lubrifiants et produits spéciaux, Services techniques du Marketing Infotech: 1-800-268- 3183.
- [9] A. Karaipekli, A. Sari, *Preparation and characterization of fatty acid ester/building material composites for thermal energy storage in buildings*, *Energy Build* 43 (2011) 1952–1959.
- [10] H. Fauzi, H.S.C. Metselaar, T.M.I. Mahlia, M. Silakhori, *Thermo-physical stability of fatty acid eutectic mixtures subjected to accelerated aging for thermal energy storage (TES) application*, *Appl. Therm. Eng.* 66 (2014) 328–334.
- [11] A. Sari, H. Sari, A. Önal, *Thermal properties and thermal reliability of eutectic mixtures of some fatty acids as latent heat storage materials*, *Energy Convers. Manage* 45 (2004) 365–376.
- [12] S Ushak, M. J Cruz, L. F. Cabeza, M Grágeda, *Preparation and Characterization of Inorganic PCM Microcapsules by Fluidized Bed Method*, *Materials* 9 (2016) 24.
- [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] J. P. Kotzé, T. W. Von Backström, et P. J. Erens, "A combined latent thermal energy storage and steam generator concept using metallic phase change materials and metallic heat transfer fluids for concentrated solar power," 2011.
- [15] H. Ge, H. Li, S. Mei, et J. Liu, "Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, no. 0, pp. 331-346, May 2013.
- [16] H. Ge, H. Li, S. Mei, et J. Liu, "Low melting point liquid metal as a new class of phase change material: An emerging frontier in energy area", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, no. 0, pp. 331-346, May 2013.
- [17] Zalba, B., Marin, J.M., Cabeza, L.F., Mehling, H., 2003. *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Appl. Therm. Eng. 23, 251–283.
- [18] Serge Blaise EKOMY ANGO « Contribution au stockage d'énergie thermique en Bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase », l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [19] Kuznik, F., David, D., Johannes, K. et Roux, JJ. (2010) 'A review of phase change materials integrated in building walls', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 15, no1, pp 379-391.
- [20] Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A. et Fernandez, A. (2011) 'Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings : A review' *Renewable and sustainable Energy Reviews*, vol 15, no 3 pp1675-1695.
- [21] Wolfgang Streicher., "Phase Change Material Heat Storage: New Materials and New Solar and Other Applications", Graz University of Technology, Institut of Thermal Engineering, IEA Task 32 Subtask C leader (PCM), 2004.
- [22] Hadjieva, M., Kanev, S. et Argirov, J. (1992) 'Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage', *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol 27, no 2, pp181-187.
- [23] A. Gontard, K. Gryska, L. Lallemand, « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour, 2012.
- [24] Rubitherm GmbH - Paraffin in thermal energy storage applications, <http://www.rubitherm.com>
- [25] B. Binet, « Etude de la fusion dans des enceintes munies de sources de chaleur discrètes », Sherbrooke (Québec), CANADA, Novembre 1998.
- [26] Sharma, A, V.V, Tyagi, C.R, Chen, & D., Buddhi., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol.13, pages 318–345, 2009.
- [27] L. Royon, L. Karim, A. Bontemps, *Thermal energy storage and release of a new component with PCM for integration in floors for thermal management of buildings*, *Energy Build.* 63 (2013) 29–35.

- [28] J Kosny, E Kossecka, A. Brzezinski, A Tleoubaev, D Yarbrough, *Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs)*, Energy Build. 52 (2012) 122–131.
- [29] C.V. Konstantinidou, A. Novoselac, *Integration of Thermal Energy Storage in Buildings*, Univ. Tex., Austin, (2010).
- [30] E. Rodriguez-Ubinas, L. Ruiz-Valero, S. Vega, J. Neila, *Applications of phase change material in highly energy-efficient houses*, Energy Build. 50 (July) (2012) 49–62.
- [31] Waqas ,A., Din, Z. Ud. (2013). *Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews ,18 ,607–625.
- [32] M. Pomianowski, P. Heiselberg, Y. Zhang, *Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings*, Energy Build. 67 (2013) 56–69.
- [33] C Sunliang., *State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings*, Master`s Thesis, university of Jyvaszkyla, Department of physics, Master`s Degree Programme in Renewable Energy (2010).
- [34] Kośny, J. 2007. *Field Testing of Cellulose Fiber Insulation Enhanced with Phase Change Material*. Oak Ridge, TN. USA: Oak Ridge National Laboratory Report—ORNL/TM-2007/186.
- [35] Zhang, M., Medina, M. A. & King, J. B. 2005. *Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings*. *International Journal of Energy Research*, 29, 795-809.
- [36] Kuznik, F., Virgone, J. & Noel, J. *Optimization of a phase change material wallboard for building use*. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1291-1298, 2008.
- [37] Zalewski L., “*Etude Thermique Expérimentale et Simulation Numérique d’un Mur Solaire Composite Optimisation des Performances Energétiques*”, Thèse De Doctorat., Faculté des sciences appliquées de Béthune, Université d’Artois, 1996.
- [38] Serge B.E.A, « *Contribution au Stockage d’énergie thermique en batiment : développement d’un système actif à matériaux à changement de phase* », thèse de doctorat, Paris Tech, Novembre 2011.