

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen-



Faculté de Technologie  
Département de **Génie Civil**

Spécialité : **STRUCTURE**

Mémoire pour l'obtention du diplôme de MASTER

Présenté par :

**Bouriche Souhila et Amraoui Sofiane**

Sujet

## **Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment à l'aide des matériaux intelligents actifs**

Soutenue le **27/06/2019** devant le jury composé de

M.GHOMARI.F	Professeur	Univ.Tlemcen	Président
M.DEBBAL.M.Z	M.A	Univ.Tlemcen	Examineur
M.SELKA.GH	Maitre de conférences B	Univ.Tlemcen	Encadreur

**2018-2019**

## ***Remerciements***

*Nous tenons à adresser, en premier lieu, nos sincères remerciements et le grand respect à **Mr SELKA GHOUTI** d'avoir accepté de nous encadrer et de nous orienter tout au long de notre travail avec ses judicieux conseils et sa constante disponibilité, c'est grâce à sa compétence que ce travail a pu être réalisé.*

*Nous remercions également les membres de jury Mr le président **Ghomari Fouad** (Professeur à l'université de Tlemcen et directeur du laboratoire EOLE) et Mr l'examineur **Debbal Mohammed Zakaria** (Chargé de cours à l'université de Tlemcen) d'avoir voulu accepter de juger ce travail, nous vous en sommes reconnaissants et en espérant être à la hauteur de votre confiance.*

*Nous remercions infiniment nos enseignants pour leurs efforts fructueux durant toute notre formation universitaire*

*Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

*Dédicace :*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers Parents qui ont toujours cru en moi et pour leur amour,  
confiance et encouragement.*

*Mon très chère frère Nabil, à mes aimables sœurs Asma et Rania, mon  
beau frère Marouane.*

*Mon adorable neveu Yacine, mes tentes, mes oncles et toute ma famille  
BOURICHE.*

*A mon encadreur Mr SALKA GHOUTI*

*Mes Amis Proches Rajaa, Fazo, Nour El Houda et Wissam*

*Mes Amis d'étude Zakarya, Choukri, Tema, Sarra, Yassine, Amine et  
Mohamed.*

*A tous mes collègues de promotion 2018-2019*

*A tous les gens qui me connaissent de près ou de loin*

*Bouriche Souhila*

***Dédicace :***

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents*

*A mes frères et mes sœurs*

*A toute ma famille*

*A mon encadreur Mr SALKA GHOUTI*

*A tous mes collègues et mes amis partout*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science*

*Et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien*

*Et la prospérité de l'humanité.*

***Amraoui Sofiane***

## **Résumé :**

Le travail, présenté ici, a pour objectif de développer un modèle représentatif de comportement thermique et dynamique des bâtiments intégrant des matériaux à changement de phase MCP afin d'évaluer les différents modes d'échanges ou de stockage thermique mise en jeu.

Ce modèle 2D est couplé à un modèle global de bâtiment sous *Fluent* pour simuler et évaluer le fonctionnement de plusieurs configurations d'échangeur air/MCP sous différentes sollicitations thermiques.

**Mots clés :** Energétique – Bâtiment – Matériaux à Changements de Phase - stockage thermique, simulation dynamique

## **ملخص:**

العمل المقدم خلال هذه المذكرة يهدف إلى تطوير نموذج ممثل للسلوك الحراري و الديناميكي للمباني مستعملين مواد متغيرة الطور من اجل تقييم وضع التبادلات المختلفة أو التخزين الحراري المعتمد

هذا النموذج ثنائي الأبعاد يقترن بنموذج شامل للمباني باستعمال برنامج Fluent من اجل محاكاة و تقييم طريقة عمل العديد من المبادلات هواء/مواد متغيرة الطور تحت تأثير مختلف الضغوط الحرارية

**الكلمات المفتاحية:** حرارية- المباني – مواد متغيرة الطور – التخزين الحراري – محاكاة ديناميكية

## **Abstract:**

The work presented here aims to develop a representative model of thermal and dynamic behavior of buildings using Phase Change Materials PCM to evaluate the different modes of exchange or thermal storage involved.

This model is coupled to a global model of building under *Fluent* to simulate and evaluate the operation of several exchanger configurations Air/PCM under different thermal stresses.

**The keywords:** Phase change materials, thermal, thermal storage, dynamic behavior

## **Sommaire :**

Remerciements .....	i
Dédicaces: .....	ii
Résumé : .....	iv
Sommaire : .....	v
Liste des figures : .....	ix
Liste des tableaux: .....	xii
Nomenclature: .....	xiii

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

### **Chapitre 1 : Synthèse bibliographique**

1..INTRODUCTION .....	3
2. CONCLUSION : .....	19

### **Chapitre 2 : Utilisation des MCPs en stockage d'énergie en bâtiment**

I.1.Introduction : .....	21
I.2.Stockage de l'énergie : .....	22
I.2.1. Stockage par chaleur sensible : .....	22
I.2.2. Stockage par chaleur latente : .....	26
I.2.3. Stockage thermochimique : .....	28
II.Matériaux de changement de phase MCP: .....	36
II.1.Historique des MCPs .....	36
II.2.Choix d'un MCP : .....	38
II.2.1 - Critères thermodynamiques : .....	38
II.2.2- Critères cinétiques : .....	38
II.2.3- Critères chimiques : .....	39

II.2.4- Critères physiques :	39
II.2.5- Critères de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux:	39
II.2.6- Critères économiques :	39
II.3.Classification des matériaux à changement de phase :	40
II.4.1- MCPs organiques :	40
i. Paraffine :	41
ii. Composés non paraffiné :	43
II.4.2- MCPs inorganiques :	44
II.4.3-Les eutectiques :	46
II.5.Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage :	48
II.5.1-Surfusion :	48
II.5.2-Dilatation :	48
II.5.3-Surchauffe :	48
II.6.Conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :	49
a) Macro-encapsulation [28] :	49
b) Utilisation de micro-capsules :	50
c) Briquettes de polyéthylène à haute densité (PEHD) :	51
d) Briquettes de polyéthylène de haute densité réticulé :	51
e) Substrat poreux :	51
II.7.Utilisation passive des MCP en bâtiment :	52
II.7. Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment :	52
III. Conclusion :	60

### **Chapitre 3 : Efficacité énergétique et le confort thermique**

1. INTRODUCTION.....	62
2. EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE BÂTIMENT :	62

2.1	Maison passive:.....	63
2.2	Bâtiment basse énergie:.....	64
2.3	Bâtiment très basse énergie:.....	64
2.4	Bâtiment à énergie zéro :.....	65
2.5	Bâtiment à énergie positive :.....	65
<b>3.</b>	<b>Solutions d'efficacité énergétique passives.....</b>	<b>66</b>
3.1.	Compacité du bâtiment :.....	66
3.2.	Orientation :.....	67
3.3.	Solaire passif :.....	68
4.	Notion du Confort Thermique :.....	69
4.1	Aspects du confort thermique :.....	69
o	L'aspect physique :.....	69
o	L'aspect physiologique.....	69
o	L'aspect psychologique :.....	69
o	Aspect sensoriel:.....	69
4.1.1.	Influence de la température sur le confort :.....	70
4.1.2.	Influence de l'humidité relative de l'air.....	71
4.1.3.	La vitesse de l'air :.....	72
4.1.4.	Influence des écarts de température.....	72
5.	Mesure du confort thermique.....	73
6.	Obtention du confort thermique à l'aide de MCP :.....	73
7.	CONCLUSION :.....	75

## Chapitre 4 : Simulation Numérique

1. Introduction :	77
2. Position du problème	78
2.1 Modèle physique :	78
3. Modèle du transfert thermique	79
3.1 Formulation mathématique du problème 2D :	79
Hypothèses simplifiées :	79
Equations de conservation :	79
4. Paramètres physiques des matériaux.	81
5. Génération du maillage par GAMBIT	82
6. Résultats et discussions :	86
7. Conclusion :	94
CONCLUSION GENERALE	95
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	96

## Liste des figures :

### Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

<b>Figure 1.1</b> : Mur trombe.....	4
<b>Figure 1.2</b> : Photographie du dispositif expérimental de Ahmad.....	11
<b>Figure 1.3</b> : Photographie d'une cellule test utilisée .....	13
<b>Figure 1.4</b> : Exemple de cloison contenant des MCP.....	14
<b>Figure 1.5</b> : Paroi et cellules test. ....	14
<b>Figure I.6</b> : Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau .....	15
<b>Figure 1.7</b> : Système actif mis au point par Zalba et al. (a) dispositif expérimental (b) détail du système de stockage d'énergie. (1) ventilateur, (2) dispositif de variation de vitesses, (3) débitmètre, (4) système de stockage d'énergie .....	16
<b>Figure1.8</b> : Photographie des tuiles équipées de MCP .....	17
<b>Figure 1.9</b> : Photographie d'une brique avec et sans paraffine.....	17
<b>Figure 1.10</b> . Principe général du fonctionnement du montage expérimental .....	18
<b>Figure 1.11</b> : Schéma de l'installation pour l'étude du Comportement thermique des parois .....	19

### Chapitre 2 : Utilisation des MCPs en stockage d'énergie en bâtiment

<b>Figure 2.1</b> : Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie.....	26
<b>Figure 2.2</b> : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	27
<b>Figure 2.3</b> : Principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption. ....	29
<b>Figure 2.4</b> : Principe de fonctionnement des MCP .....	38
<b>Figure 2.6</b> : Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés.....	41

<b>Figure 2.7</b> : Solidification présentant une surfusion.....	48
<b>Figure 2.8</b> : Conditionnement de MCP en nodules .....	50
<b>Figure 2.9</b> : Conditionnement en briquette plastique .....	50
<b>Figure 2.10</b> : Conditionnement en sac plastique .....	50
<b>Figure 2.11</b> : Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines .....	51
<b>Figure 2.12</b> : Modèle de mur contenant une Plaque de plâtre-MCP .....	53
<b>Figure 2.13</b> : Enduit à base de MCP.....	54
<b>Figure 2.14</b> : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP .....	54
<b>Figure 2.15</b> : Capacités de stockage d'énergie des blocs de bétons-MCP .....	55
<b>Figure 2.16</b> : Bloc de béton contenant des MCP.....	56
<b>Figure 2.17</b> : Fenêtre glassX .....	57
<b>Figure 2.18</b> : Rideaux à MCP.....	58
<b>Figure 2.19</b> : Panneau à base de MCP .....	59

### **Chapitre 3** : Efficacité énergétique et le confort thermique

<b>Figure 3.1</b> : Course du soleil l'hiver.....	67
<b>Figure 3.2</b> : Course du soleil l'été.....	67
<b>Figure 3.3</b> : Diagramme de plage de confort : Température-Humidité.....	72

### **Chapitre 4** : Position du problème

<b>Figure 4.1</b> : Géométrie du problème physique.....	78
<b>Figure 4.2</b> : Variation de la capacité effective en fonction de la température. ....	82
<b>Figure 4.3</b> : Type de solver .....	82
<b>Figure 4.4</b> : Modélisation sous Gambit.....	83
<b>Figure 4.5</b> : Maillage du model étudiant.....	84
<b>Figure 4.6</b> : Evolution des champs de température (en Kelvine) d'une cellule test Avec et sans paraffine .....	86

<b>Figure 4.7 :</b> Evolution de températures durant 04 jours .....	89
<b>Figure 4.8 :</b> Evolution en fonction du temps (en second) des Températures intérieure avec et sans paraffine .....	90
<b>Figure 4.9.a :</b> Profiles de températures aux instants (6, 12, et 18h) de la journée Avec paraffine .....	91
<b>Figure 4.9.b :</b> Profiles de températures aux instants (6, 12, et 18h) de la journée Sans paraffine .....	91
<b>Figure 10 :</b> Profiles de températures aux instants (6, 12, et 18h) de la journée Sans et avec paraffine .....	92

## Liste des tableaux:

<b>Chapitre 2 : Utilisation des MCPs en stockage d'énergie en bâtiment</b>	
<b>Tableau 2.2 :</b> comparaison entre les trois systèmes de stockage .....	31
<b>Tableau 2.3:</b> Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique .....	33
<b>Tableau 2.4 :</b> Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état .....	37
<b>Tableau 2.5 :</b> les variations des propriétés physiques de quelques paraffines.....	42
<b>Tableau 2.6 :</b> Propriétés thermo physique des matières organiques non-paraffinique	43
<b>Tableau 2.7 :</b> Caractéristiques des hydrates salins .....	45
<b>Tableau 2.8 :</b> Une liste de quelques Eutectiques.....	46
<b>Chapitre 3 : Efficacité énergétique et le confort thermique</b>	
<b>Tableau 3.1 :</b> Valeurs de référence de température d'ambiance .....	70
<b>Tableau 3.2 :</b> Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les matériaux à changement de phase.....	74
<b>Chapitre 4 : Position du problème</b>	
<b>Tableau 4.1 :</b> Propriétés thermo-physiques des deux matériaux. ....	80

## Nomenclature:

### Lettres latines:

<b>Symbole</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
<b>m</b>	Masse du matériau utilisé	[Kg]
<b>C<sub>p</sub></b>	Chaleur massique du matériau utilisé	[J/Kg.K]
<b>ΔT</b>	Différence entre température moyennes finale et initiale du stockage	[K]
<b>T<sub>i</sub></b>	Température initiale du stockage	[K]
<b>T<sub>f</sub></b>	Température finale du stockage	[K]
<b>Δh<sub>f</sub></b>	L'enthalpie spécifique de fusion	
<b>h<sub>e</sub></b>	Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur	W/m <sup>2</sup> K.
<b>q<sub>rad</sub></b>	Le flux solaire moyen imposé	W/m <sup>2</sup>
<b>u</b>	Vitesse horizontale perpendiculaire à la dalle	[m/s]
<b>v</b>	Vitesse verticale	[m/s]
<b>x</b>	Cordonnée verticale	[m]
<b>y</b>	Cordonnée horizontale	[m]
<b>g</b>	Accélération gravitationnelle	[m/s <sup>2</sup> ]
<b>T</b>	Température	[k]
<b>C<sub>eff</sub></b>	La chaleur massique apparente	[J/Kg.K]
<b>A</b>	Surface d'échange de chaleur par convection	m <sup>2</sup>
<b>V</b>	Volume	m <sup>3</sup>

**Lettres grecques :**

$\rho$ :	Masse volumique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\beta$ :	Coefficient d'expansion thermique	[1/K]
$\lambda$ :	Conductivité thermique	[W/m.K]

## **Introduction générale :**

Avec l'augmentation de la consommation d'énergie beaucoup de pays sont mobilisés pour trouver des solutions qui peuvent diminuer cette consommation spécialement dans le secteur de bâtiment.

Des recherches sont faites dans le domaine de la thermique des bâtiments pour améliorer l'efficacité énergétique et augmenter le confort thermique dans les bâtiments

En attendant la mise au point de techniques permettant la production d'énergie écologique et renouvelable, en grande quantité et à moindre coût, l'intérêt se porte sur le contrôle des dépenses énergétiques et la régulation de la consommation. Le stockage d'énergie peut aller dans ce sens, car il permet une utilisation de l'énergie différée de la production, évitant ainsi les pics de surproduction en heures de pointe, onéreux en coût des installations.

Le stockage est un moyen très important pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie.

Ce stockage d'énergie peut être fait avec les matériaux à changement de phase (MCP), ou aussi appelé des matériaux intelligents comme les Cires, les eutectiques et les hydrates salines...etc.

L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) permet d'avoir des stocks moins volumineux à cause de la grande chaleur latente de fusion ou de solidification de ceux-ci.

L'objectif de ce mémoire est donc de modéliser et simuler le comportement thermique et dynamique des dalles intégrant un matériau à changement de phase MCP.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués.

Dans le second chapitre on fait une étude sur le stockage thermique, et présente les différents matériaux à changement de phase, leurs applications et les lois les plus utilisées.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation du confort thermique et sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

Le quatrième chapitre contient la simulation numérique, discussion et interprétation des résultats à l'aide du logiciel Fluent.

En fin, on donne aussi un résumé de l'essentiel des résultats obtenus.

**Chapitre 1:  
Synthese  
bibliographique**

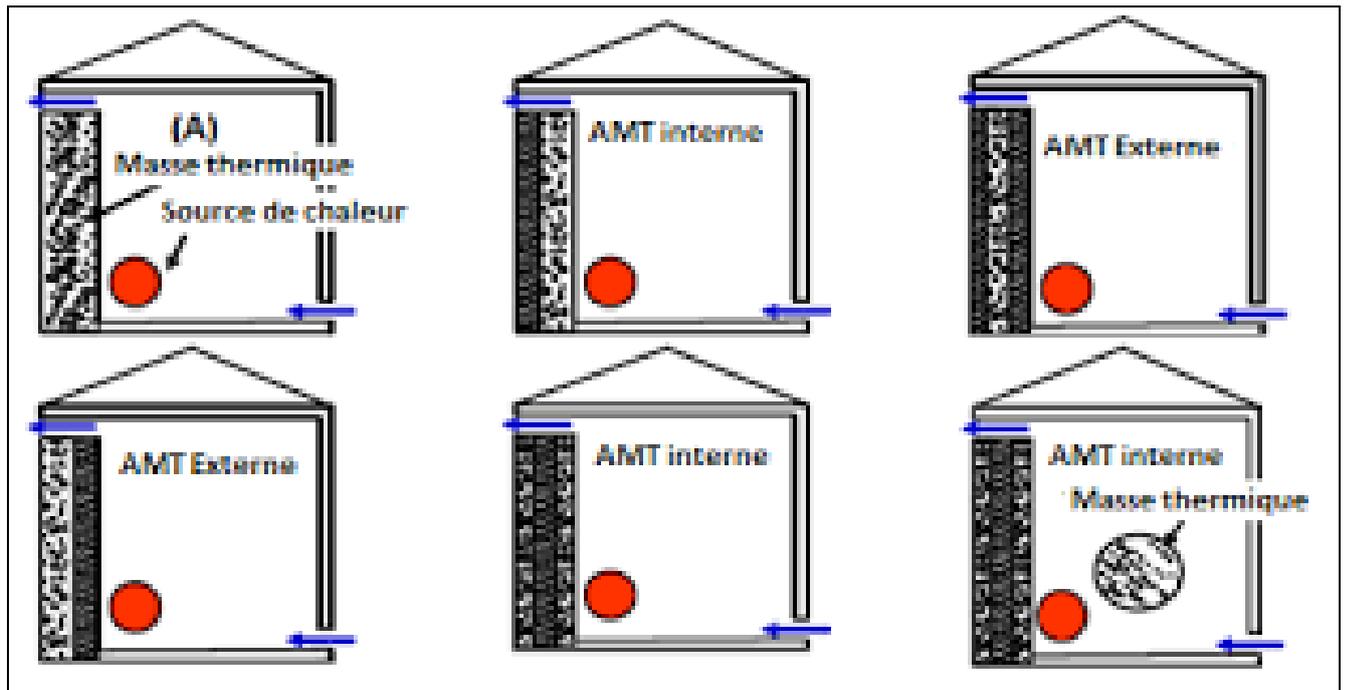
## 1. INTRODUCTION

L'étude des phénomènes de stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase solide liquide a suscité depuis déjà plusieurs décennies et suscite encore de nos jours beaucoup d'intérêt dans divers domaines scientifiques et secteurs technologiques et plus particulièrement dans les applications en rapport avec les systèmes de stockage de chaleur ou de froid développés pour le chauffage et la climatisation dans le secteur de bâtiment ainsi que de dissipation de chaleur par chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement.

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. C'est un domaine de recherche relativement nouveau et qui a débuté avec le *Dr. Telkes* dans les années 40. Ces travaux n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêt et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80.

La première application d'un M C P décrite dans la littérature était leur utilisation pour le chauffage et la climatisation dans les bâtiments, par *Telkes (1975) [38]*, et *Lane (1983) [37]*.

*Telkes et al (1978) [39]* a émis d'idée d'utiliser des MCP dans des murs, mieux connus sous l'appellation « mur trombe » voir figure 1.1



**Figure 1.1 :** Mur trombe.

Bien que la recherche sur le stockage de chaleur latente pour les systèmes de chauffage solaire continue de susciter l'intérêt de chercheurs (*San et autres 2000*) [40] on le considère de plus en plus pour la récupération et le stockage de la chaleur résiduelle des équipements industriels et le lissage de la charge pour la production d'électricité (*EL Dessouky et autre 1997*) [41]. Le principe d'utiliser un accumulateur thermique pour stocker l'énergie latente générée par un procédé n'est pas récent. Son intérêt réside dans l'ajustement des pics de la demande d'énergie. La chaleur ou le froid généré par les équipements est récupéré et stocké dans une batterie thermique et peut par la suite être utilisé lorsque nécessaire, par exemple lors des moments où la demande est son maximum. La technique permet à la fois de diminuer les appels de puissance et d'améliorer l'efficacité énergétique de l'équipement en le faisant fonctionner à un régime optimal.

L'eau est ainsi le plus connu des accumulateurs thermiques à chaleur latente : on peut par exemple l'utiliser sous forme de glace pour refroidir.

La nouveauté tient aujourd'hui dans l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) comme batterie de stockage. Confinés dans des réservoirs hermétiquement clos de formes géométriques différentes. Ces MCP sont substances chimiques capables d'absorber ou de libérer de grandes quantités d'énergie thermique pendant un

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

changement de phase, de solide à liquide et vice versa. Des échangeurs de chaleur contenant un fluide caloporteur (solution de glycol ou autre) assurent le transfert de l'énergie. Celui-ci fournit ou puise dans le stock les kWh thermiques en faisant changer l'état du MCP suivant les besoins de charge ou de décharge du système. Selon le point de fusion du MCP, on obtient ainsi du chaud ou du froid. Les principaux avantages de ces nouveaux matériaux sont : une large gamme de températures de fusion qui permet d'adapter la technologie à divers procédés, une excellente conduction et une disponibilité associée à des temps de charge/décharge très performante.

Le stockage d'énergie thermique est généralement fait sous deux formes:

- **Stockage par chaleur sensible**, où on utilise un matériau ayant une grande capacité thermique, tel que l'eau et autre fluide, les briques de céramique, les pierres et galets, le béton. ....
- **Stockage par chaleur latente** de fusion où un matériau à changement de phase (MCP) est utilisé.

Le stockage par chaleur sensible a plus d'avantages économiques que thermiques, telle que la disponibilité des matériaux de stockage avec des prix abordables. Ils présentent néanmoins des inconvénients majeurs qui sont:

- il nécessite des systèmes volumineux et une grande marge de température de fonctionnement et par conséquent une bonne isolation thermique (coûteuse) est exigée. Cependant, le stockage par chaleur latente offre plus d'avantages thermiques qu'économiques, tels que l'isotherme ou faible plage de température de fonctionnement, une grande capacité de stockage par unité de masse ou de volume (et par conséquent, moins d'espace occupé) et un meilleur contrôle thermique des systèmes.

Des études théoriques et expérimentales sont actuellement en cours au sein de multiple groupe de recherche afin de mieux comprendre ces phénomènes complexes, et ce dans le but ultime de concevoir des accumulateurs de chaleur qui puissent être utilisés dans le secteur résidentiel.

**Bransier (1979) [42]** est le premier qui a étudié analytiquement la solidification et la fusion cyclique d'un MCP. Un modèle conducteur unidimensionnel est utilisé. Le MCP est mis dans deux configurations, à savoir :

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

- un élément plan où le fluide caloporteur circule de part et d'autre de ces deux surfaces (courants parallèles).
- un élément composé de deux cylindres concentriques où le fluide caloporteur circule à l'intérieur du cylindre alors que le MCP se trouve dans l'espace annulaire entre les cylindres, la surface extérieure du cylindre étant isolée.

La température du fluide caloporteur est supposée une fonction sinusoïdale du temps variant autour de la température de fusion. Le coefficient de transfert convectif est supposé constant. Dans sa modélisation il a adopté la méthode de la capacité thermique apparente et un schéma aux différences finies implicite à trois niveaux de temps. Il a rapporté qu'il y a une épaisseur optimale pour l'élément plan pour laquelle l'énergie stockée ou déstockée est maximale.

Ainsi, l'élément cylindrique est plus défavorable pour le stockage que l'élément plan. Ses résultats n'ont pas été validés expérimentalement.

**Farid et Husian (1990) [43]** ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément planaire qui consiste en plusieurs couches de MCP indépendantes. Le stockage de la chaleur dans le MCP est fait par l'intermédiaire d'éléments électriques chauffants et de l'air circulant entre les couches permet le déstockage. Le transfert de chaleur à travers le MCP est supposé unidimensionnel justifié par le fait que l'épaisseur des couches est très faible devant leur hauteur. La convection naturelle dans la phase liquide a été prise en compte à l'aide d'une conductivité thermique équivalente calculée partir de la conductivité de la phase liquide en utilisant une corrélation où les valeurs de deux constantes sont déterminées par comparaison entre des résultats expérimentaux et des résultats théoriques. Les résultats montrent entre autre que 20 à 50% de la résistance thermique totale se trouve dans l'air de circulation suggérant qu'il faut autant que possible augmenter la turbulence dans l'air servant au stockage afin d'améliorer le transfert de chaleur.

**Laouadi, Lacroix et Galanis [44]** ont développé et utilisé un modèle basé sur la conduction unidimensionnelle pour étudier les performances d'un accumulateur de chaleur plan qui consiste en une couche de MCP de deux centimètres d'épaisseur isolée thermiquement d'un côté. Le stockage de chaleur s'effectue grâce à des résistances électriques chauffantes placées dans le MCP juste au dessous de l'isolant.

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Le déstockage vers l'environnement se fait par radiation et/ou par convection. Cette étude a montré que cette unité peut être chargée et déchargée deux fois par jours et pourrait donc servir pour déplacer les pics dus aux appels de puissance en période de pointe vers les heures creuses de la journée.

Autres résultats de cette étude:

- Lorsque la puissance électrique de chauffage augmente la température de l'élément augmente tandis que le temps de stockage diminue et que le temps de déstockage augmente.
- Les pertes de chaleur augmentent aussi avec la puissance de chauffage et atteignent une valeur maximale à la fin de la période de stockage.
- La performance de l'unité dépend fortement de la puissance électrique de chauffage et du coefficient de transfert de chaleur vers l'environnement.

**Brousseau et Lacroix [45]** ont développé un modèle numérique pour la prédiction du comportement thermique d'une unité multicouche de stockage d'énergie par chaleur latente. Des sources de chaleur électriques sont distribuées uniformément dans les couches de MCP de cette unité et fournissent la puissance nécessaire pour le stockage de chaleur. Le déstockage est effectué par une circulation d'air autour des éléments de MCP. Cette étude a mis en évidence que le phénomène de stockage comporte trois étapes:

- stockage par chaleur sensible dans le MCP solide.
- stockage par chaleur latente au début de la fusion.
- stockage simultané par chaleur sensible et par chaleur latente dans le MCP liquide.

Quant au déstockage il comporte quatre étapes:

- Déstockage par chaleur sensible dans le MCP liquide.
- Déstockage par chaleur sensible au début de la re-solidification du MCP.
- Extraction de la chaleur du MCP par refroidissement de celui-ci et de la phase solide,
- Déstockage par chaleur sensible de la phase liquide.

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Cependant un inconvénient majeur des MCP est leur faible conductivité thermique qui empêche un transfert de chaleur suffisant lors du déstockage (à cause de la couche de solide qui se forme tout de suite après le début de la période de déstockage et qui impose la conduction comme mode d'échange de chaleur avec l'environnement).

Cet inconvénient peut être en partie diminué par l'utilisation d'ailettes implantées dans le MCP pour améliorer l'échange de chaleur sur la surface d'échange entre le MCP et l'environnement.

*Farid et Kanzawa (1989)[46]* et *Farid et coll. (1990)[47]* ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément de stockage d'énergie par chaleur latente constitué de plusieurs capsules cylindriques montées verticalement et fixées dans un tubes isolé. Les capsules sont disposées en trois groupes contenant trois différents MCP. Pendant la charge, de l'air chaud passe à travers les capsules de façon à ce que les températures de fusion des trois MCP décroissent dans la direction de l'écoulement.

Cependant, pendant la décharge, la direction de l'écoulement d'air est inversée. Les auteurs rapportent que le taux de transfert de chaleur est amélioré pendant la charge et la décharge, et leur modèle numérique est en accord raisonnable avec l'expérience.

*Zhang et Bejan (1989) [48]* ont étudié expérimentalement la fusion d'un MCP dans une longue enceinte verticale de 74 cm de hauteur et de 14.6 cm d'épaisseur. L'enceinte est chauffée uniformément par des éléments électriques attachés sur un côté, et elle est refroidie par un courant d'alcool sur le coté opposé. Les auteurs rapportent que la fusion du MCP se fait principalement par convection naturelle faiblement turbulente. Ils ont aussi proposé une corrélation du nombre de Nusselt à la paroi chauffée.

*Hirata et Nishida (1989) [49]* ont considéré la fusion dans un échangeur de chaleur à coquille. Le MCP est contenu à l'intérieur du tube alors que l'espace annulaire entre les deux tubes est divisé en trois compartiments où le fluide caloporteur circule pour assurer une température uniforme sur la surface de contact. Ils ont analysé la fusion du MCP par un modèle analytique basé sur la conductivité thermique équivalente. Ainsi, ils ont discuté et proposé une corrélation de la conductivité thermique équivalente.

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

*Fath (1991) [50]* a examiné les performances d'un échangeur de chaleur à coquille horizontal dans lequel le MCP se trouve du côté coquille et le fluide caloporteur circule à l'intérieur du tube. Il a utilisé un MCP dont la température de fusion est de 50°C. Un modèle analytique basé sur l'approximation quasi stationnaire est développé pour prédire les performances du système.

L'auteur rapporte que l'augmentation du débit massique, la température initiale du fluide et la longueur de l'échangeur augmente le transfert de chaleur et l'énergie accumulée dans le MCP. Ainsi, un seul échangeur est thermiquement plus efficace que deux échangeurs parallèles ayant chacun la moitié de longueur et la même capacité thermique.

*Lacroix (1993) [51]*, à utilisé un MCP dont la température de fusion est plus basse  $T^{\circ}=28^{\circ}\text{C}$ . (n-octadécane). Un modèle analytique est aussi proposé pour faire une étude paramétrique et prédire les performances du système. L'auteur rapporte que le rayon du tube, le débit massique et la température initiale du fluide caloporteur devraient être choisis attentivement pour optimiser les performances du système.

*Comini et Nonino [52]* ont étudié analytiquement et expérimentalement des dalles chauffantes consistant en une couche de béton isolée thermiquement par le bas et dans laquelle sont encastrées des tubes. De l'eau maintenue à une température de 30°C environ circule à l'intérieur de ces tubes et constitue la source de chaleur. Un modèle analytique et un modèle numérique basé sur la méthode aux éléments finis ont été développés. Un "coefficient de convection équivalent" tenant compte du coefficient de convection à la surface de la dalle et de la conductivité thermique du béton a été défini pour la partie supérieure de la dalle, de même que pour la partie inférieure isolant-béton et la partie centrale eau-tube. Les résultats de ces deux modèles ont été trouvés en bonne concordance entre eux et avec les résultats expérimentaux

*Shoenfelder [53]* à invention une dalle chauffante constituée d'une brique creuse en béton spécialement conçue dans laquelle est confinée de la paraffine.

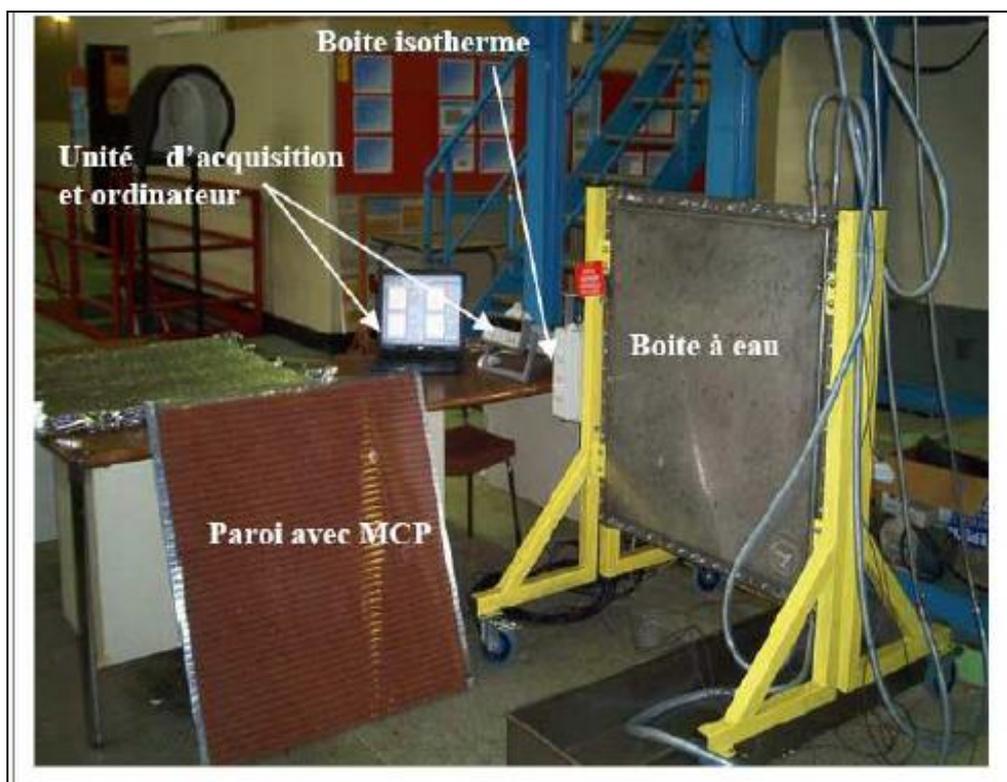
L'originalité de cette invention tient surtout à l'introduction de métal sous forme de poudre et de débris dans le béton et sous forme de grille dans la paraffine, ce qui augmente considérablement la conductivité thermique de l'ensemble de la dalle chauffante. L'intégration de MCP dans l'enveloppe peut également être considérée

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

dans le rôle d'accumulateur thermique et certaines études proposent même une gestion active de cette capacité de stockage.

Une étude plus globale sur l'intégration des MCP dans l'enveloppe est réalisée par *Ahmad (2004) [3]* durant ses travaux de recherche. Des paraffines et eutectiques y sont notamment comparés de façon expérimentale, dans des cellules test de  $1\text{m}^3$ , et numériquement à l'aide d'un modèle 3D implanté dans l'environnement TRNSys. L'effet du stockage par chaleur latente est mis en évidence sur des températures intérieures plus basses de près de  $10^\circ\text{C}$  en été et plus hautes de plus de  $5^\circ\text{C}$  en hiver. Le couplage de MCP avec les systèmes actifs (chauffage, climatisation, ventilation) a pour objectif de diminuer les besoins énergétiques des systèmes sans dégrader leur efficacité. Le modèle est présenté sur la figure 1.2



**Figure 1.2 :** Photographie du dispositif expérimental de *Ahmad (2004)*

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

**Laouadi (1999) [54]** a étudié l'intégration de MCP pour limiter la demande électrique en heure pleine. En contact avec un dispositif de chauffage, la « recharge » des MCP se fait en heure creuse, la restitution de chaleur limite ensuite les demandes d'énergie en heure pleine.

L'intégration de MCP dans des systèmes de climatisation a également été étudiée en Australie **Vakilaltojjar, (2001) [56]** ou encore au Japon **Yamaha, (1998) [55]**. L'idée est toujours de faire passer l'air ambiant dans des échangeurs avec MCP pour le réchauffer ou le refroidir.

Les MCP comme éléments de stockage pour les capteurs solaires thermiques ont également été étudiés par **Bansal, (1992 [57])**. L'air intérieur circule dans l'élément de stockage pour être réchauffé ou refroidi selon le type de MCP.

**Kurklu (2002) [58]** a étudié les performances d'un capteur solaire thermique à eau intégrant un MCP pour l'eau chaude sanitaire. Le MCP est utilisé pour stocker les quantités de chaleur en journée, isoler les canalisations du capteur solaire de l'ambiance extérieure (à l'arrière du capteur) et pour limiter les baisses de température en restituant les quantités d'énergie la nuit. Les auteurs présentent des températures d'eau toujours supérieures à 30°C la nuit (pour des températures d'air extérieur entre 0 et 10°C).

Les capteurs ainsi développés sont également annoncés plus légers et moins coûteux que les capteurs traditionnels.

**Saman (2005) [59]** a étudié l'intégration de MCP comme élément de stockage pour un capteur solaire thermique disposé en toiture. Le dispositif est utilisé pour préchauffer l'air neuf et est couplé à la VMC. L'air, chauffé par le capteur, passe dans un échangeur contenant des MCP et est ensuite injecté dans le bâtiment.

L'intégration de MCP dans le bâtiment permet d'avoir des amortissements ponctuels ou un stockage plus étalé des quantités de chaleur suivant son emplacement.

**Kuroki (2002) [60]** a comparé numériquement les effets d'une intégration de MCP couplée à la VMC ou passivement dans l'enveloppe. Un couplage avec la VMC

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

---

permet d'amortir les pics de température en journée. Soumis aux dynamiques des températures extérieures, le matériau stocke des quantités d'énergie durant la journée et les restitue la nuit. L'intégration de MCP découplés de la VMC (intégration passive dans l'enveloppe) a un effet différent. Le changement de phase permet d'emmagasiner progressivement les quantités de chaleur, ayant un effet direct sur l'ambiance intérieure (et sur les besoins en climatisation). Par contre il est nécessaire de surventiler la nuit pour cristalliser le MCP. Une succession de fortes chaleurs, ne permettant pas la cristallisation du matériau, le rendra alors inefficace.

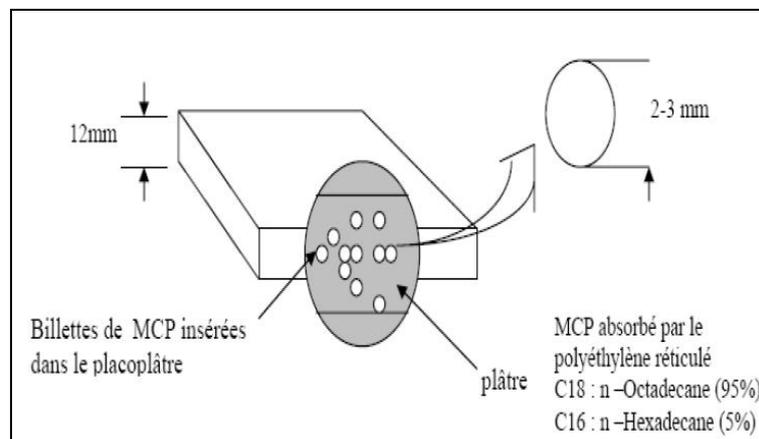
Des états de l'art des MCP et de leurs applications au bâtiment sont aujourd'hui disponibles dans *Tyagi (2006) [61]* et *Principi (2005) [62]*. L'intégration de tels matériaux peut se faire dans le mobilier, dans la structure ou dans l'enveloppe. Leur intégration se traduit par des amortissements ponctuels des pics de température ou plus étalés selon l'intégration (dans l'enveloppe et couplé à la ventilation (VMC) ou non).

*J.K. Kissock et al [63]* ont proposé une paroi associant un panneau de faible coût, un matériau à changement de phase et un super-isolant a été réalisée. Une cellule-test utilisant ces parois a été construite et ses performances ont été comparées à celles d'une cellule-test ayant des parois classiques. Le comportement thermique de ces deux cellules a été modélisé et comparé aux résultats expérimentaux. Le MCP dans de telles parois minces joue son rôle d'« amortisseur thermique » et permet d'atténuer les variations de température. Une simulation numérique a été effectuée à l'aide du logiciel TRNSYS 15.



**Figure 1.3 :** Photographie d'une cellule test utilisée par Kissok et al [63]

*T. Kondo et al [64]* ont étudié l'utilisation des composés organiques de mélange de paraffines incorporés dans des cloisons de plâtre (figure 1.4). Une fois le mélange effectué, ils obtiennent des parois ayant des propriétés thermiques moyennes



**Figure 1.4:** Exemple de cloison contenant des MCP [64].



Figure 1.5: Paroi et cellules test.

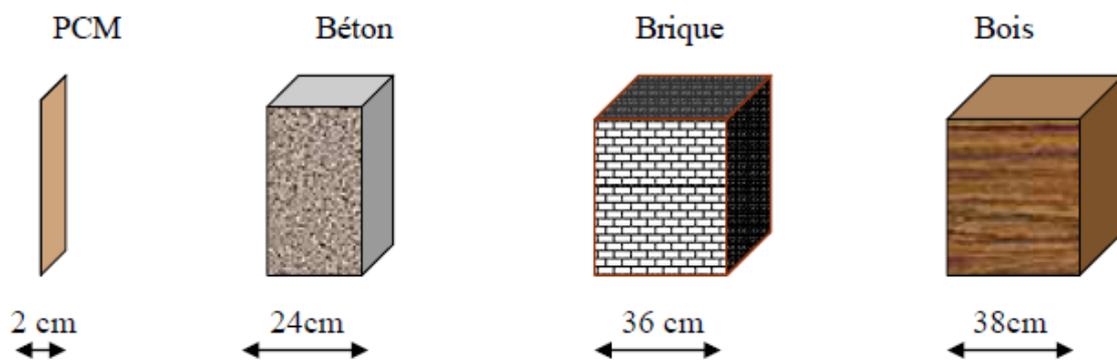
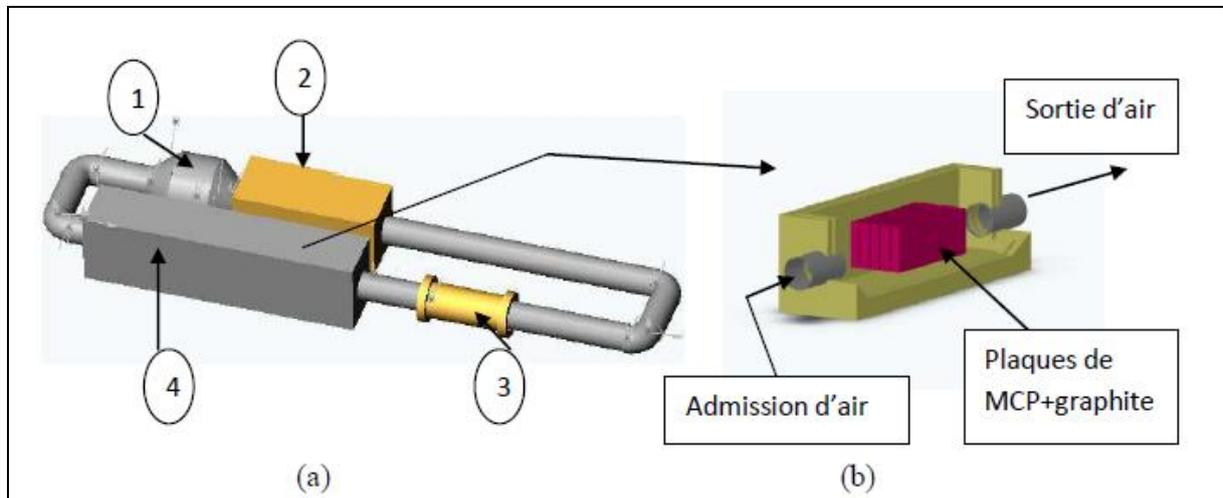


Figure I.6 : Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et la nature du matériau

*Zalba et al [2003] [36]* ont étudié expérimentalement les performances de stockage/déstockage d'une unité de rafraîchissement naturel de bâtiment, constituée d'un échangeur à plaques MCP-air (l'air circule entre les plaques MCP). Après une analyse paramétrique, les auteurs ont prouvé que pour la phase de chauffage (solidification), les grandeurs ayant une influence significative sont l'épaisseur de

l'encapsulation, la température de l'air à l'entrée et le débit de circulation d'air. Les mêmes observations pour le refroidissement (fusion), sauf que la température d'air à l'entrée a une influence plus élevée que l'épaisseur de l'encapsulation.



**Figure 1.7 :** Système actif mis au point par Zalba et al. (a) dispositif expérimental (b) détail du système de stockage d'énergie. (1) ventilateur, (2) dispositif de variation de vitesses, (3) débitmètre, (4) système de stockage d'énergie.

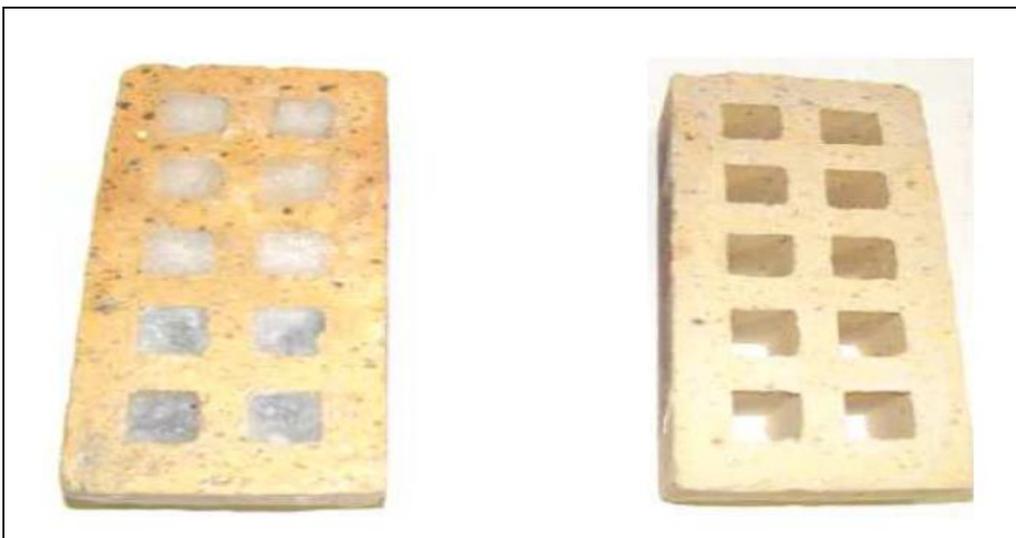
*Alawadhi et Alqallaf [2011]* ont examiné les performances d'une dalle de bâtiment avec des trous coniques verticaux remplies par des matériaux à changement de phase, utilisant la chaleur latente élevée de fusion pour réduire les apports calorifique solaires. Un modèle mathématique par méthode d'éléments finis basé sur la technique de la capacité thermique apparente a été développé. L'étude paramétrique a montré que le MCP (n-Eicosane) a une meilleure adaptation avec une géométrie conique bien déterminé.

*I. Ceron et al. [65]*, ont conçu des tuiles intégrant des MCP (Voir la figure 1.8). Ce prototype de tuile a été testé expérimentalement et les résultats ont prouvé que c'est une solution constructive fiable. Les tuiles équipées de MCP améliorent les performances énergétiques des locaux et régulent la température de la surface intérieure.



**Figure 1.8:** Photographie des tuiles équipées de MCP

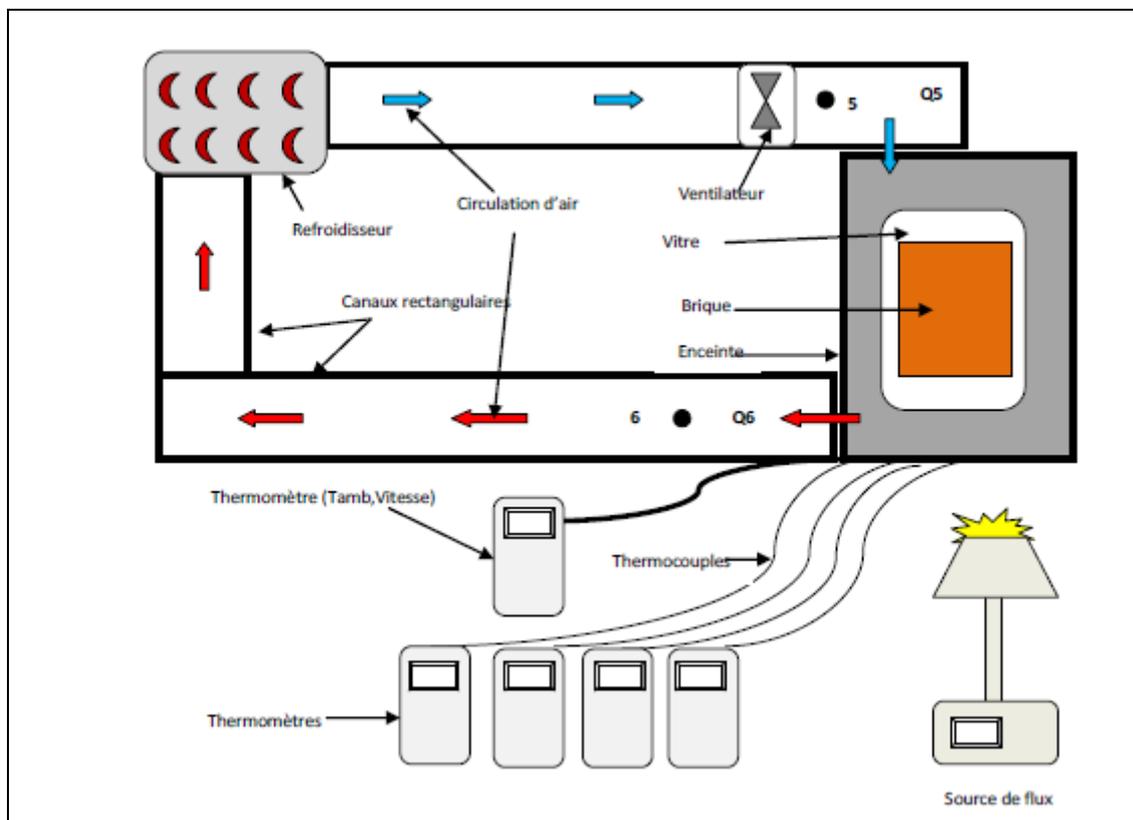
**L. Royon et al.** [35] ont étudié le comportement thermique d'une brique creuse avec et sans paraffine n-Octadécane (figure I.9). Les résultats obtenus confirment que les briques contenant la paraffine améliorent le confort d'été en stabilisant la température du milieu dans lequel elles sont insérées. Ceci permet de faire d'important gain d'énergie en réduisant les besoins en chauffage et en climatisation.



**Figure 1.9:** Photographie d'une brique avec et sans paraffine

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

**Necib et al. [72]** ont étudié le comportement thermique d'une brique remplie d'un matériau à changement de phase (MCP) pour augmenter l'inertie thermique des parois de bâtiments. Cette étude porte sur une brique en argile de 20cm de coté dont les alveolus extérieures ont été remplies de paraffine et où des thermocouples ont été judicieusement implantés. Ce montage expérimental (figure I.5) se limite ainsi à l'analyse des phénomènes de transfert thermique à l'intérieur de la brique. L'analyse des données expérimentales a montré que l'intégration du MCP est avantageuse pour créer un confort thermique. Les résultats de la simulation montrent un fonctionnement similaire à celui révélé par les mesures de la variation de la température dans les essais sur le montage expérimental

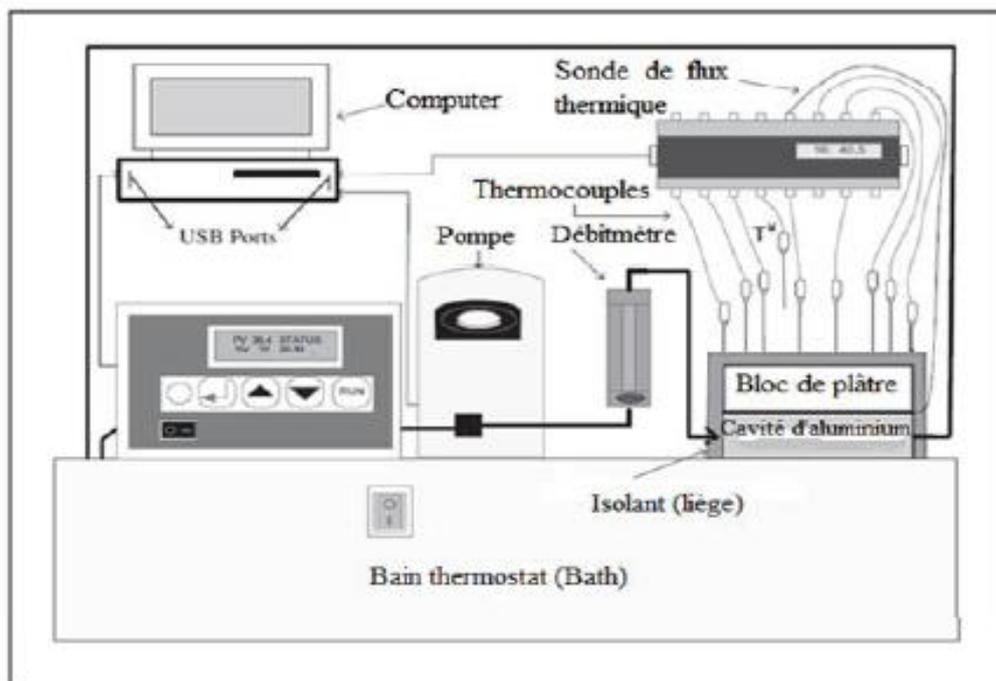


**Figure 1.10.** Principe général du fonctionnement du montage expérimental [72]

**Borreguero et al. [73]** ont réalisé une étude comparative entre l'expérimentale et la simulation numérique sur un bloc de plâtre qui contient trois quantités différents des matériaux de changement de phase (PCMs). L'objectif de cette étude vise à l'évaluation de l'impact de l'isolation par les matériaux à changement de phase sur le confort thermique. L'installation expérimentale considérée est présentée dans la figure

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.3. Il s'agit d'une cavité d'aluminium de dimension (10x6x3 cm) avec une épaisseur de 1mm, sur la quelle on dépose une plaque de plâtre qui contient les matériaux à changement de phase. L'ensemble cavité et plaque de plâtre sont couverts d'une couche de liège de 2cm d'épaisseur afin d'assurer une isolation de système avec le milieu extérieur. La circulation de l'eau chaude dans la cavité est assurée à l'aide d'une pompe hydraulique. Ce débit d'eau apporte une chaleur qui peut être régulé avec un bain thermostatique de telle sorte que la température obtenue varie entre 18°C et 42°C. On remarque, que la stabilité de la température de la surface intérieure est liée au taux du MCP (l'augmentation de la quantité du MCP a un effet positif). En outre, on constate que le bloc contenant 5% de la microcapsule permet la réduction d'épaisseur de plâtre de 8.5%, maintenant le même effet d'isolant. Ainsi, ce genre de matériau peut être employé pour améliorer le confort, économiser l'énergie dans les bâtiments et peut même réduire le poids de panneaux muraux.



**Figure 1.11:** Schéma de l'installation pour l'étude du Comportement thermique des parois [73]

### 2. CONCLUSION :

L'intégration des MCP réduit l'empreinte énergétique des bâtiments. Un large éventail de recherche montre le potentiel d'intégration des MCP dans les bâtiments. De nombreuses études ont balayé un champ très large, allant de la caractérisation des MCP à leur incorporation dans les bâtiments, ainsi que des économies potentielles en énergie. Les MCP ont la capacité de réduire la température maximale de l'environnement intérieur, de réduire les températures excédentaires au-delà de la gamme de confort thermique, d'améliorer les performances énergétiques globales du bâtiment et d'augmenter la résistance thermique comme une couche isolante. Les matériaux de stockage de chaleur latente avec un changement de phase liquide-solide fournissent une solution prometteuse pour le développement des systèmes de stockage thermique efficaces dans les bâtiments.

**Chapitre 2:**  
**Utilisation de MCP**  
**en stockage d'énergie en bâtiment**

### I.1.Introduction :

Un des défis majeurs auquel est confrontée notre société est la gestion de nos ressources naturelles sans provoquer leur épuisement et sans modifier l'environnement de la planète. En particulier, la production d'énergie s'effectue principalement par prélèvement de combustibles sur des gisements de taille limitée dont on peut craindre l'épuisement. D'autre part, la production et la consommation d'énergie contribuent à la modification de l'équilibre thermique à la surface de la terre en produisant des gaz à effet de serre auxquels on attribue le réchauffement actuel de la planète. A cette pollution thermique vient également s'ajouter une pollution physique ou chimique par les déchets.

L'énergie était toujours le moteur de l'activité humaine, les énergies jouent un rôle significatif dans le développement des secteurs technologiques, industriels, économiques et sociaux mais le monde entier est confronté à une augmentation de la consommation énergétique d'une façon excessive. Par ces consommations conduisent à l'important changement climatiques, les enjeux énergétiques deviennent cruciaux.

En attendant la mise au point de techniques permettant la production d'énergie écologique et renouvelable, en importante quantité et économique, beaucoup de pays sont mobiliser à trouver une solution pour réduire la consommation d'énergie et diminuer tous types de pollution, Cependant, les sociétés contemporaines exigent un niveau d'hygiène et de confort qui nécessite une consommation et une production d'énergie importantes.

Une des voies qui est explorée consiste à rechercher et à utiliser de nouvelles technologies sobres et propres, qui ne conduisent ni à l'épuisement des ressources ni à la modification de l'environnement et permettent un développement durable.

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus dynamiques dans les pays émergents, résultat d'un rythme élevé de croissance de la population et d'urbanisation. L'Algérie ne fait pas exception, dont la croissance de sa population est spectaculaire, passant de 7.4 millions d'habitants en 1970 à 42 808 002 en 2019 [74]. Par conséquent, la demande de logements augmente considérablement et fait de la construction l'un des principaux moteurs de la croissance du pays. La consommation énergétique, dans le secteur du bâtiment résidentiel algérien représente 35% du total de

l'énergie, tous secteurs confondus<sup>1</sup>. En outre, d'après les projections de référence de l'Observatoire Méditerranéen de l'Énergie (OME), la consommation d'électricité a plus que triplé au cours des trois dernières décennies et que cette tendance se poursuivra d'ici à 2025.

### **I.2. Stockage de l'énergie :**

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie fait souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques, surtout dans les pays fortement dépendants de l'étranger.

Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie.

Dans le cadre de la maîtrise des dépenses énergétiques, les efforts fait dans le secteur de bâtiment en agissant sur l'isolation des parois extérieures, la ventilation, le chauffage, les apports solaires et la climatisation.

Fondamentalement, il existe trois principales méthodes de stockage de l'énergie thermique: le stockage par chaleur sensible e, par chaleur latente et thermochimique.

#### **I.2.1. Stockage par chaleur sensible :**

Le stockage de l'énergie est le moyen le plus ancien utilisé pour emmagasiner de l'énergie sur durée plus au moins longues [1].

Dans ce stockage de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide où d'un liquide, la température varie avec la quantité d'énergie stockée [2]. Ce stockage, non isotherme accumule une quantité de chaleur proportionnelle à sa masse et sa capacité calorifique telle que présentée dans l'équation [1.I]:

$$E_{sensible} = m c_p \Delta T = m c_p (T_f - T_i) \quad [J] \quad [1.I]$$

Avec **m** : masse du matériau utilisé [Kg]

$C_p$  : chaleur massique du matériau utilisé [J/Kg.K]

$\Delta T$  : Différence entre température moyennes finale et initiale du stockage [K]

$T_i$  : température initiale du stockage [K]

$T_f$  : température finale du stockage [K]

Il est donc utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. Mais ces matériaux doivent avoir d'autres propriétés comme une stabilité à long terme lors des recyclages thermiques, la comptabilité avec le récipient de stockage et également un coût raisonnable.

Il existe un classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en particulier de son état physique. On définira ainsi [3] :

- Stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus)
- Stockage par un solide (pierre, métaux.....)

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau 2.1

**Tableau 2.1** : Caractéristique des matériaux utiliser au stockage de chaleur sensible

Matériaux	Densité (Kg/m3)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)	Capacité thermique volumétrique (J/m3.K)
Argile	1458	879	1.28
Brique	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
Terre	7900	452	3.57

<b>Acier</b>	7840	465	3.68
<b>Eau</b>	988	4182	4.17

### **I.2.1.1. Stockage par fluide :**

- **Par l'eau :**

- a- Avantages de l'eau**

L'eau est le meilleur milieu pour le stockage aux faibles températures. Elle a la capacité thermique massique la plus grande par rapport aux autres corps (4 185 J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> à 20 °C).

Ainsi, pour une variation de température de 60°C, l'eau peut stocker 250 kJ/kg ou  $2.5 \times 10^5 \text{ KJ/m}^3$

De plus, l'eau n'est pas chère et facilement disponible. Cependant, à cause de sa grande pression de vapeur, pour les applications à haute température, elle demande une isolation coûteuse et un réservoir de stockage qui résiste aux fortes pressions. L'eau est utilisable non seulement comme milieu de stockage mais aussi comme milieu de transport de l'énergie. Actuellement, l'eau chaude est le vecteur le plus utilisé dans les systèmes d'applications de l'énergie solaire. Elle est utilisable dans un domaine de températures allant de 25 à 90°C.

### **I.2.1.2. Autres fluides [5] :**

- a- Les fluides usuels :**

Les liquides autres que l'eau utilisés pour le stockage par chaleur sensible sont généralement des huiles organiques ou des sels fondus. Leurs capacités thermiques massiques sont de l'ordre de 25 à 40 % de celle de l'eau.

Huiles organiques : Elles ont une pression de vapeur plus faible que celle de l'eau, elles peuvent être utilisées à des températures supérieures à 300 °C mais inférieures à 350 °C pour éviter leur décomposition.

Sels fondus : Le plus courant est l'hydroxyde de sodium. Il a un point de fusion de 320°C et il est possible de l'utiliser à une température supérieure à 800°C. Mais, il est fortement corrosif et il est difficile à stocker à fortes températures.

Les métaux liquides peuvent être un moyen de stockage par chaleur sensible. La plupart de leurs propriétés sont similaires à celles de l'eau. Ces liquides ont une grande

conductivité thermique, ils ont en commun avec les huiles organiques une faible chaleur spécifique et une forte possibilité de réagir avec le réservoir.

De nombreux fluides peuvent être utilisés pour des besoins de stockage. Une revue intéressante bien qu'ancienne, permet de montrer la diversité des produits envisageables entre 100 et 235 °C

### **I.2.1.3. Stockage par solide :**

Les pierres, les métaux, le béton, le sable et la brique sont les matériaux généralement utilisés pour le stockage thermique aux faibles et hautes températures parce qu'ils ne peuvent ni se congeler ni entrer en ébullition. Les difficultés dues à la grande pression de vapeur dans le stockage par l'eau et les autres liquides, conduisent à stocker la chaleur sensible à l'aide d'un solide en éliminant les risques de fuite [6].

Le stockage par les pierres : Les pierres peuvent servir à stocker l'énergie solaire et ce stockage est bien adapté à l'utilisation dans le bâtiment. Ce type de stockage est utilisé pour des températures supérieures à 100°C en conjonction avec le chauffage solaire de l'air. Les pierres et les cailloux peuvent même être utilisés à des températures supérieures à 1000°C.

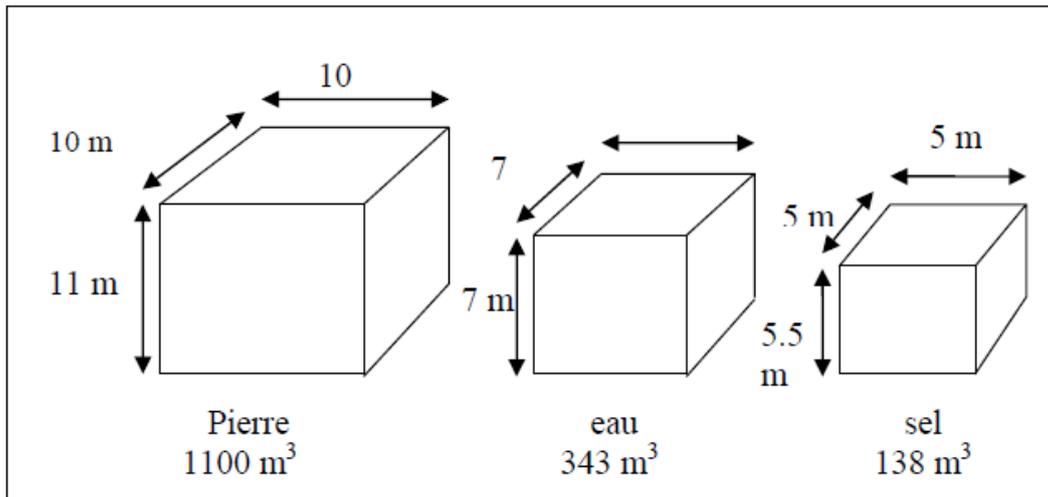
Le stockage et la récupération de l'énergie thermique se faisant à l'aide d'un flux d'air, la taille des pierres est alors un facteur de choix important. Cette taille peut varier de 1 cm à 10- 15 cm. Il semble que les tailles optimales soient comprises entre 1 et 5 cm . De plus, l'uniformité du volume des pierres peut poser un problème vis à vis de la quantité d'air nécessaire. Dans le cas d'une grande dispersion des volumes, les petites pierres vont remplir les vides entre les grandes pierres modifiant ainsi la quantité d'air nécessaire. Un autre problème important est dû à la condensation qui favorise la croissance des bactéries.

Les ordres de grandeurs sont les suivants :

- Pour une variation de la température de 50°C, les pierres et le béton peuvent stocker de l'ordre de 36 kJ/kg ou 105 kJ/m<sup>3</sup>.
- En première approximation, on peut dire que 1 m<sup>2</sup> de collecteur solaire pour une application de chauffage nécessite de 300 à 500 kg de stockage.

En général le stockage par les pierres nécessite un plus grand volume que le stockage par l'eau. Sur la figure 1.2 on compare les volumes nécessaires au stockage d'une

même quantité d'énergie thermique pour un même écart de température par trois types de corps [7]



**Figure 2.1:** Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie

### I.2.2. Stockage par chaleur latente :

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande densité d'énergie,

ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase.

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit [2.I]:

$$Q = m(h_f - h_i) = m\Delta h_f \quad [2.I]$$

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

Généralement, il faut porter le matériau initialement à  $T_i$  à sa température de fusion  $T_f$  et l'on écrit [3.I]:

$$Q = m(h_f - h_i) = mc_p(T_f - T_i) + m\Delta h_f \quad [3.I]$$

Avec **m** : masse du matériau utilisé [Kg]

**C<sub>p</sub>** : chaleur massique du matériau utilisé [J/Kg.K]

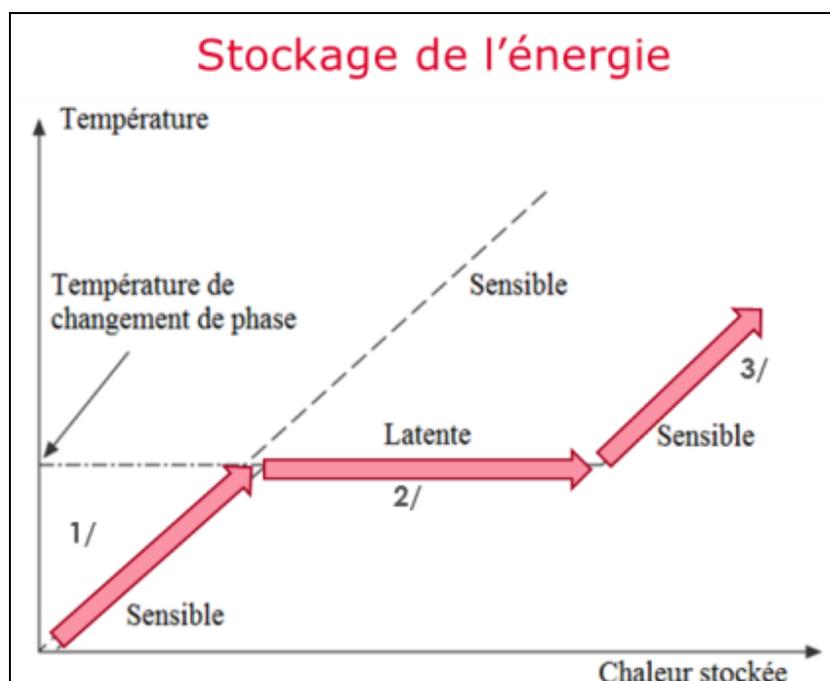
$T_i$ : température initiale du stockage [K]

$T_f$ : température de fusion du stockage [K]

On remarque donc que:

(i) - La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de température pas trop important).

(ii) - Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les Matériaux à Changement de Phase (MCP).



**Figure 2.2:** Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

### 1.2.2.1. Les systèmes de stockage de l'énergie thermique par chaleur latente :

Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente :

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement,

- que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié,
- un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature,
- une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

### **I.2.2.2. Avantages du stockage par chaleur latente :**

Par rapport au stockage par chaleur sensible, les principaux avantages du stockage par chaleur latente peuvent être résumés ainsi:

- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.

### **I.2.3. Stockage thermochimique :**

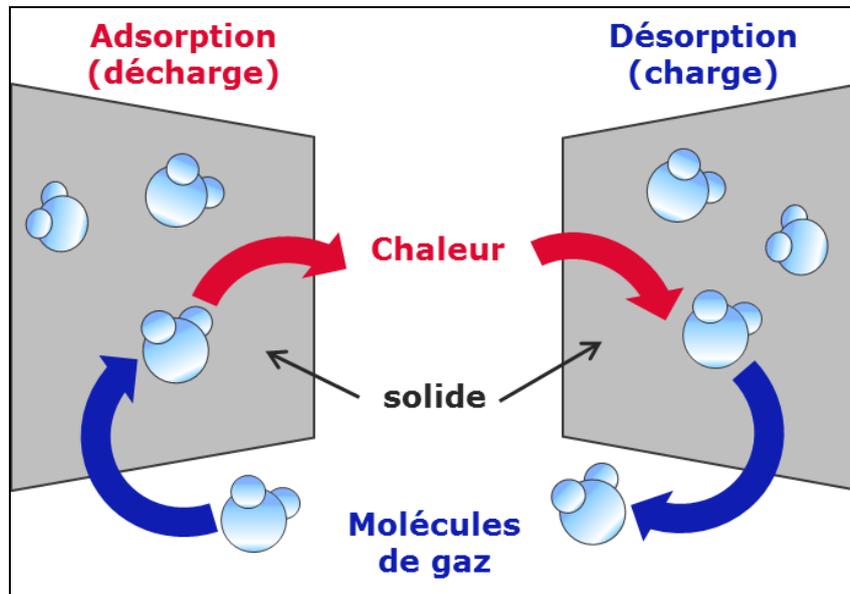
Stocker la chaleur fatale récupérée afin de permettre une utilisation décalée dans le temps. Le stockage thermique par voie thermochimique exploite la réversibilité d'une réaction (adsorption-désorption ou chimique) qui est, selon le sens de la réaction considérée, soit endothermique soit exothermique [1].

#### **I.2.3.1. Stockage par Adsorption/Désorption**

Les systèmes à adsorption mettent en jeu un couple solide/gaz. Les principaux matériaux adsorbants sont des matériaux poreux à grande surface spécifique tels que les gels de silice, les alumino-phosphates, les silico-phosphates et les zéolithes.

L'adsorption correspond à la fixation des molécules de gaz à la surface du solide. Ce phénomène est exothermique, donc restitue de la chaleur (décharge de l'énergie). La désorption correspond à la libération des molécules de gaz de la surface du solide. Ce phénomène est endothermique, donc consomme de la chaleur (stockage de l'énergie).

Le schéma ci-dessous présente le principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption :



**Figure 2.3 :** Principe du stockage de l'énergie par adsorption/désorption.

#### **I.2.3.2. Stockage par voie chimique :**

Les systèmes chimiques mettent en jeu une réaction chimique réversible entre un solide et un gaz. Il s'agit généralement de réactions entre différents sels et de l'eau (hydrates). Il est possible d'associer les matériaux réactifs (sels) à une matrice (plastique, cuivre, sable...), afin d'améliorer les paramètres de transfert thermique et/ou massique et parfois la stabilité et la durabilité du matériau dans le temps.

Les réactions chimiques envisagées sont de la forme suivante :



Lors de la phase de décomposition/dissociation du produit AB [8,9,2], l'énergie thermique Q permet de mettre en œuvre la réaction endothermique. C'est l'étape de charge de l'énergie. La réaction réversible est exothermique et correspond à la phase de formation/restitution. Les produits A et B sont mis en contact afin de régénérer le produit initial AB et restituer une quantité de chaleur Q. C'est l'étape de décharge de l'énergie.

➤ Les avantages de chaleur thermochimique :

Le stockage de chaleur par voie thermochimique offre plusieurs avantages par rapport aux deux autres systèmes de stockage (sensible et latent) :

- ✓ la densité énergétique est respectivement 5 à 10 fois plus importante que pour des systèmes de stockage par chaleur latente ou par chaleur sensible ;
- ✓ stockage de chaleur jusqu'à 250°C ;
- ✓ la restitution de la chaleur peut se faire à température constante ;
  - la durée de stockage et la distance de transport des réactifs sont théoriquement illimitées, puisque les produits peuvent être stockés à température ambiante (aucune perte thermique). C'est le seul procédé de stockage de chaleur qui permet de réaliser un stockage "inter-saisonnier", c'est à dire, stocker l'énergie l'été pour la restituer l'hiver.

La technologie a été prouvée au niveau pilote industriel pour les applications de récupération de chaleur fatale dans l'industrie.

### **I.3.Comparaison des systèmes de stockage :**

Les systèmes de stockage sont utilisés selon trois types : charge, stockage et déstockage. Six paramètres fondamentaux ont été choisis pour comparais les types de stockage : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre des systèmes [9]

Le tableau suivant compare les différents systèmes de stockage applicables à la récupération de chaleur fatale industrielle : stockage par chaleur sensible, par chaleur latente, et le stockage thermochimique.(Voir tableau 2.2)

Pour sélectionner le type de stockage, il conviendra de regarder pour quelle application il sera mis en œuvre. Par exemple, les systèmes latents et sensibles seront plutôt utilisés comme stockage tampon pour lisser la production ou différer l'utilisation de l'énergie. Alors que les stockages thermochimiques seront plus adaptés à un stockage de long terme ou inter saisonnier qui emmagasinerait la chaleur produite en excès par certaines installations l'été pour la restituer l'hiver. Dans le cadre de cette thèse, c'est la valorisation de la chaleur fatale industrielle en interne qui a été retenue. L'échelle de temps est donc plutôt celle de la journée et non de la saison.

Par ailleurs, chaque système de stockage a un degré de maturité différent. Les systèmes de stockage sensible ont été expérimentés dans de nombreux prototypes ou à l'échelle d'une centrale solaire, comme le détaillent *Medrano et al.* La technologie du

chauffe-eau sanitaire est particulièrement mature. Cependant, lorsque les niveaux de température dépassent 100 °C, le stockage par chaleur sensible nécessite encore un effort de R&D pour améliorer la tenue des matériaux, les aspects corrosion ou augmenter la stratification thermique dans les réservoirs. Les Matériaux à Changement de Phase sont mis en œuvre dans des applications pilotes qui émergent peu à peu dans le domaine du stockage thermique. On peut notamment citer l'exemple du projet ITES qui met en place un prototype de stockage latent utilisant du NaNO<sub>3</sub>, combiné à un étage sensible pour une centrale solaire à génération directe de vapeur [3]. De nombreux efforts de recherche perdurent cependant pour déployer de tels systèmes à échelle industrielle. Par ailleurs, de par sa grande densité énergétique, le stockage thermochimique est prometteur mais n'est pour l'instant envisagé qu'à l'échelle du laboratoire étant donné la complexité de mise en œuvre. De nombreuses recherches sont en cours pour développer de tels systèmes. Voir le **tableau 2.2**

**Tableau 2.2** : comparaison entre les trois systèmes de stockage

		Stockage par chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie thermochimique
Densité d'énergie	Volumétrique	Faible 15-60 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 50-100 kWh/m <sup>3</sup>	Elevée 100-500 kWh/m <sup>3</sup>
	Massique	Faible 0.02- 0.03 kWh/Kg	Moyenne 0.05-0.1 kWh/Kg	Haute 0.5-1 kWh/Kg
Température de stockage		Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge	Température de l'étape de charge
Durée de stockage		Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
Transfert de		Faible	Faible	Distance

l'énergie		distance	distance	théoriquement
Maturité		Echelle industrielle (20MWe)	Echelle pilote (100Kwh)	Echelle laboratoire (1-5kWh)
Technologie		Simple	moyenne	Complexe

D'un point de vue économique, l'évaluation nécessite de prendre en compte les coûts d'investissement mais aussi d'exploitation, de maintenance et de recyclage. Ces coûts varient souvent en fonction du volume de stockage. La densité énergétique, c'est-à-dire la quantité d'énergie stockable par unité de volume, est ainsi un critère primordial. Pour le stockage sensible, c'est le produit de la capacité calorifique, du gradient de température ainsi que de la masse volumique qui permet de calculer cette grandeur. Pour comparer les matériaux, un gradient de 100 °C a volontairement été utilisé, à part pour l'eau qui ne peut pas être utilisée sur une plage de 100 °C. Pour le stockage latent, la chaleur latente est multipliée par la masse volumique. Pour le stockage thermochimique, enfin, la chaleur de réaction divisée par la masse molaire de produit permet de calculer la densité énergétique.

Les densités énergétiques obtenues mais aussi les températures de fonctionnement de chaque système de stockage thermique sont présentées pour quelques matériaux dans le **Tableau 2.3**

**Tableau 2.3:** Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique

Stockage sensible	Température (°C)		Capacité calorifique $C_p$ (KJ/Kg.K)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Densité énergétique (KWh/m <sup>3</sup> )
	Froid	chaud			
Sable-roche-huile minérale	200	300	1.3	1700	61
Béton renforcé	200	300	0.85	2200	52
Huile minérale	200	300	2.6	770	56
Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latent	Température de fusion °C		Chaleur latente (KJ/kg)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Densité énergétique (KWh/m <sup>3</sup> )
Acide maléique	131-140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
Erythritol	118		340	1450	137
MgCl <sub>2</sub> , 6H <sub>2</sub> O	117		165	1569	72
NaNO <sub>3</sub>	307		172	2260	108
Stockage thermochimique	Température de réaction		Enthalpie de réaction (KJ/mol)		Densité énergétique (KWh/m <sup>3</sup> )
	Charge	Décharge			
$MgH_2 + \Delta Hr \leftrightarrow Mg + H_2$	380 à	230 à	-75		430
$CaCO_3 + \Delta Hr \leftrightarrow CaO + CO_2$	1bar	4bar	-178		110
$MgH_2 + \Delta Hr \leftrightarrow Mg + H_2$	700	650	-94.6 (charge)		300
	450	25-400	64.8 (décharge)		

Le stockage sensible présente une densité énergétique variant de 52 à 76 kWh/m<sup>3</sup> pour les matériaux sélectionnés. Il est à noter cependant que dans ce calcul, seul le volume de matériau est pris en compte. Un lit fixe granulaire ou matriciel est utilisé pour que le fluide caloporteur puisse traverser directement le matériau de stockage. Ainsi, pour être plus représentatif du volume occupé par le système de stockage, il

convient de prendre en compte le volume réel de la cuve. Par exemple, en prenant une porosité de 0.6, qui peut être rencontrée dans le cas des systèmes roche + sable + huile thermique, la densité énergétique initialement à  $61 \text{ kWh/m}^3$  de matériau tombe alors à  $36.6 \text{ kWh/m}^3$  de cuve. Si l'on veut augmenter cette densité énergétique, il est possible d'augmenter le gradient de température. Cependant, les matériaux ont la plupart du temps une température maximale d'utilisation à ne pas dépasser. Les huiles minérales, bien que relativement peu coûteuses ont une température de dégradation qui limite leur utilisation à des températures inférieures à  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les huiles synthétiques ne peuvent, quant à elles, pas être utilisées au-delà de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  et présentent des problèmes de toxicité. Par ailleurs, les nitrates de sels fondus ont une température de dégradation très élevée, mais une température de solidification élevée également (de  $120$  à  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ce qui impose une maîtrise parfaite des conditions thermiques de l'installation, afin d'éviter les points froids dans l'installation où pourraient se solidifier les sels. Leur caractère corrosif limite par ailleurs leur usage. D'autres systèmes de stockage sensible ont une grande densité énergétique. C'est le cas, notamment des rebus métalliques, comme l'acier ou le fer, non présentés dans ce tableau, dont la densité énergétique peut atteindre des valeurs de  $400 \text{ kWh/m}^3$  sur une plage de température de  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , notamment grâce à leur masse volumique élevée ( $7200 \text{ kg/m}^3$  pour les rebus de fer et  $7800 \text{ kg/m}^3$  d'acier). Cependant, leur coût très élevé limite leur développement et leur rentabilité.

Pour le stockage latent, des densités énergétiques entre  $72$  et  $137 \text{ kWh/m}^3$  de matériau sont relevées dans le tableau. Les volumes de stockage peuvent ainsi être réduits en utilisant les MCP ce qui implique une réduction des coûts et constitue un premier avantage en comparaison avec le stockage sensible. Un autre avantage réside dans la restitution de la chaleur à température constante. En effet, la quantité d'énergie stockée et restituée dépend uniquement de la masse du matériau et de sa chaleur latente. En toute théorie, avec les MCP, la chaleur est restituée à la température de fusion du matériau. On s'affranchit alors du niveau de température du fluide caloporteur, même si un minimum de gradient de température est nécessaire entre le fluide caloporteur et la température du MCP pour garantir le transfert de chaleur. Souvent, le gradient de température entre le fluide caloporteur et la température de

fusion est de l'ordre de 15 °C. Par ailleurs, étant donné les résistances thermiques de transfert qui existent entre le fluide caloporteur, la surface d'échange et le MCP, le fluide caloporteur sort en réalité à une température légèrement plus faible que la température de fusion en décharge. Enfin, les MCP présentent l'avantage de pouvoir aussi être utilisés comme matériau de stockage sensible.

## **II. Matériaux de changement de phase MCP:**

Les Matériaux à Changement de Phase, appelés communément « MCP », sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à celle-ci [10].

Ils ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. Le stockage de chaleur latent de MCP peut être réalisé par le changement solide-solide, de solide-liquide, de solide-gaz et de phase de liquide gaz. Cependant, le seul changement de phase utilisé pour des MCP est le changement de solide-liquide. Les changements de phase de Liquide-gaz ne sont pas pratiques pour l'usage en tant que stockage thermique dû aux grands volumes ou pressions exigés pour stocker les matériaux dans leur phase gazeuse. Les transitions de Liquide-gaz ont une chaleur plus élevée de transformation que des transitions de solide-liquide.

### **II.1.Historique des MCPs**

Depuis le premier choc pétrolier des années 70, des études sur les MCP ont été entreprises avec les sels hydrates. Ils étaient testés initialement pour stocker l'énergie solaire. Or, de nombreux problèmes se sont présentés et la communauté scientifique se rendit rapidement compte que ce type de MCP ne pouvait être utilisé. Les principaux problèmes rencontrés étaient :

- La toxicité ;
- Une mauvaise transition de phase ;
- La propension à la surfusion ;
- Un mauvais conditionnement (poches, capsules, barres, ...) ;
- La durée de vie très faible (limitation du nombre de cycles).

Beaucoup de ces des avantages ont mis à l'écart l'étude de ces matériaux. Ce n'est que dans le cadre du Grenelle de l'Environnement qu'un intérêt nouveau s'est manifeste, avec de nouvelles substances et de nouveaux modes de conditionnement. En effet, l'apparition de nouveaux MCP solide/liquide à forme stabilisée a permis de relancer les applications dans de nombreux domaines.

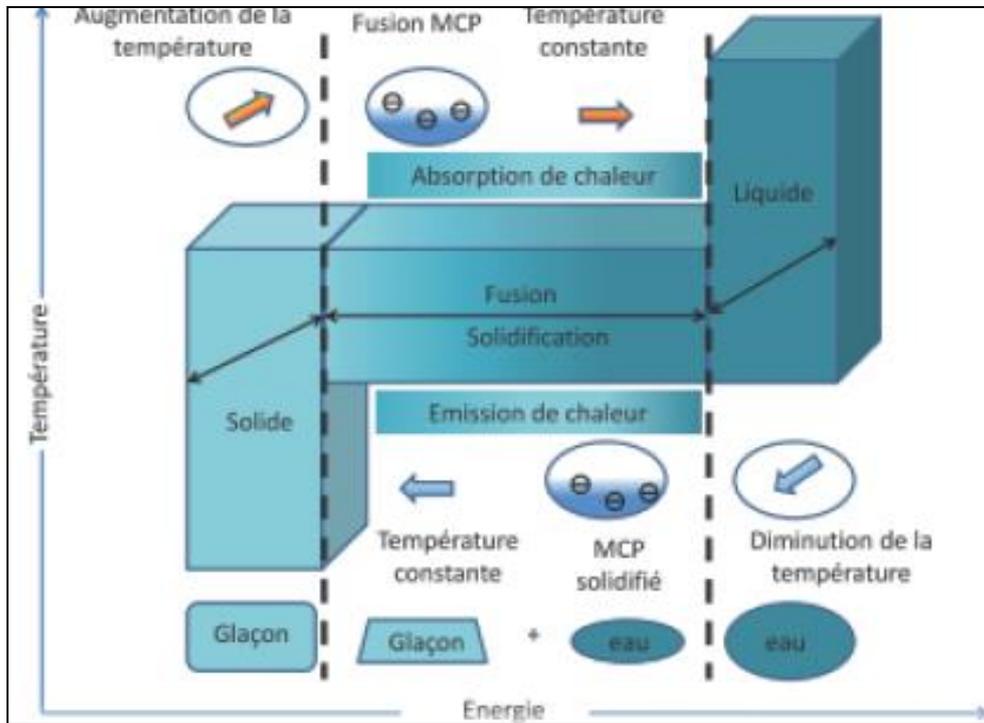
La majorité des MCP a forme stabilisée sont des composites comportant une matrice solide inerte dont la porosité est remplie par le MCP. Cette matrice inerte assure la stabilité structurelle de l'ensemble et évite l'écoulement de la phase liquide du MCP à travers le conteneur .A basse température (< 120 °C). D'après Atul et al. (2007) [11] ainsi que Kherrouf et al. (2008) [12], il existe quatre types de transformations de MCP : gaz/liquide, gaz/solide, solide/solide et solide/liquide. Voir le **tableau 2.4**

**Tableau 2.4** : Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état [16]

<b>Changement de phase</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Liquide/Gaz</b>	Grande valeur de la chaleur latente	Grande changement de volume
<b>Solide/solide</b>	Faible changement de volume. Pas de formation de fluide	Faible valeur de la chaleur latente
<b>Solide/Liquide</b>	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente
<b>Solide/Gaz</b>	Grande valeur de la chaleur latente	Grande changement de volume

Dans les systèmes de stockage d'énergie pour les bâtiments, on utilise en général les transformations solide/liquide parce qu'elles ont des enthalpies de changement de phase élevées (quoi qu'en générale inférieures à celles des

transformations gaz/solide et gaz/liquide) et des expansions volumiques réduites (<10%) lors de la fusion.



**Figure 2.4 :** Principe de fonctionnement des MCP [14]

### II.2.Choix d'un MCP :

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [15]:

#### II.2.1 - Critères thermodynamiques :

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur)
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative
- Une fusion congruente
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition

### **II.2.2- Critères cinétiques :**

- Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion
- Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiqué par les tables thermodynamiques.

### **II.2.3- Critères chimiques :**

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable
- Aucune action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur contenant

Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif

### **II.2.4- Critères physiques :**

- Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression
- Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible
- Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé

### **II.2.5- Critères de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux:**

- Stabilité du corps lors des cycles thermiques.
- Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

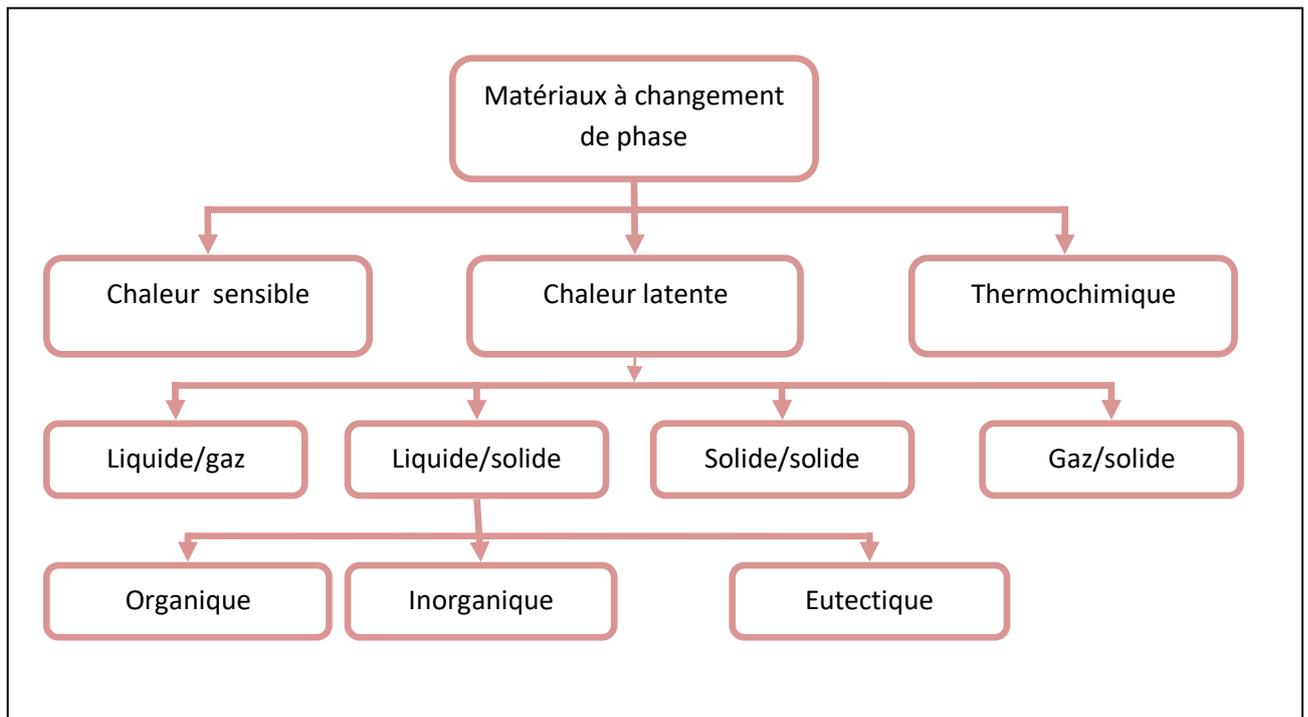
### **II.2.6- Critères économiques :**

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité
- A bon marché

### II.3. Classification des matériaux à changement de phase :

En 1983, Abhat [18] a donné une classification générale des matériaux, utilisée depuis par la communauté scientifique du stockage latent. Cette classification est illustrée sur la Figure 2.5.



**Figure 2.5 :** Classification des MCP proposée par Abhat [18]

### II.4. Différents Types des MCPs :

Les MCP s sont classé en trois types [17] :

- Organique : paraffine, non paraffine
- Inorganique : hydrates de sels, sels, métaux
- Eutectique : organique-organique ; inorganique-inorganique ; inorganique-organique

#### II.4.1- MCPs organiques :

Les MCPs organiques sont des matériaux organiques sont constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes [19], ils sont extraits à partir du pétrole brut, soit synthétisés par un procédé chimique ou intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure . On trouve principalement dans les composés organiques : les paraffines, les alcools de sucre, les acides gras et autre moins utilisé.

### i. Paraffine :

Ils sont constitués d'hydrocarbure saturés à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne, les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisés par leur point de fusion entre  $-10^{\circ}$  à  $100^{\circ}$  C.

Elles sont inodores, non toxique et sans saveur, Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante [22]. Les avantages des paraffines sont :

- Disponibilité dans un large intervalle de température
- Bonne chaleur latente
- Peu ou pas de surfusion
- Compatibilité avec des matériaux conventionnels de construction
- Pas de ségrégation
- Stable chimiquement
- Recyclable

Leurs Inconvénient majeurs [3]:

- Faible conductivité thermique à l'état solide (problème de puissance transférée)
- Inflammable



**Figure 2.6:** Paraffine brutes, en capsulées, en poudre ou en granulés

Le tableau 2.5 permet d'apprécier les variations des propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire [20]

**Tableau 2.5 : les variations des propriétés physiques de quelques paraffines**

	Paraffine			
	Tétradécane	Hyxadécane	Octadécane	Eicosane
<b>Formule</b>	$C_{20}H_{42}$	$C_{20}H_{42}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{20}H_{42}$
<b>Température de fusion °C</b>	5.5	16.7	28	36.7
<b>Enthalpie de fusion (KJ/Kg)</b>	226	237	244	247
<b>Conductivité thermique (KJ/Kg °C)</b>	0.15	0.15	0.15	0.15
<b>Capacité thermique massique (KJ/kg °C)</b>	2.07	2.11	2.16	2.21
<b>Masse volumique solide (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	825	835	814	856
<b>Masse volumique liquide (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	771	776	774	778
<b>Retard à la solidification (°C)</b>	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
<b>Pression de vapeur(Pa)</b>	133 à 75° C	133 à 105° C	133 à 75° C	133 à 100° C
<b>Tension superficielle (N/m)</b>	$27.4 \times 10^{-3}$	3.4	$27.4 \times 10^{-3}$	-
<b>Viscosité (Cp)</b>	2.1	-	3.4	-

**ii. Composés non paraffiné :**

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux après pour le stockage de la chaleur latente [32], [17] ont mené une recherche approfondie sur les matières organiques et ont identifié un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols convenables pour le stockage de l'énergie.

Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants. Dans le [tableau 2.6] des composés organiques non paraffiniques sont donne à titre d'exemple avec des propriétés thermo physiques.

**Tableau 2.6 :** Propriétés thermo physique des matières organiques non-paraffiniques.

<b>Matériaux</b>	<b>Point de fusion (°C)</b>	<b>Chaleur latent de fusion (kJ/kg)</b>
Acide formique	7.8	247
Acide caprylique	16.3	149
Glycérine	17.9	198.7
Acide D-lactic	26	184
Méthyle palmitate	29	205
Camphenilone	39	205
Docasyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120

Heptadécane	41	201
1-Cyclohexyloctadécane	41	218
4-Heptadécane	41	197

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes :

✓ **Acides gras**

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Les acides gras ont la formule chimique générale suivante :  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ . Comme il est facile de les imprégner ou de les incorporer directement dans les structures conventionnelles, ils sont considérés comme de bons candidats pour les applications concernant la structure des bâtiments

✓ **Esters d'acides gras**

Ces matériaux sont produits par une estérification directe des acides gras séparés des huiles végétales. Les esters d'acides gras comme le stéarate de butyle, le stéarate de vinyle et le méthyle-12 hydroxystéarate peuvent être utilisés pour le stockage passif de la chaleur. Le palmitate d'isopropyle ainsi que l'isopropyle stéarate peuvent être utilisés dans les pays chauds comme matériaux de stockage

#### **II.4.2- MCPs inorganiques :**

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories :

- Les sels,
- Les hydrates de sels
- Les métaux.

Ils ont les propriétés suivantes:

- Une grande chaleur de fusion par unité de volume,
- Une grande conductivité thermique (environ le double de celle des paraffines organiques),
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase,
- Une bonne compatibilité avec le plastique,

- Une certaine toxicité,
- Une certaine corrosivité,
- Trois comportements lors de la fusion : fusion congruente, semi-congruente et Non congruente,
- Un coût variable

Les **problèmes principaux** concernant la plupart des hydrates salins sont [6] :

- La surfusion (ou sous –refroidissement) :

On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.

- La ségrégation de phase

Le tableau 2.7 résume les principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques.

**Tableau 2.7 : Caractéristiques des hydrates salins**

Hydrates salins	La température de fusion (°C)	La chaleur de fusion (kJ/kg)
Sel de Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	32.4	252
Chlorure de calcium Hexahydrate $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	170 à 264
Hydroxyde de Barium octahydrate $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78	301
$\text{NH}_4 \cdot \text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate $\text{Na}_3 \cdot \text{PO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de Capsules (Calortherm 70)	70	184

Carbonate de sodium déca hydrate Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate Ca (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	40-43	140

**II.4.3-Les eutectiques :**

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps MCP purs, ont des températures de fusion précises, mélanges de MCP organique et inorganique.

Ils ont deux principaux avantages : ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumiques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs

Les deux 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

**Tableau 2.8** : Une liste de quelques Eutectiques

<b>Eutectiques inorganiques</b>	<b>Point de fusion (°C)</b>	<b>Chaleur latente de fusion (kJ/kg)</b>
49,3% MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O + 50,7% Mg(NO <sub>3</sub> ).6H <sub>2</sub> O	58	132.3
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (32,5%) H <sub>2</sub> O (41,4%), NaCl (6,66%), NH <sub>4</sub> Cl (6,16%)	13	146
61,5% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> H <sub>2</sub> O + 38,5% NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	51	131.1
58,3% Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> H <sub>2</sub> O + 41,7% MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	58	106
CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O + CaBr <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	14	140
<b>Eutectiques Organiques</b>		

## UTILISATION DES MCP EN STOCKAGE D'ENERGIE EN BATIMENT

---

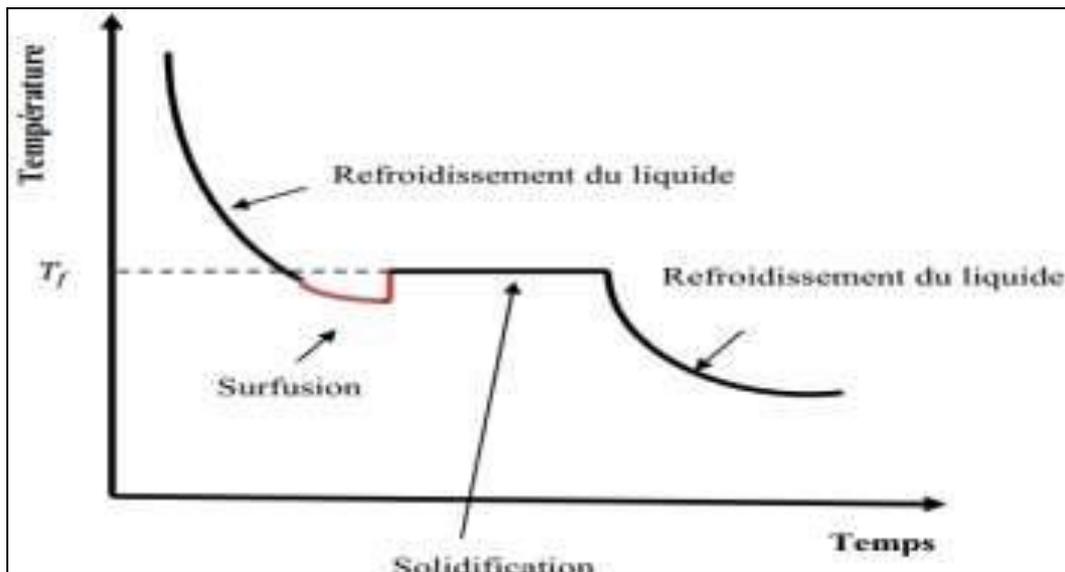
Acides Caprique –Laurique	18	120
Acides Palmitique – Laurique	33	143
Acides Stéarique – Laurique	34	150

## II.5. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage :

### II.5.1-Surfusion :

- ✓ La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation [figure.2.7]. Elle n'apparaît que pour certains types de MCP comme les matériaux inorganiques (des sels hydratés).

La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température voulue.



**Figure 2.7 :** Solidification présentant une surfusion.

### II.5.2-Dilatation :

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on Utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression [26].

### II.5.3-Surchauffe :

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système. Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible [26].

### **II.6. Conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :**

Le conditionnement des MCP pour les applications dans les dispositions et systèmes de stockage thermique doit obéir à certaines exigences :

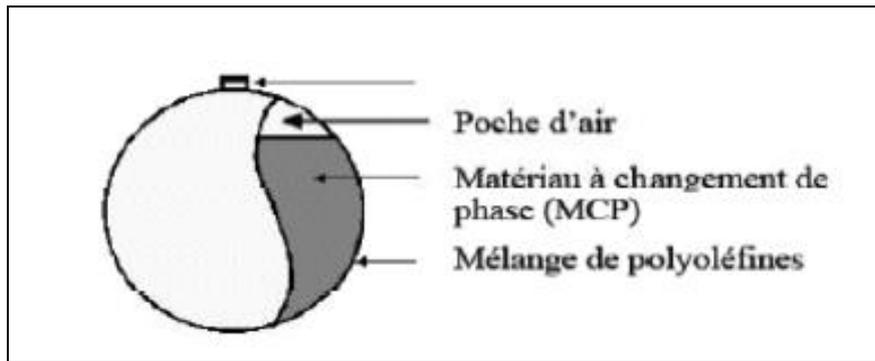
- Le matériau du conteneur de conditionnement doit être compatible avec le MCP et ne doit subir ni oxydation, ni ramollissement ou toutes autres dégradations
- Le conteneur de conditionnement doit assurer une parfaite étanchéité quand le MCP change de l'état solide à l'état liquide, le liquide ayant une faible viscosité le taux de fuite se trouvent fortement augmenté
- Le conteneur de pouvoir résister à la dilatation et au changement de volume du MCP en plus liquide ce changement peut casser le conteneur si celui-ci ne peut pas absorber le changement de volume

Il existe deux techniques pour conditionner les MCP [27][28] :

#### **a) Macro-encapsulation [28] :**

Les conteneurs peuvent être constitués de sacs, bouteilles de plastique, de capsule de différentes formes géométriques et dimensions etc.

Il existe des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules. Ces nodules sont manufactures dans trois diamètres (**77-78 et 98 mm**) pour des usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (**-3 à 15 °C**), aux températures intermédiaires (**-3 à 15° C**) et à la température de stockage de la glace (**0°C**). Certains nodules spéciaux ont des températures de changement d'état de **27°C** et plus.



**Figure 2.8:** Conditionnement de MCP en nodules



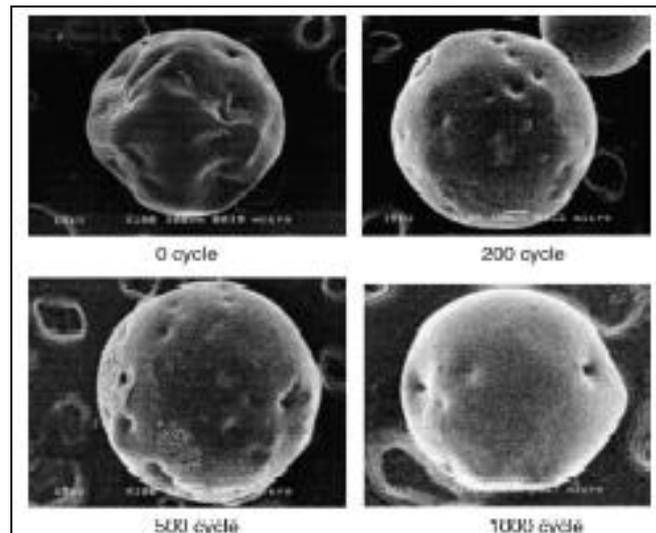
**Figure 2.9 :** Conditionnement en brique plastique



**Figure 2.10 :** Conditionnement en sac plastique

**b) Utilisation de micro-capsules :**

La micro en capsulation est un procédé physique ou chimique qui permet d'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides dans une coquille solide de **1 à 1000**  $\mu\text{m}$  de diamètre.



**Figure 2.11 :** Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines [30], [31]

**c) Briquettes de polyéthylène à haute densité (PEHD) :**

Le polyéthylène à haute densité est un hydrocarbure alkyle de haut poids moléculaire avec une température de fusion et de solidification de **125 à 130°C**. Ce dernier correspond à un stockage thermique latent de **190 à 210 kJ/kg**.

Ces briquettes peuvent supporter au moins **1000** cycles thermiques sans changement des caractéristiques de stockage thermique. Des plaques, des barres, des tubes et d'autres formes géométriques du polyéthylène peuvent être obtenues suivant leur usage.

**d) Briquettes de polyéthylène de haute densité réticulé :**

Des briquettes de polyéthylène de haute densité réticulé peuvent être imprégnées avec un MCP de température de fusion plus faible. La température de fusion et le stockage thermique ne varient pas après répétition de nombreux cycles thermiques. Ces briquettes imprégnées peuvent être incorporées dans les matériaux de construction (plâtre et béton) en les ajoutant au mélange humide du processus. Cette technique a la préférence de certains industriels (National Gypsum Company) [34].

**e) Substrat poreux :**

Un Substrat poreux comme le plâtre, le béton et la mousse, absorbant un MCP liquide hydrocarbure alkyl. Le processus d'absorption peut être effectué en **10 minutes**, la durée d'absorption contrôlant la quantité de MCP absorbée. Les hydrocarbures alkyl d'une chaîne de carbone plus ou moins longue peuvent être absorbés par le plâtre et le

béton. D'autres MCP comme les acides gras et les esters peuvent aussi être absorbés par les matériaux poreux.

### **II.7.Utilisation passive des MCP en bâtiment :**

Il s'agit ici de l'utilisation des MCP par intégration de ceux-ci dans les divers éléments constituant un bâtiment : enveloppes du bâtiment, plafonds, plancher, parois, menuiseries, mobiliers, etc. Le stockage et le déstockage d'énergie s'effectue au gré des échanges de chaleur avec l'air intérieur au bâtiment et l'environnement de celui-ci (air extérieur, rayonnement solaire, rayonnement nocturne, ...). Ces échanges sont passifs, c'est-à-dire non actionnés par un système mécanique, à l'exception parfois d'une ventilation nocturne forcée du bâtiment.

#### **II.7.1 Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment :**

Ce type d'intégration est la plus utilisée parmi les utilisateurs passifs des MCP dans le bâtiment parce que la surface d'échange de chaleur est grande. Ils sont capables de combiner les fonctions de stockeur de chaleur et élément de construction. En général, la profondeur de l'échange de chaleur est courte. Ils sont en général installés dans les bâtiments pour contribuer à l'amélioration du rafraîchissement des résidences. Les structures les plus fabriqués sont

- Plaques de plâtres,
- Enduits
- Murs trombes à base de MCP
- Blocs de béton.

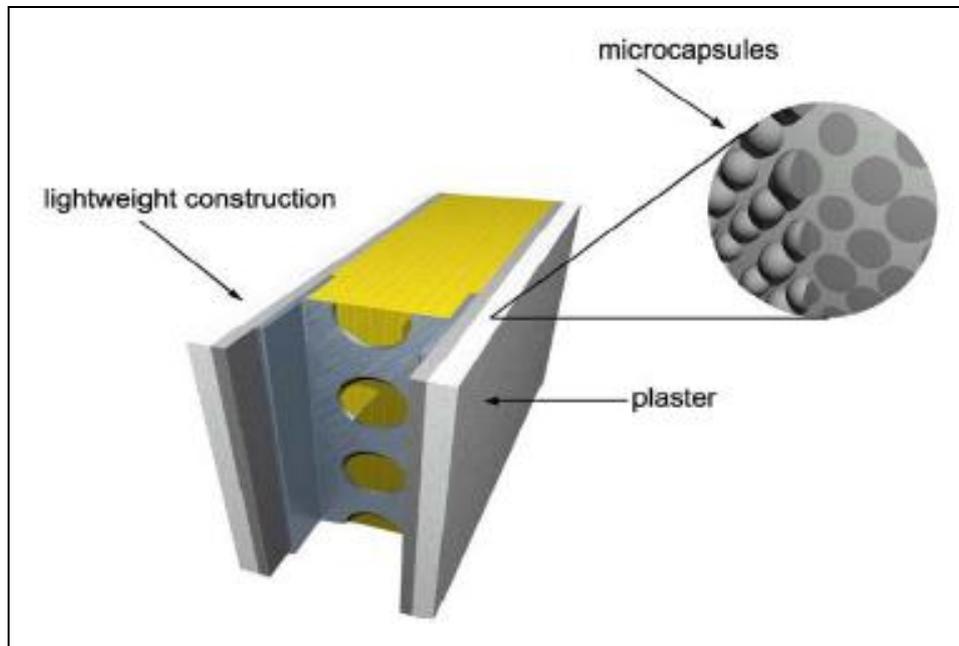
#### **I. Plaques de plâtres-MCP**

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. 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 plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP.

La plaque de plâtre-MCP dont les travaux se sont développés est une plaque de plâtre MCP gypse.

Malheureusement le PCM-gypse conçu pour le chauffage solaire passif fonctionne correctement seulement pendant la période printemps-automne sous certaines

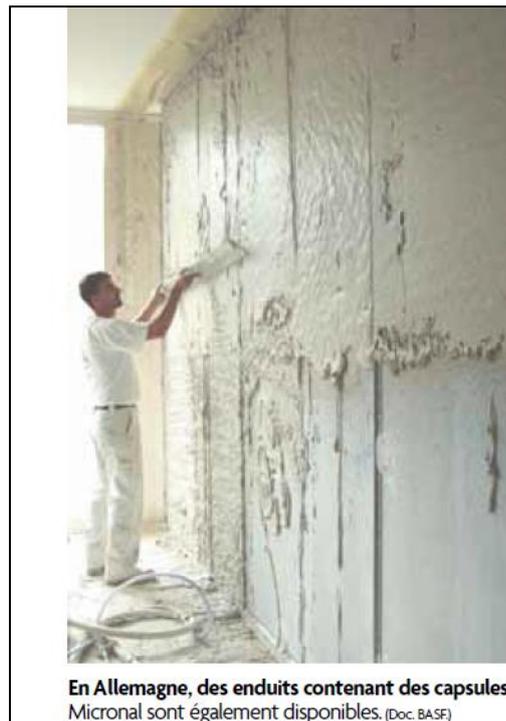
conditions météorologiques. Schossig et al. (Atul et al., 2007) ont conçu un modèle de plaques de plâtre avec des microencapsulés (Figure 2.12) commercialisé en Allemagne



**Figure 2.12** : Modèle de mur contenant une Plaque de plâtre-MCP fabriqué par Schossig et al. (d'après Atul.,2007)

### II. Enduits à base de MCP

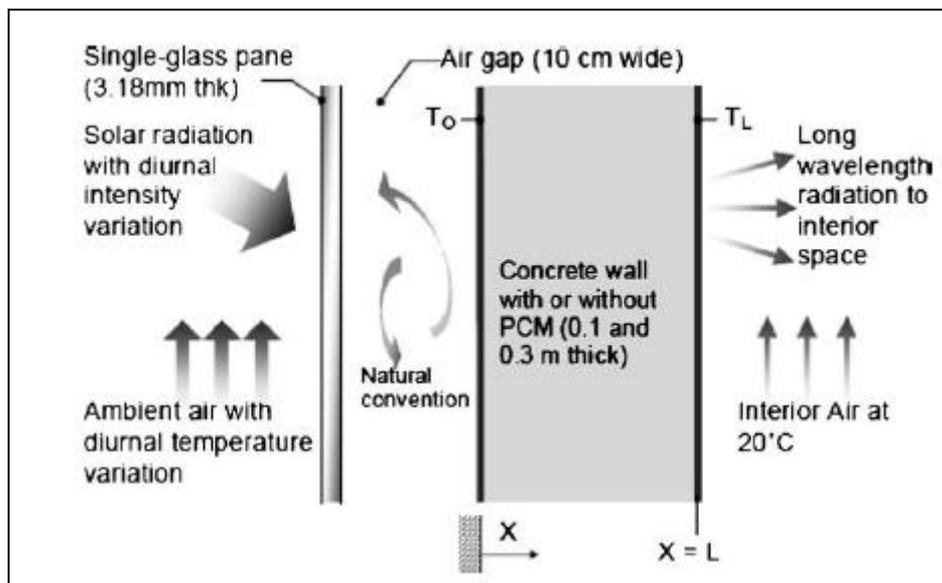
Actuellement sur le marché les enduits à base de MCP (fabriqués par Delta ®, maxit clima, etc) existent sous la forme d'un enduit prédosé « prêt-à-gâcher ». Ils sont à appliquer sur une épaisseur d'environ 15 mm (Venstermans, 2010).



**Figure 2.13 :** Enduit à base de MCP

### III. Murs trombes à base de MCP

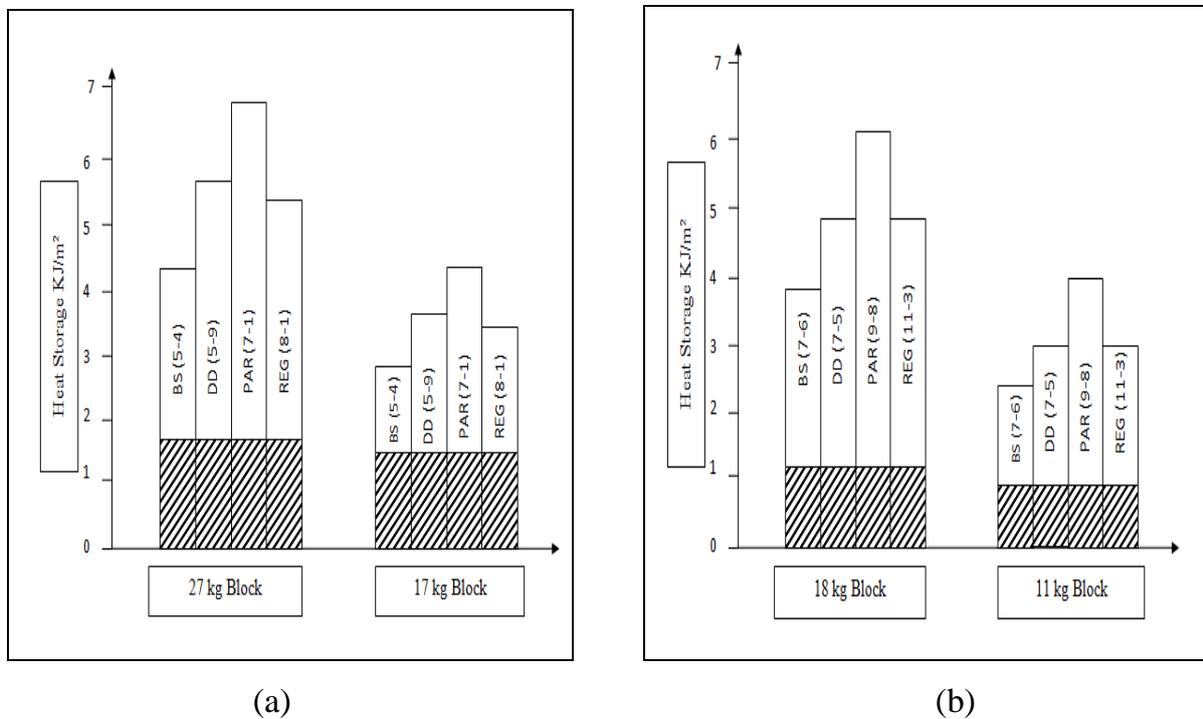
Les murs trombes à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 20 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique (Figure 2.14).



**Figure 2.14 :** Configuration d'un modèle de mur trombe MCP (d'après Atul et al. , 2007)

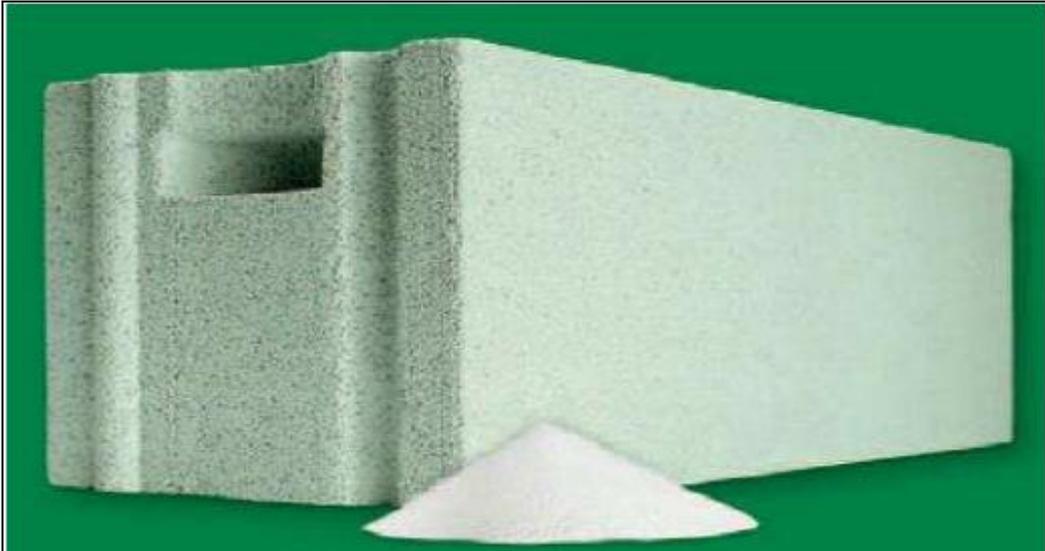
**IV. Blocs de béton-MCP**

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 MCP : la paraffine (PAR), stérate de butyle (BS), dodecanol (DD) et polyéthylène (PEG). Les Figure 2.15(a) et 2.15(b) représentent les capacités de stockage d'énergie ainsi que les chaleurs latentes et sensibles de quelques modèles de blocs de béton-MCP fabriqués de manière ordinaire ou en autoclave. 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 importantes que les autres MCP expérimentés (hawes, 1993).



**Figure 2.15 :** Capacités de stockage d'énergie des blocs de bétons-MCP mise au point à l'université de concordia au Canada  
 (a) fabrication des blocs-MCP de manière ordinaire, (b) fabrication des blocs-MCP de manière autoclave

□ Représente les chaleurs latentes  et les chaleurs sensibles. Les chiffres en parenthèses indiquent le rapport entre les poids du béton-MCP et du MCP (d'après Hawes, 1993).



**Figure 2.16 :** Bloc de béton contenant des MCP

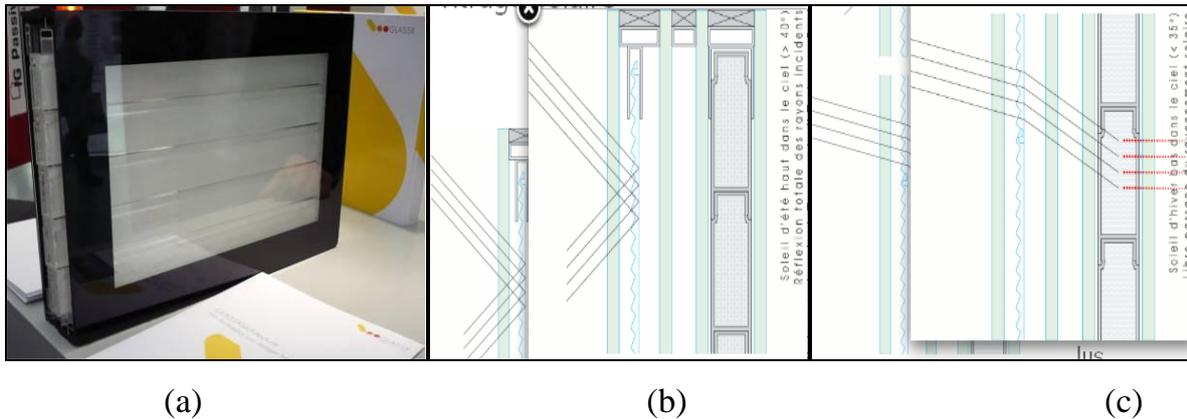
- **Autres intégrations des MCP dans le bâtiment :**

D'autres compartiments du bâtiment sont utilisés pour incorporer les MCP dans les bâtiments. La plupart sont encore au stade expérimental. Les travaux les plus avancés sont l'intégration des MCP dans les fenêtres, les rideaux de fenêtres, le plancher et le plafond.

**V. MCP dans les fenêtres :**

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les connus sont ceux du cabinet architectural GlassX fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres GlassX. 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 2.17 a). Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à **40 °C** (été), il y a un réfléchissement total des rayons solaires (Figure 2.17 b) sur la fenêtre. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à **35 °C** (hiver), les rayons solaires traversent complètement la fenêtre (Figure 2.17 c).

La capacité de stockage de l'énergie des fenêtres GlassX est dix fois plus importante que le béton ordinaire (Pascal, 2010)



**Figure 2.17 :** Fenêtre glassX fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires estivale (c) évolution des rayons solaires hivernale (d'après Pascal, 2008).

### VI. MCP dans les rideaux :

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer. Les travaux les plus avancés sont celles de Buddhi et al. (Vinet Veet, 2005) ainsi que Harald Mehling et al. (Atul et al., 2005).



**Figure 2.18:** Rideaux à MCP

En raison des propriétés optiques des PCM, ces rideaux sont translucides, ce qui signifie qu'elle brille en présence des rayons solaires. De ce fait, le rideau devient un élément multifonctionnel : il améliore le confort du bâtiment et participe à la décoration intérieure de la maison.

#### **VII. MCP dans le plafond et dans le plancher :**

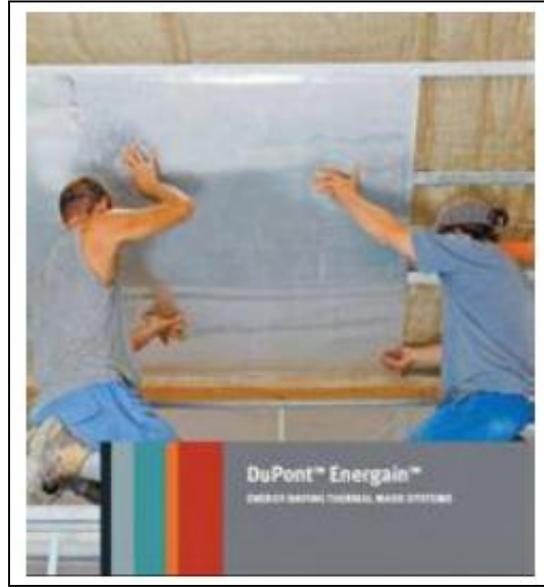
Les produits à base de MCP installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à base de MCP.

Différents fabricants des produits à base de MCP (Solairked, Rubitherm, Cristopia, etc) proposent un panel de panneaux à base de MCP.

Le panneau le plus connu est le panneau DuPont™ Energain®. Il se présente sous la forme de panneaux avec 2 faces en aluminium dont les extrémités sont recouvertes de ruban adhésif en aluminium (Figure 2.19 a). Le matériau central est un mélange de copolymère et de cire de paraffine à **60 %** qui confère au panneau sa fonctionnalité. Il a une chaleur latente de stockage de **315 kJ/m<sup>2</sup>** et une température de fusion de **22 °C**. La dimension des panneaux est de **1000 mm x 1198 mm** avec une épaisseur de **5,26 mm**. Il pèse environ **5 kg/m<sup>2</sup>**. Ces plaques ont la même capacité de stockage de calories qu'un mur de béton de **5 à 7 cm**. Ces panneaux peuvent se poser au plafond (Figure 2.19 b), dans les planchers et aux murs. (Pascal, 2010).



(a)



(b)

**Figure 2.19** : Panneau à base de MCP fabriqué DuPont™ Energain®. (a) le modèle que l'on installe au plafond et (b) un exemple de montage de ce panneau dans un plafond (d'après Gilbert et al, 2007).

### III. Conclusion :

Dans le cadre de ce chapitre:

Parmi les différentes techniques de stockage de chaleur, le stockage par chaleur Latente est le plus rentable dans le secteur du bâtiment grâce à ses spécificités d'importante énergie de stockage dans des volumes très réduits. Ce qui donne l'avantage de réduire les épaisseurs des parois de construction. Ceci est réalisé par l'intégration des MCPs.

On a reconnu aussi les conditions d'intégration des MCPs dans les applications de stockage de thermique avec les différentes techniques disponible et facile.

L'utilisation des matériaux de changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique dans les bâtiments a été étudiée par beaucoup de chercheurs, donc, beaucoup de produits sont disponibles dans la littérature et dans marché. Les problèmes techniques trouvés dans le passé dans l'utilisation de tels matériaux ont été étudiés et différentes solutions ont été présentées, donnant à l'utilisateur l'occasion d'être sûr que les systèmes conçus soyez réussi.

Néanmoins, la recherche est nécessaire toujours pour trouver de nouveaux matériaux plus efficaces et meilleurs marché, et pour donner meilleurs solutions aux problèmes techniques tels que la surfusion, la ségrégation et la compatibilité de matériaux.

# **Chapitre 3: Efficacité énergétique et Confort thermique**

## 1. INTRODUCTION

L'efficacité énergétique est un état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est minimisée. Les études sur le climat ont confirmés que le relèvement de la température moyenne de l'atmosphère terrestre variera entre **1,5 et 6 °C** d'ici à la fin du siècle. Ce réchauffement a déjà provoqué des perturbations climatiques ayant des répercussions humaines gravissimes. Qui seront sans doute de plus en plus importantes dans l'avenir. Pour limiter celles-ci et assurer le développement durable de nos sociétés, il est maintenant admis qu'il faudra diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète à l'horizon 2050. Ainsi, l'efficacité énergétique se manifeste comme étant un objectif politique affirmé. Tous les pays, quelle que soit leurs situations énergétiques, doivent baser leurs développements sur d'autres types d'énergie tout en essayant de maîtriser par ailleurs leur consommation énergétique par la mise en place de politiques d'efficacité énergétique volontaristes et adaptées.

## 2. EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE BÂTIMENT :

L'efficacité énergétique se réfère à la réduction de la consommation d'énergie sans toutefois provoquer une diminution du niveau de confort ou de qualité de service dans les bâtiments. Le secteur du bâtiment, dont sa consommation énergétique représente plus de 40% du total de l'énergie, et il est responsable de 20% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, se positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis à faire face. Ce secteur pourrait bien être le seul qui offre des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre aux engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces possibilités de progrès sont actuellement mieux identifiées qu'au cours des années passées, les bâtiments peuvent utiliser plusieurs sources d'énergie, dont les énergies renouvelables. Le bâtiment peut être construit pour deux usages distincts :

- usage tertiaire (tels que commerce, bureaux, enseignement, santé, etc.)
- usage résidentiel (bâtiment d'habitation, maison individuelle ou logement collectif).

Le cycle de vie du bâtiment se divise en plusieurs étapes, toutes engageant de nombreux professionnels et usagers, et ayant un impact direct ou indirect sur l'environnement : production des matériaux, transport des matériaux, construction du bâtiment, utilisation du bâtiment et déchets en fin de vie.

Cependant, agir efficacement pour réduire de manière sensible la consommation énergétique impose une identification des facteurs de gaspillage, afin de les maîtriser à l'avenir. De nombreuses études et retours d'expériences ont montré que la diminution des consommations énergétiques des bâtiments passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, une sur isolation de l'enveloppe. Un certain nombre de termes sont utilisés pour désigner les bâtiments présentant une forte efficacité énergétique :

## 2.1 Maison passive:

Le Bâtiment Passif, souvent appelé « maison sans chauffage », repose sur un concept de **construction très basse consommation**, basé sur l'utilisation de l'apport de chaleur « passive » du soleil, sur une très forte isolation (des murs, des fenêtres, etc.), sur l'absence de ponts thermiques, sur une grande étanchéité à l'air ainsi que sur le contrôle de la ventilation. Une maison passive consomme **90 % d'énergie de chauffage en moins** qu'une construction existante et 50 % de moins qu'une maison nouvellement construite. Quelle que soit son mode de construction et sa situation géographique, une maison passive, avec tout le confort actuel, n'a **pas besoin de plus de 15 kWh par m<sup>2</sup> et par an en chauffage**. [75]

Quatre critères permettent de déterminer si un bâtiment peut obtenir la labellisation « Bâtiment Passif » :

- Besoins en chauffage < 15 kWh/ (m<sup>2</sup>.a) ou puissance de chauffe < 10 W/m<sup>2</sup>
- Besoins en énergie primaire totale (électroménager inclus) < 120 kWh/ (m<sup>2</sup>.a)
- Moins de 10 % d'heures de surchauffe annuelles (>25°C) [76]

Pour assurer le confort autant l'été que l'hiver, une maison passive, doit être conçue pour éviter les déperditions non contrôlées (dites « parasites »), notamment d'air chaud. À ce titre, son étanchéité à l'air est primordiale. La maison passive n'aime

pas non plus les ponts thermiques ; ces endroits du bâti où la chaleur s'échappe plus vite... et inutilement. Ils sont généralement dus à un assemblage non étanche à l'air des éléments porteurs de l'édifice. La maison passive réduit ces zones de déperdition de manière drastique. Techniquement, un Bâtiment Passif, c'est : une isolation renforcée, des fenêtres dites « chaudes », une ventilation avec récupération de chaleur, l'étanchéité à l'air, la suppression des ponts thermiques, l'optimisation des apports solaires gratuits, ainsi que l'utilisation d'appareils peu gourmands en énergie. Financièrement, le Bâtiment Passif est le meilleur compromis de construction entre coût global d'exploitation et investissement.

### **2.2 Bâtiment basse énergie:**

Le Bâtiment Basse Consommation énergétique (BBC) est un label attribué aux bâtiments qui ont une basse consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage, l'eau chaude sanitaire et la ventilation. Ainsi un logement BBC est un bâtiment performant en termes de consommation énergétique, qui nécessite 50% d'énergie en moins. Pour cela, il met en œuvre, entre autres, une conception bioclimatique, une bonne isolation thermique et une bonne étanchéité, le choix du mode de chauffage le plus adapté...

Ce label BBC a de nombreux avantages : il permet une diminution de taxes foncières, et une diminution d'extension du coefficient d'occupation des sols (COS).

Il existe deux types de conditions d'attribution du label BBC en fonction de l'âge du logement :

- les logements neufs ne doivent pas dépasser l'objectif de consommation de 50kWh/m<sup>2</sup>.an.
- les logements existants doivent présenter une consommation inférieure à 50 % de la consommation conventionnelle. L'objectif de consommation est fixé pour eux à 80 kWh/m<sup>2</sup>.an.[77]

### **2.3 Bâtiment très basse énergie:**

Ces bâtiments très faiblement consommateurs d'énergie ne nécessitent pas de systèmes de chauffage ou de rafraîchissement actifs : les apports passifs solaires et

internes et les systèmes de ventilation suffisent à maintenir une ambiance intérieure confortable toute l'année. Il s'agit en général de bâtiments passifs dont le concept a été défini par le Dr. Wolfgang Feist de l'institut de recherche allemand Passivhaus. Ils sont définis comme étant des bâtiments dans lesquels l'ambiance intérieure est confortable tant en hiver qu'en été, sans devoir faire appel à aucun mode de chauffage ni de refroidissement. Cet objectif peut être atteint grâce à une forte isolation thermique, une forte réduction de ponts thermiques et une très bonne étanchéité à l'air. De plus, les déperditions par ventilation sont réduites à travers un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait [78]

### **2.4 Bâtiment à énergie zéro :**

Bâtiment à consommation énergétique nette nulle, ce qui signifie que la quantité totale d'énergie utilisée, calculée sur une base annuelle, est à peu près égale à la quantité d'énergie renouvelable créée sur le site. Ou dans d'autres définitions par des sources d'énergie renouvelables externes. Ces bâtiments contribuent par conséquent moins aux gaz à effet de serre dans l'atmosphère que les bâtiments similaires. Ils consomment parfois de l'énergie non renouvelable et produisent des gaz à effet de serre, mais à d'autres moments ils réduisent ailleurs la consommation d'énergie et la production de gaz à effet de serre. Le principe de la consommation d'énergie nette zéro est considéré comme un moyen de réduire les émissions de carbone et de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et bien que les bâtiments à énergie nulle restent rares même dans les pays développés [79].

### **2.5 Bâtiment à énergie positive :**

Bâtiment à énergie positive (BEPOS) est un bâtiment qui produit plus d'énergie (électricité, chaleur) qu'il n'en consomme pour son fonctionnement. Cette différence de consommation est généralement considérée sur une période lissée d'un an. Si la période est très courte, on parle plutôt de bâtiment autonome. Il s'agit généralement d'un bâtiment passif très performant et fortement équipé en moyens de production d'énergie par rapport à ses besoins en énergie. Les toits, murs, voire les fenêtres ou d'autres éléments (verrières de véranda ou balcons, murs d'enceinte, toiture de garage ou appentis, fondations, etc.) peuvent être mis à profit pour

accumuler et restituer de la chaleur ou produire de l'électricité. Le caractère excédentaire en énergie (« positif ») est permis par des principes constructifs et bioclimatiques, mais aussi par le comportement des usagers (gestion efficiente des usages, des consommations de l'électroménager et de l'informatique, de la mobilité...). La quantité d'énergie produite sur le toit, murs, combrières ..etc., doit au moins compenser la somme des consommations énergétiques moyennes annuelles sous le toit [80].

### **3. Solutions d'efficacité énergétique passives :**

La solution d'Efficacité énergétique repose sur trois catégories distinctes, qui ont trait à leurs rapports à l'énergie utilisée, ainsi

- la première catégorie dite passive regroupe toutes les solutions qui n'exigent pas une consommation énergétique pour leurs fonctionnements (conception, ventilation naturel, solaire passif, vitrage, isolation) à l'inverse de
- la seconde catégorie active où une source d'énergie est requise,
- la troisième catégorie celle du comportement humain concerne le choix et l'utilisation raisonnée des usages énergétiques dans le bâtiment.

#### **3.1. Compacité du bâtiment :**

Le choix de la compacité du bâtiment est une source très importante d'économie aussi bien en énergie qu'en investissement. Les pertes de chaleur sont en fonction de la surface des parois en contact avec l'extérieur ou avec le sol : pour un même volume et une même surface, une habitation plus compacte consomme moins d'énergie.

Bien sûr, la conception bioclimatique n'a pas pour objectif l'hyper-compacité. Il est cependant important de savoir, lors de la conception d'une habitation, que toute diminution de la compacité génère automatiquement des consommations d'énergie et des coûts d'investissement plus élevés.

Un bâtiment compact est un bâtiment qui a un rapport faible entre la surface des parois extérieures et la surface habitable. Sans brider la conception architecturale, il est plus économique et bénéfique pour l'efficacité thermique de retenir des formes plutôt compactes.

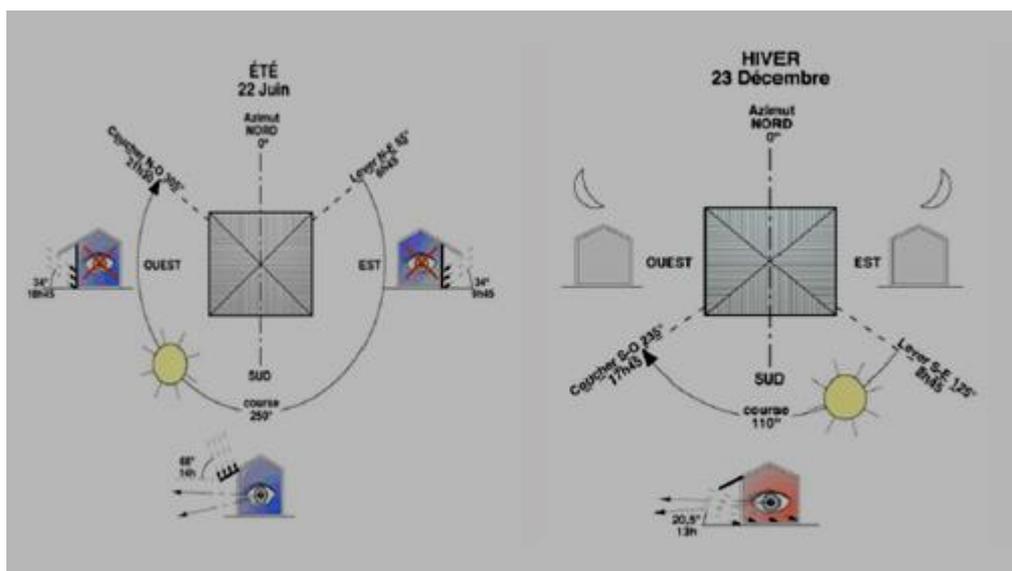
# EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET CONFORT THERMIQUE

Les pertes sont donc d'autant plus réduites que ces surfaces sont optimisées par rapport au volume habitable. La réduction des décrochés de façades et l'optimisation de la compacité du bâtiment sont les clés de la réussite d'un projet sur le plan énergétique.

Un bâtiment «découpé» nécessitera un effort particulier pour bien isoler l'ensemble des décrochements et découpes, car ils représenteront une part non négligeable dans les déperditions et les points faibles pour l'étanchéité à l'air. Le traitement de certains ponts thermiques pourra s'avérer difficile ou impossible.

## 3.2. Orientation :

Le soleil est souvent recherché l'hiver alors qu'on essaye de s'en protéger l'été ; les figures ci-contre (figure 3.1 et figure 3.2) montrent la course du soleil suivant la saison :



**Figure 3.1 :** Course du soleil l'hiver      **Figure 3.2 :** Course du soleil l'été

- En hiver, la course du soleil est limitée et seules les façades orientées au Sud apportent un complément solaire significatif par rapport aux besoins de chauffage.

- L'été, la course du soleil est beaucoup plus longue et plus haute. Les façades Est et Ouest font l'objet de surchauffe et devront être équipées de dispositifs de protection.

Il est préférable pour le logement quand cela est possible, une orientation Nord/Sud (c'est-à-dire qui offre une plus grande façade au sud), car cette orientation est la plus passivement profitable et donne le meilleur compromis entre apports de chaleur et apports lumineux en toute saison (apports solaires d'hiver facilement maîtrisables l'été) ; les expositions plein- Est et plein Ouest nécessitent des protections solaires en été, difficilement compatibles avec les apports lumineux.

Les paramètres de l'orientation sont déterminants et liés à la destination des lieux :

- Les besoins en lumière.
- L'utilisation des rayons solaires pour chauffer.
- Le besoin de se protéger du soleil contre les surchauffes.
- La présence de vents dominants froids de l'hiver (on diminue ainsi la consommation de chauffage).

L'ensoleillement des pièces orientées au sud est le plus facile à maîtriser.

L'ensoleillement d'hiver est maximal et l'ensoleillement d'été minimum

### **3.3. Solaire passif :**

Le solaire passif fait appel à trois principes : le captage, le stockage et la distribution de l'énergie du soleil.

La conception attentive d'un bâtiment solaire permet : d'utiliser les gains solaires reçus pour les besoins de chauffage instantané et de stocker le reste sous forme de masse thermique intrinsèque ou de dispositifs de stockage expressément conçus à cette fin.

## 4. Notion du Confort Thermique :

Le confort est une notion étroitement liée à la sensation de bien-être et qui ne possède pas de définition absolue. C'est une notion globale : chaleur et froid, lumière, bruit, paysage, eau, verdure, prestige.... et autre, sont autant d'éléments définissant plusieurs paramètres climatiques, esthétiques, psychologiques du bien être [81].

Le confort est également la sensation subjective . Cette appréciation est différente selon la société et pour une même société suivant les individus.

- Le confort thermique est défini comme "un état de satisfaction du corps vis à vis de l'environnement thermique ou à l'égard de l'ambiance thermique du milieu environnant. Pour qu'une personne se sente confortable, trois conditions doivent être réunies :
  - Le corps doit maintenir une température interne stable.
  - La production de sueur ne doit pas être trop abondante et la température moyenne de la peau doit être confortable.
  - Aucune partie du corps ne doit être trop chaude ni trop froide (inconfort local).

### 4.1 Aspects du confort thermique [82] :

Les interactions entre l'homme et l'environnement se déroulent selon trois mécanismes:

- **L'aspect physique** : concerne les différents transferts de chaleur entre l'homme et l'environnement
- **L'aspect physiologique** : s'intéresse au fonctionnement des récepteurs sensoriels et comment l'information est intégrée.
- **L'aspect psychologique** : est l'interaction entre les caractéristiques physiques de l'environnement et leurs résultantes sensorielles chez l'individu.
- **Aspect sensoriel**: État d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement. L'individu ne peut pas dire s'il veut avoir plus froid ou plus chaud.

# EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET CONFORT THERMIQUE

Les paramètres du confort thermique essentiel:

- Température ambiante  $T_a$
- Humidité de l'air ambiant  $h\%$
- Ecart de température subis dans le temps et dans l'espace  $\Delta T$
- Mouvements de l'air ambiant ou vitesse de l'air.

## 4.1.1. Influence de la température sur le confort :

La température de l'air, ou température ambiante ( $T_a$ ), est une variable essentielle du confort thermique. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs et conductifs voir radiatifs. Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe

**Tableau 3.1 :** Valeurs de référence de température d'ambiance. Bodart M.,2002

Locaux	Température de l'air °C
Locaux où des gens habillés normalement sont au repos où exerce une activité physique très légère. Par exemple : bureaux, salles de cours, salles d'attente, salles de réunion ou de conférence.	21°C
Locaux où des gens peu ou pas habillés sont au repos ou exercent une activité physique très légère. Par exemple salles d'examen ou soins médicaux, vestiaires.	23 à 25°C
Locaux où des gens habillés normalement exercent une activité physique très légère. Par exemple ateliers, laboratoires, cuisines	17°C
Locaux où des gens peu habillés exercent une grande activité physique Par exemple salles de gymnastique, salle	17°C

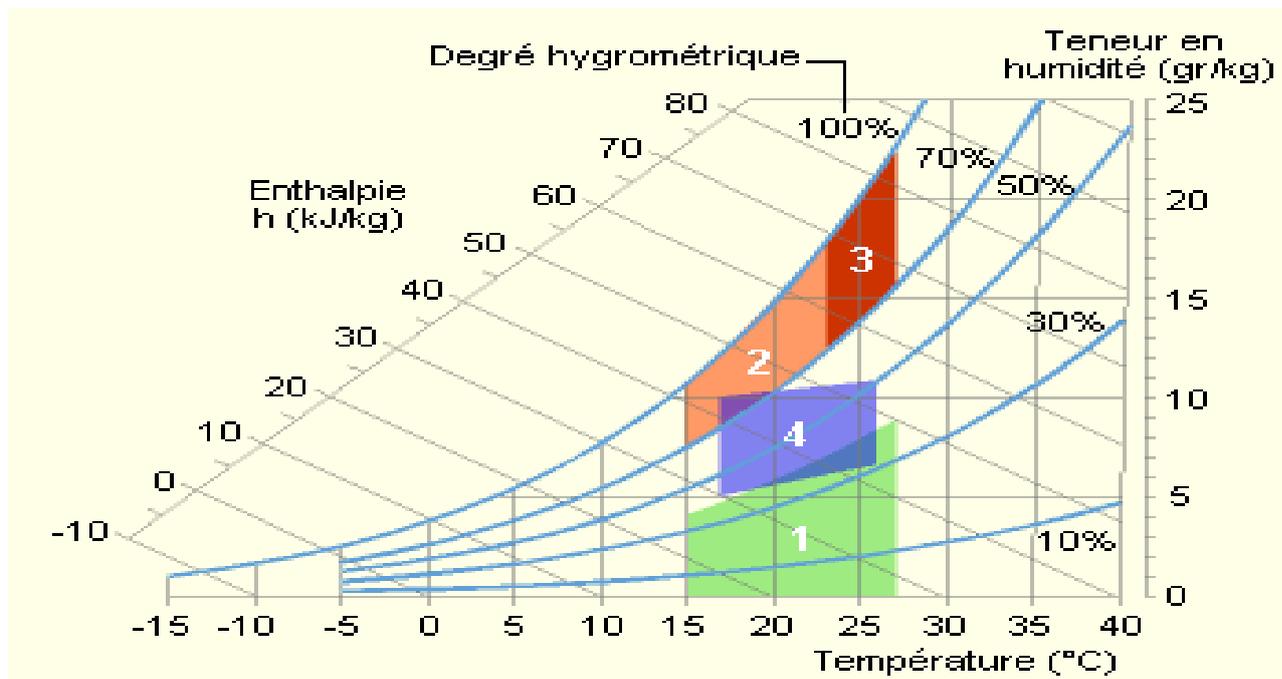
## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET CONFORT THERMIQUE

---

de sport	
Locaux qui ne servent que de passage pour les gens habillés normalement. Par exemple corridors, cages d'escalier, vestiaires, sanitaire.	17°C
Locaux uniquement gardés à l'abri du gel. Par exemple garages, archives.	5°C

### 4.1.2. Influence de l'humidité relative de l'air

L'humidité relative de l'air influence les échanges évaporatoires cutanés, elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la sueur. Selon Liébard A, entre 30% et 70%, l'humidité relative influence peu la sensation de confort thermique<sup>1</sup>. Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration, le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort.



1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.  
2 et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons. 4. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.

**Figure 3.3 :** Diagramme de plage de confort : Température-Humidité

#### 4.1.3. La vitesse de l'air :

La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporatoires, elle intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s. Toutefois, à l'intérieur des bâtiments, ces vitesses demeurent limitées, ne dépassant pas généralement cette vitesse, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Elle peut, en revanche, être tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts locaux, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés.

#### 4.1.4. Influence des écarts de température.

Les gradients de température et de vitesse à laquelle elles se produisent doivent être pris en considération. La température opératoire ne doit pas varier de plus de 0,5  $^{\circ}\text{C}$  à l'heure. Une différence marquée des températures des surfaces autour d'une personne, ou encore le rayonnement direct du soleil, favorise des échanges asymétriques par rayonnement avec certaines parties du corps. Par exemple, une

fenêtre froide ou un plafond chaud peuvent produire un effet de refroidissement ou d'échauffement d'une partie du corps seulement. L'ASHRAE [American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers 1997] propose des valeurs limites pour l'asymétrie de la température de rayonnement des surfaces, mais l'évaluation de la conformité à ces valeurs requiert des appareils spéciaux. Il est souvent possible de se limiter à une évaluation subjective pour déterminer un correctif approprié à la situation.

### **5. Mesure du confort thermique**

Mesurer le confort thermique est une tâche complexe. En effet, il faut prendre en considération les différents facteurs environnementaux mais également les différences individuelles. Dans une situation donnée, une personne ressent une sensation de chaud alors que sa voisine perçoit du froid. Dans ces conditions comment mesurer un confort thermique « universel » de manière à créer des espaces susceptibles d'être thermiquement appréciés par tous les occupants ? L'environnement thermique peut être défini suivant quatre paramètres : la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air. Ils doivent cependant être combinés avec l'activité et la vêtue de l'individu pour caractériser les échanges thermiques entre l'homme et son environnement. À partir de ces paramètres, il existe de multiples modèles de caractérisation du confort.

### **6. Obtention du confort thermique à l'aide de MCP :**

Le confort thermique peut être trouvé par des moyens passifs ou actifs. Les moyens passifs sont liés essentiellement au stockage thermique dans les parois des bâtiments (murs, toits, sols). Ils sont décrits par ailleurs. Les moyens actifs concernent le transfert de l'énergie stockée par les MCP. Sur le tableau 3.2 on résume les applications potentielles du stockage thermique à l'aide de MCP.

## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET CONFORT THERMIQUE

**Tableau 3.2** : Applications potentielles de stockage de l'énergie thermique par les matériaux à changement de phase.

<b>Méthode d'utilisation du MCP</b>	<b>Applications</b>	<b>Objectif</b>	<b>Secteur</b>
Stockage par MPC réparti dans la cloison (plâtre, ciment, PVC, mousse, verre, nids d'abeille)	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Tous
Chauffage électrique avec stockage MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Stockage MCP dans les gaines aérauliques pour le chauffage et la climatisation	Chauffage et conditionnement d'air des locaux	Consommation heures creuses	Commercial, institutionnel et industriel
Préchauffage d'air à MCP pour pompe à Chaleur	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses et conservation	Résidentiel, commercial et institutionnel
Murs rideaux	Chauffage des locaux	Conservation	Commercial, industriel et institutionnel
Chauffe-eau avec le stockage par les MCP	Chauffage des locaux	Consommation heures creuses	Résidentiel, commercial et institutionnel

### 7. CONCLUSION :

L'environnement thermique est défini par quatre variables physiques (la température de l'air, le rayonnement, la vitesse de vent et l'humidité). Ces grandeurs réagissent avec l'activité et la vêtue du corps humain pour établir son état thermique et constituent un ensemble de six paramètres de base des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. Mais au delà de ces variables, la perception thermique d'un environnement peut être influencée par des variables physiologiques, psychologiques et sociologiques.

Des approches ont été définies dans cet état de l'art sur le confort thermique, l'approche adaptative et l'approche analytique. L'approche adaptative considère le confort thermique à travers les réactions comportementales qui caractérisent la capacité adaptative de l'occupant dans son environnement, elle considère que les personnes jouent un rôle actif dans le maintien de leur confort thermique, c'est-à-dire que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de ses besoins et de sa perception du climat. La deuxième approche analytique représente l'homme comme une machine thermique et considère les interactions avec l'environnement en termes d'échanges de chaleur.

# Chapitre 4 :

# Simulation numérique

### 1. Introduction :

Un bâtiment est un ensemble de volumes d'air séparés par des parois. La connaissance du comportement thermique et dynamique d'une paroi soumise à des sollicitations diverses est donc utile à la compréhension du comportement thermique d'un bâtiment dans son ensemble.

Les problèmes de changement de phase en présence de convection peuvent se traiter aujourd'hui correctement à l'aide, de la CFD (Computational Fluid Dynamics),. Cependant, la résolution de ces problèmes nécessite un temps de calcul élevés même dans des situations où la géométrie est relativement simple. En effet, si aucune simplification n'est faite lors de la mise en équation du problème, on doit prendre en compte au minimum: la conservation de la masse, les équations de quantité de mouvement et l'équation d'énergie. De plus, les phénomènes tels que la turbulence rendent les calculs encore plus complexes et longs. Le développement d'un modèle conductif simplifié de changement de phase a pour but, de réduire le nombre d'équations et de diminuer le temps de résolution de problèmes semblables à ceux présentés précédemment.

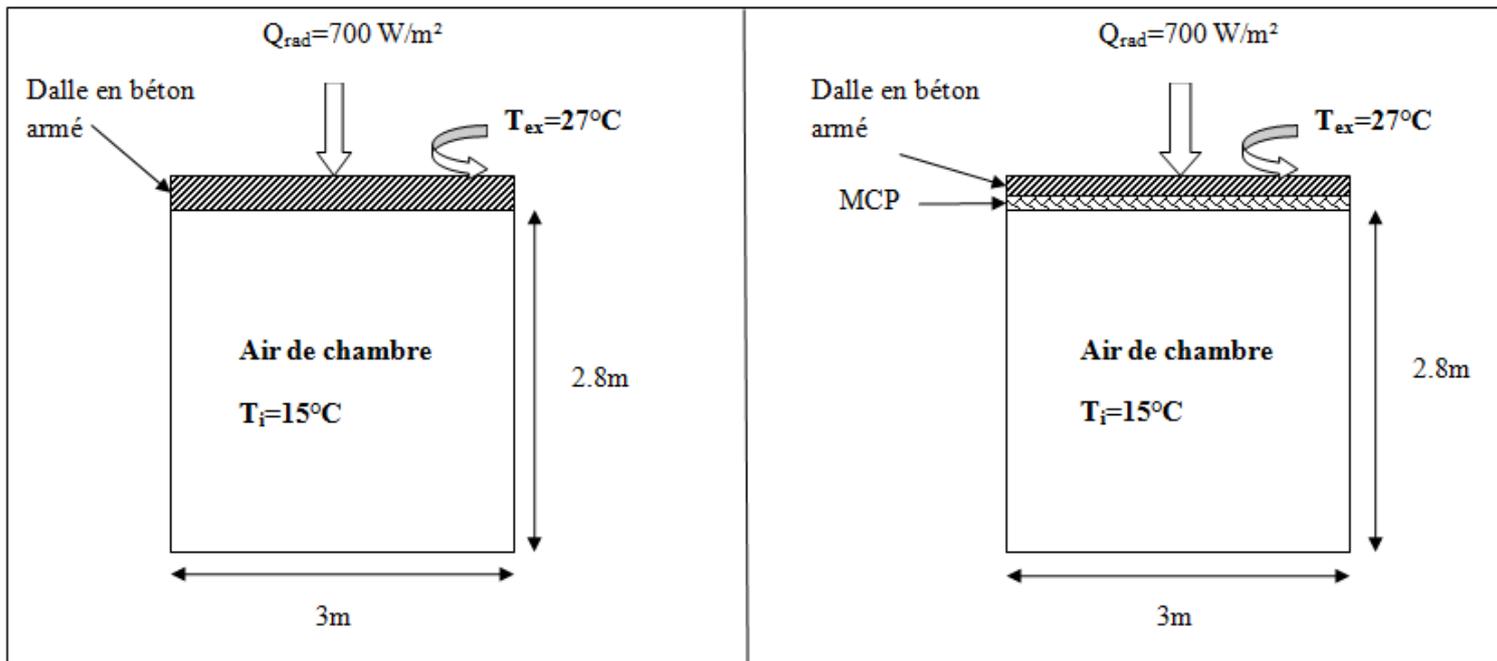
L'objectif de cette partie est de modéliser le processus de stockage de l'énergie solaire intégré dans les parois de bâtiment en utilisant des matériaux à changement de phase. On commencera par présenter notre description du problème qui fournit des expressions qui sont généralement des fonctions continues, des variables de temps et d'espace. Après avoir édicté les hypothèses simplificatrices de notre problème, nous avons déduit une formulation finale du comportement thermique d'un modèle d'habitat avec une dalle contenant des matériaux à changement de phase MCP et un autre modèle sans matériaux à changement de phase.

La simulation dynamique du système a été effectuée grâce au logiciel *Fluent*, ceci nous a permis d'étudier le comportement dynamique et énergétique d'un bâtiment et d'estimer l'efficacité du système.

## 2. Position du problème

### 2.1 Modèle physique :

Le problème physique étudié est une cellule test avec des parois de faible inertie thermique représentant une structure d'une maison constituée d'une dalle de 10 cm de béton et 5 cm de MCP de type **Paraffine** qui peut changer d'état avec un front de fusion ou de solidification, voir figure 4.1



**Figure 4.1:** Géométrie du problème physique.

Les conditions thermiques d'une journée type ont été imposées sur la paroi supérieure de la cellule test (dalle).

- Les parois inférieure, sud et nord sont supposées adiabatiques.
- A l'intérieur, on impose une condition de transfert par convection avec la température intérieure :

$$T_i = 15^\circ\text{C}$$

- A l'extérieur, on impose une condition de flux solaire avec un échange convectif avec l'extérieure (milieu ambiant), (paroi supérieur)

La température extérieure est constante :

$$T_{ex} = 27^{\circ}\text{C}$$

Le coefficient d'échange convectif avec l'extérieur :

$$h_e = 12 \text{ W/m}^2\text{K.}$$

Le flux solaire moyen imposé

$$q_{rad} = 700 \text{ W/m}^2.$$

La grandeur qui nous intéresse principalement est la température à l'intérieure de la pièce. Ce sont donc les variations de cette grandeur qui seront analysées.

### 3. Modèle du transfert thermique :

#### 3.1 Formulation mathématique du problème 2D :

##### ✓ Hypothèses simplifiées :

Afin de simplifier la résolution mathématique du problème, les hypothèses suivantes ont été appliquées :

- Le fluide est incompressible.
- Les phases solides et liquide du PCM sont homogènes et isotropies.
- La phase liquide est un fluide Newtonien.
- L'écoulement est laminaire et sans dissipation visqueuse.
- Propriétés physiques de la phase solide supposées constantes
- Hypothèses de Boussinesq.

##### ✓ Equations de conservation :

En prenant en compte les hypothèses citées ci-dessus les équations de conservation s'écrivent :

a) Conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{eq (5.1)}$$

Avec  $u$  : vitesse horizontale à la dalle [m/s]

v : vitesse verticale [m/s]

x : coordonnée horizontale [m]

y : coordonnée verticale [m]

b) Conservation de la quantité de mouvement suivant x :

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{eq (5.2)}$$

Avec :  $\rho$ :Masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>]

t: temps [s]

c) Conservation de la quantité de mouvement suivant y :

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \quad \text{eq (5.3)}$$

Avec g: accélération gravitationnelle [m/s<sup>2</sup>]

T : température [k]

$\beta$ :Coéfficient d'expansion thermique [1/K]

$\rho$ : masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>]

d) Conservation de l'énergie :

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{eq (5.4)}$$

Avec :  $C_p$ : capacité calorifique spécifique [J/Kg.K]

$\lambda$ : Conductivité thermique [W/m.K]

Le comportement du matériau à changement de phase MCP est basé sur la méthode de la capacité apparente :

$$\rho C_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad \text{eq (5.5)}$$

$C_{\text{eff}}$ : la chaleur massique apparente [J/Kg.K]

**Domaine solide on a :**

$$(\rho \rho_p)_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i=1,2,\dots} \quad \text{eq (5.6)}$$

**Domaine liquide on a :**

Le comportement du matériau à changement de phase MCP est basé sur la méthode de la capacité apparente :

$$\rho C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \text{eq (5.7)}$$

Nous avons décrit le modèle mathématique complet, nous allons passer à la présentation du modèle numérique complet (CFD) utilisé lors de la résolution des différents problèmes étudiés.

**4. Paramètres physiques des matériaux :**

Les propriétés thermo-physiques des deux matériaux utilisés sont présentées dans le tableau suivant :

**Tableau 4.1 :** Propriétés thermo-physiques des deux matériaux.

Matériaux	$\lambda$ [W/m.K]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kg.K]
Béton	1.5	2200	800
Paraffine	0.18	900	Equation 5-8.

Avec:

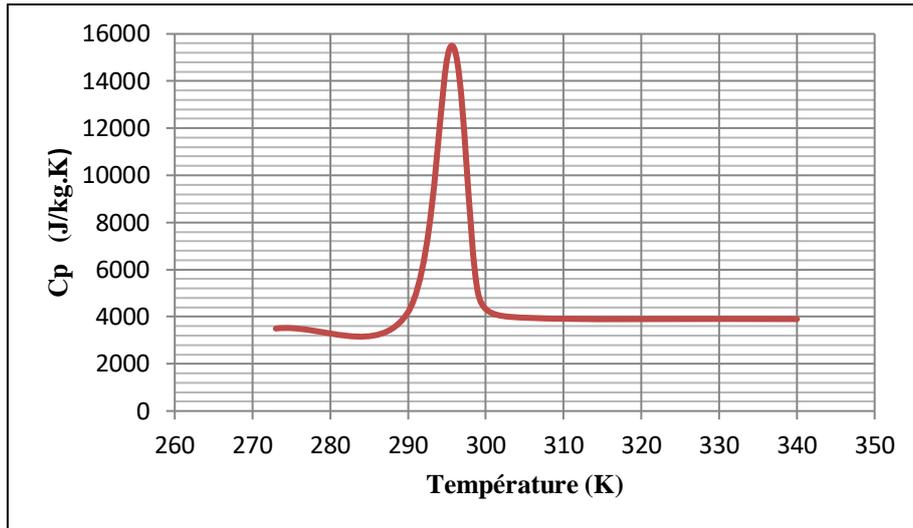
$\rho$ :Masse volumique [Kg/m<sup>3</sup>]

$C_p$ : capacité calorifique spécifique [J/Kg.K]

$\lambda$ : Conductivité thermique [W/m.K]

Quand le MCP fond ou se solidifie, le changement d'état est pris en compte par une capacité thermique effective  $C_p$  [71].

Pour le MCP considéré cette capacité thermique est déduite des mesures publiées dans la référence [71], voir figure (5.11) et équation (5.8):



**Figure 4.2 :** Variation de la capacité effective en fonction de la température.

$$C_{eff} = 4250 + 10750 \exp\left(\frac{T - 295.8}{a}\right) \quad (5.8)$$

$$\begin{cases} a = 4 & \text{si } T \leq 295.8 & K \\ a = 3 & \text{si } T > 295.8 & K \end{cases}$$

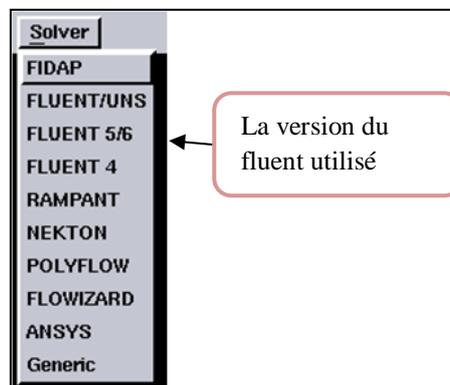
## 5. Génération du maillage par GAMBIT

**GAMBIT** est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous **FLUENT**. La génération du maillage passe par les étapes suivantes :

- **Etape 1** : choix du solveur :

Le calcul numérique va être effectué à l'aide du logiciel *Fluent 6.3*, pour cela on doit définir le type de solveur dans Gambit :

Solver----- FLUENT 5/6



**Figure 4.3 :** Type de solveur

### - Etape 2 : Création de la géométrie

Pour construire la géométrie, il est bon de suivre la démarche suivante:

- définir la géométrie.
- réaliser le maillage.
- définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler: coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie.

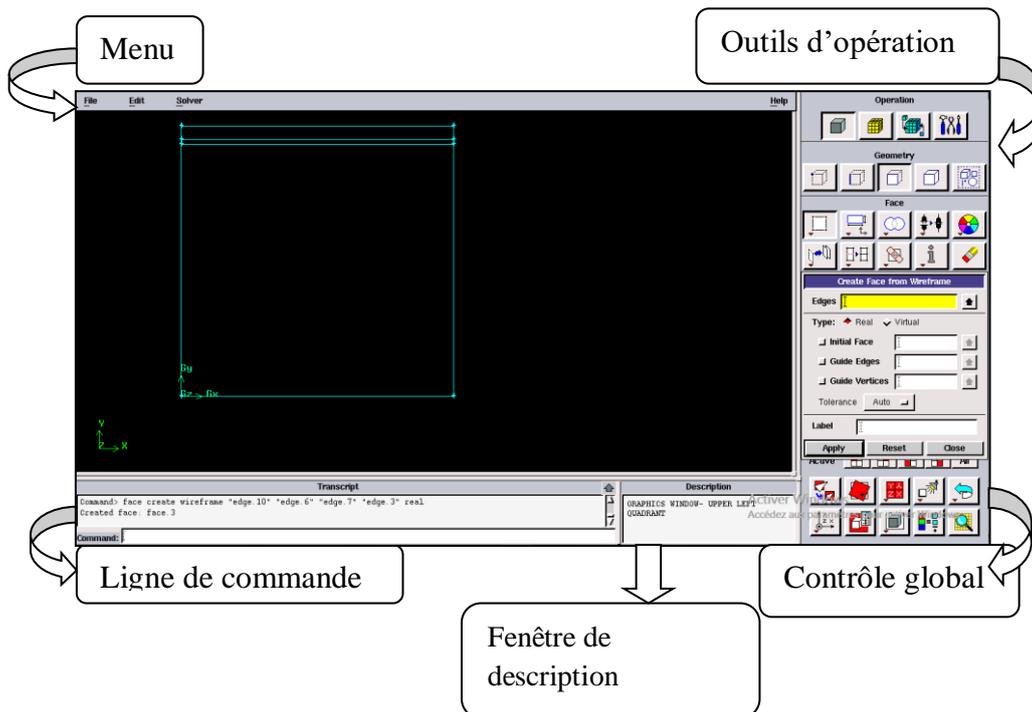
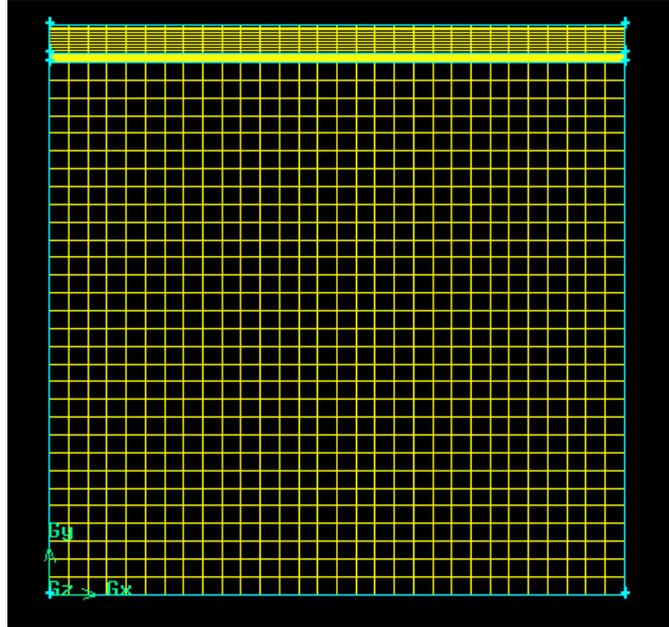


Figure 4.4 : Modélisation sous Gambit.

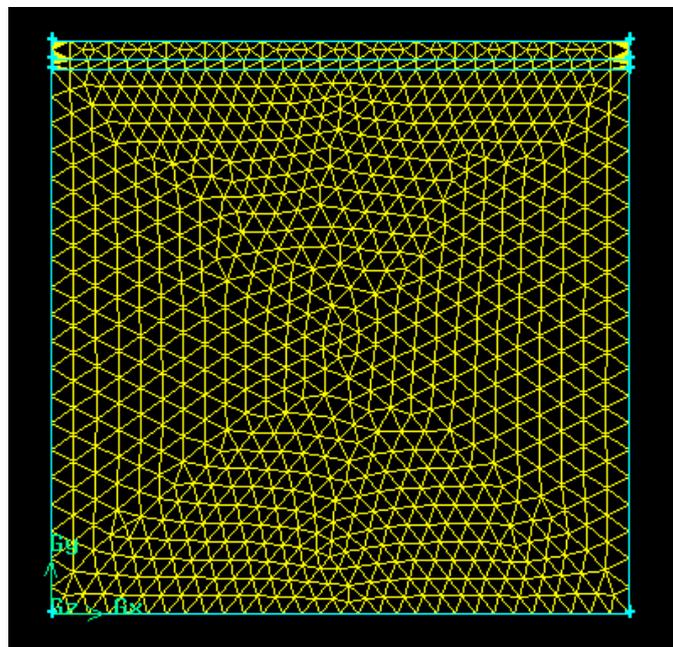
- **Etape 3** : Maillage du modèle.

La figure suivante représente la géométrie et le maillage qui est généré par le code Gambit, le maillage est de type quadratique structuré pour le domaine solide et fluide (air et MCP).

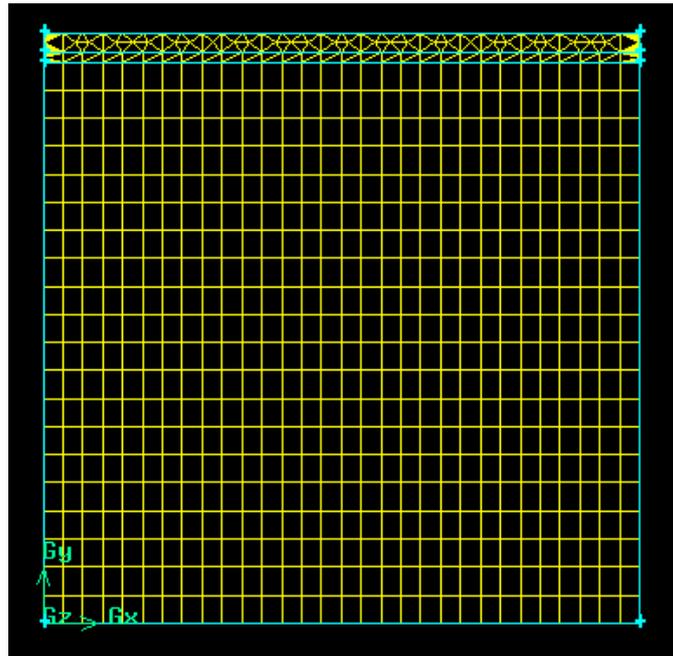
**1<sup>er</sup> model :**



**2<sup>ème</sup> model :**



3<sup>ème</sup> model :

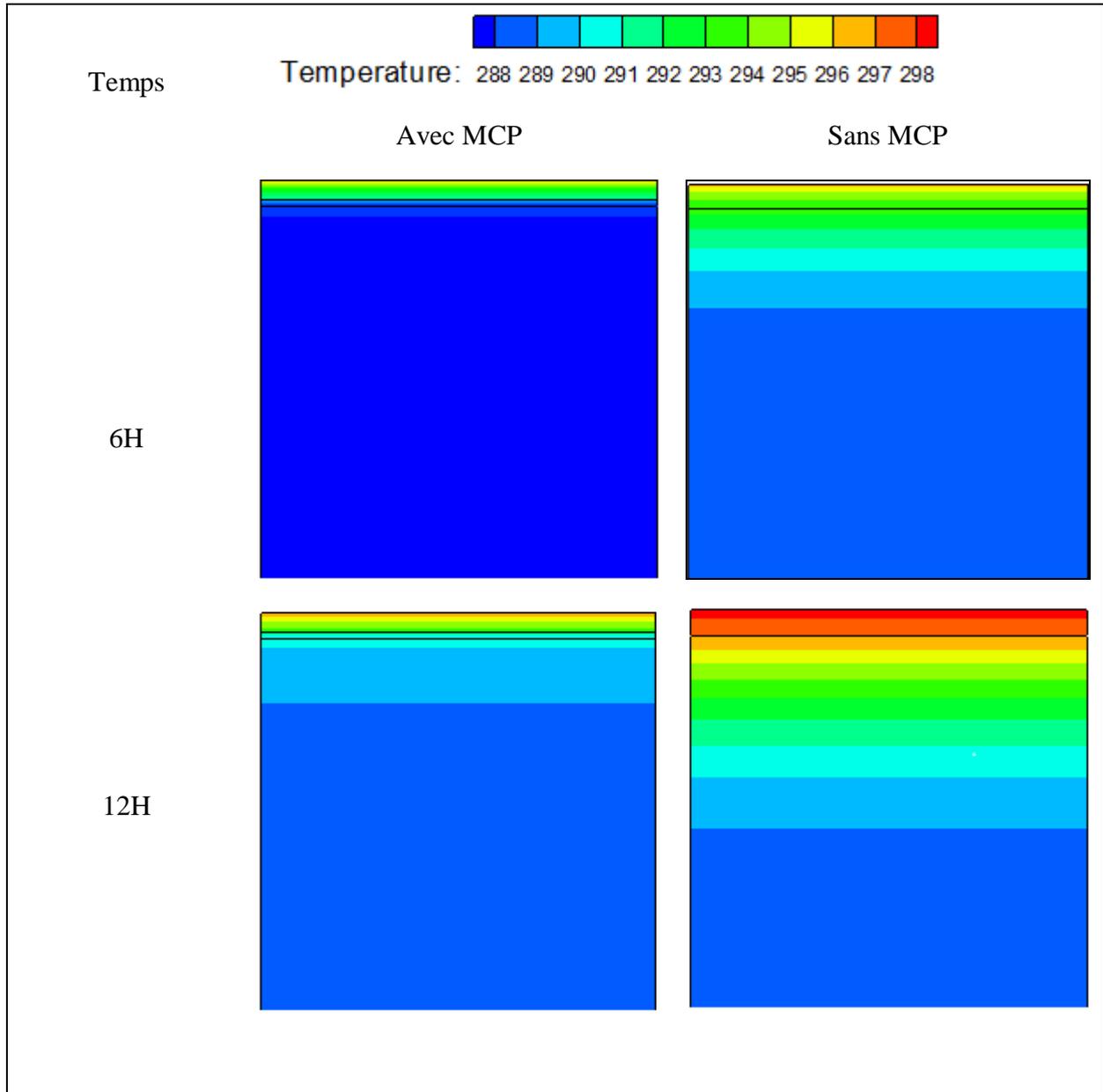


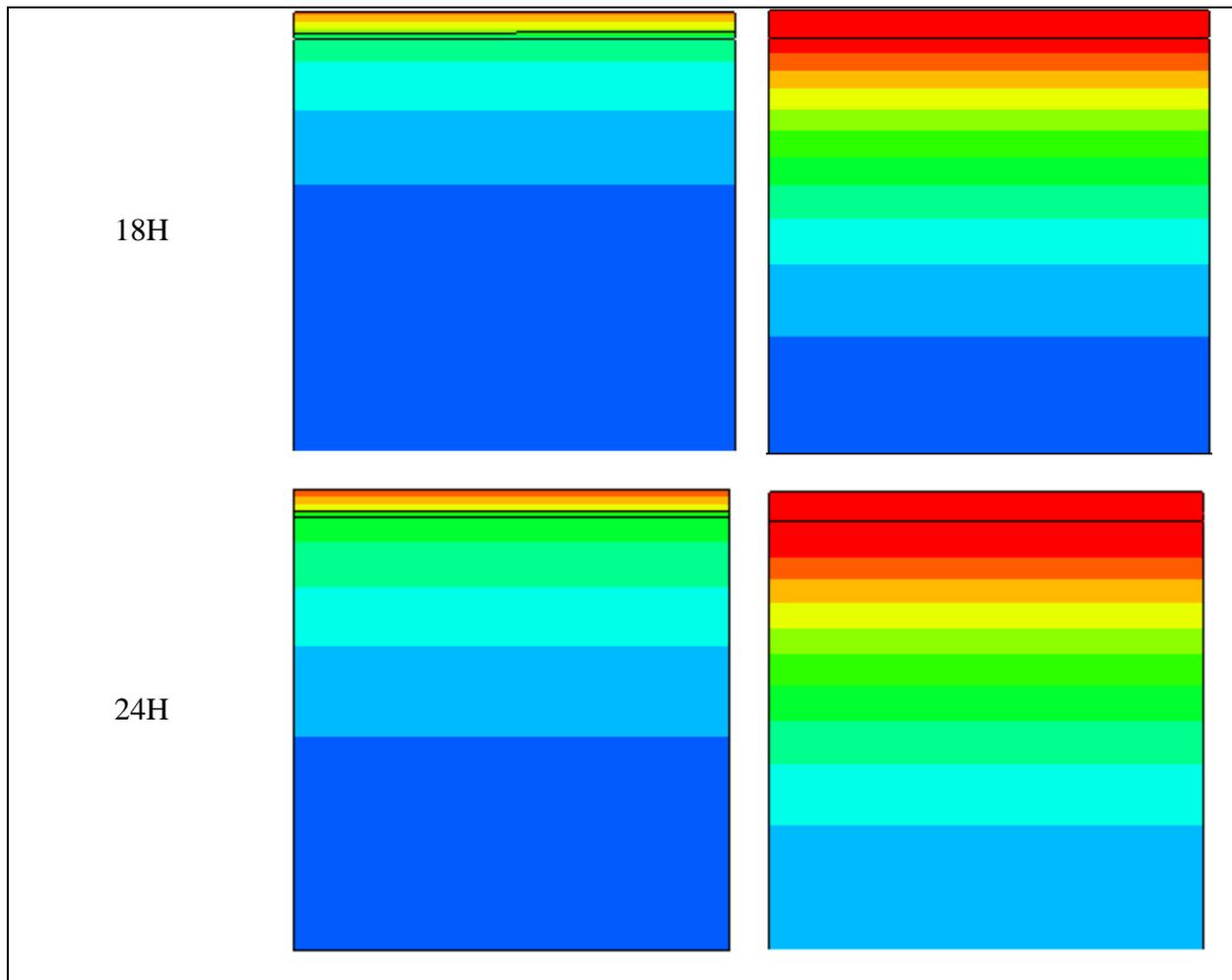
**Figure 4.5 :** Maillage du model étudié.

La précision des résultats dépend dans une large mesure de la qualité du maillage. Plusieurs maillages ont été opérés. Nous avons retenu une grille avec un maillage de 12920 nœuds qui donne des résultats très satisfaisants par le 1<sup>er</sup> model représenté.

**6. Résultats et discussions :**

La figure 4.6 montre l'évolution des champs de température de la cellule test avec et sans MCP aux instants 6h, 12h, 18h et 24h. La température extérieure imposée de façon constante a 27°C.





**Figure 4.6 :** Evolution des champs de température (en Kelvine) d'une cellule test Avec et sans paraffine

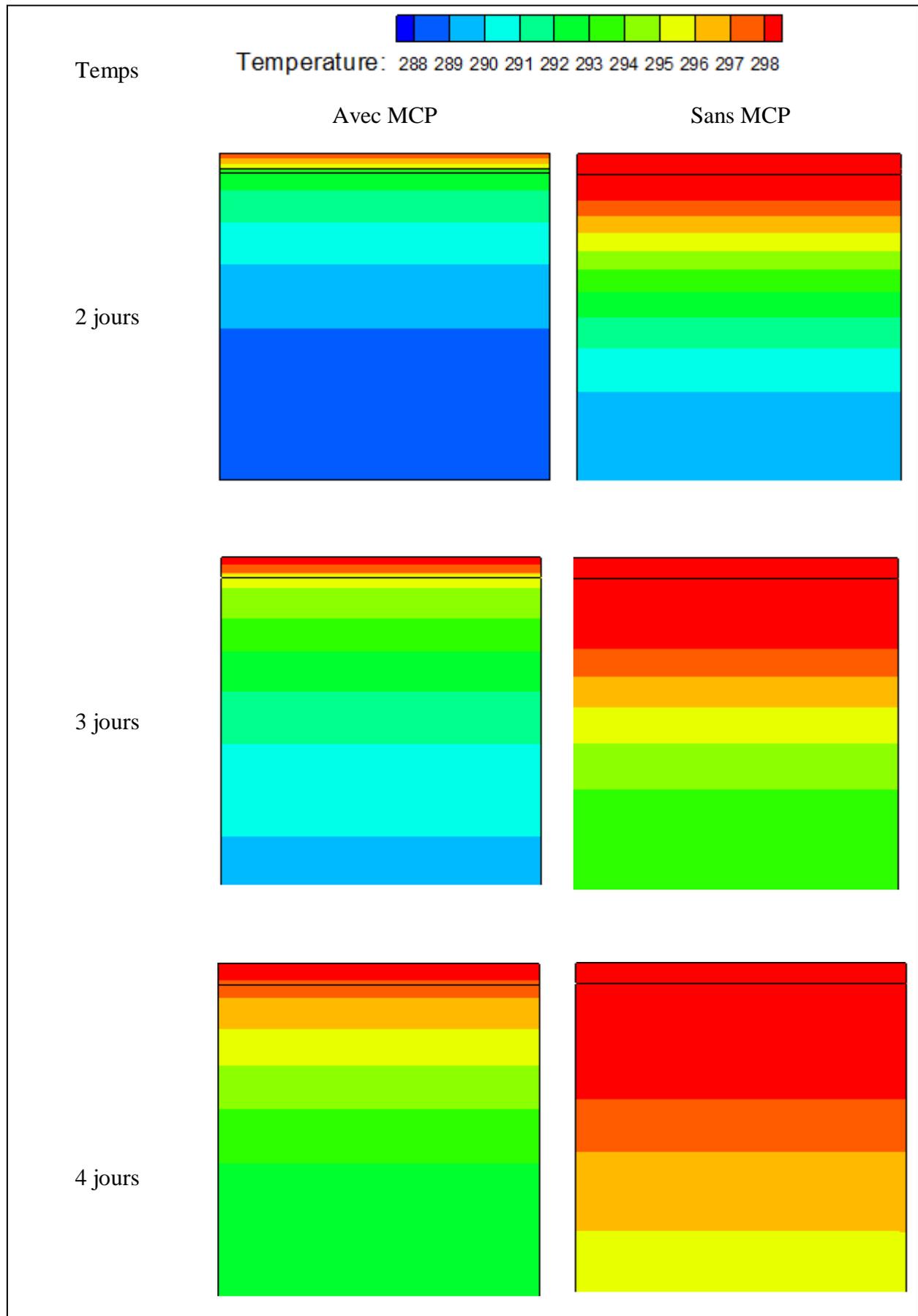
Nous constatons que le pic de température dans la paroi varie en fonction de l'évolution du temps. Pendant le rayonnement solaire  $q_{rad}$  il y a un réchauffement de la dalle et plus intense dans la couche du béton sans paraffine à cause de la conductivité du béton ( $1.5 \text{ W/m.K}$ ) et absence d'isolant. Cependant dans le cas avec paraffine l'évolution de température est faible parce que est entrain de ce chargé ou d'absorber l'énergie thermique.

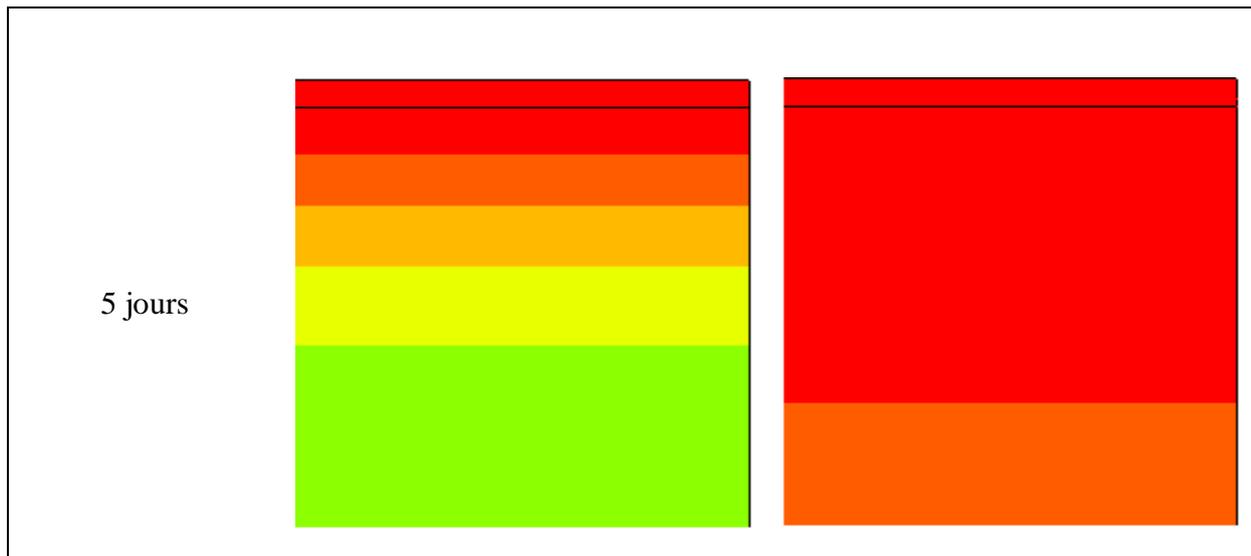
A  $t=6 \text{ h}$ , Correspond au début du réchauffement de la cellule test lorsque les paraffine sont encore à leurs état solide. La température de l'extérieure à commencer à influencer sur la température interne, la cellule sans paraffine a été la plus influencé que celle qui contient le MCP, l'écart de la température tend à s'amplifier peu à peu par rapport au temps (h).

A  $t=12h$ , le rayonnement solaire est maximum provoque le réchauffement des cellules spécialement celle sans paraffine car celle qui est avec MCP est moins provoqué à cause de la présence des matériaux à changement de phase qui se charge avec la température extérieure et se fusionner et la température à l'intérieure de la cellule commence à s'élargir entre les deux cellules différentes (avec et sans paraffine) qui arrive à  $3^{\circ}C$ .

A  $t=18h$ , la température à l'intérieure de la cellule (avec et sans paraffine) continue à augmenter malgré que la température de l'extérieure et le rayonnement solaire reste constante mais l'augmentation sur la cellule sans MCP est plus supérieure qu'à la cellule avec MCP. Ce phénomène du au stockage de la chaleur sensible dans le béton et le stockage de la chaleur latente dans le paraffine.

A la fin de la journée ( $t=24h$ ), la température interne des cellules est plus homogène et plus confort dans la cellule avec paraffine, donc il faut bien choisir le matériau à changement de phase pour offrir un confort thermique maximum. Il est à noter la présence d'un gradient de température entre le plafond et le bas de la cellule teste, Par conséquent, il y a une influence significative de la conductivité thermique du béton et du MCP sur la température intérieure.



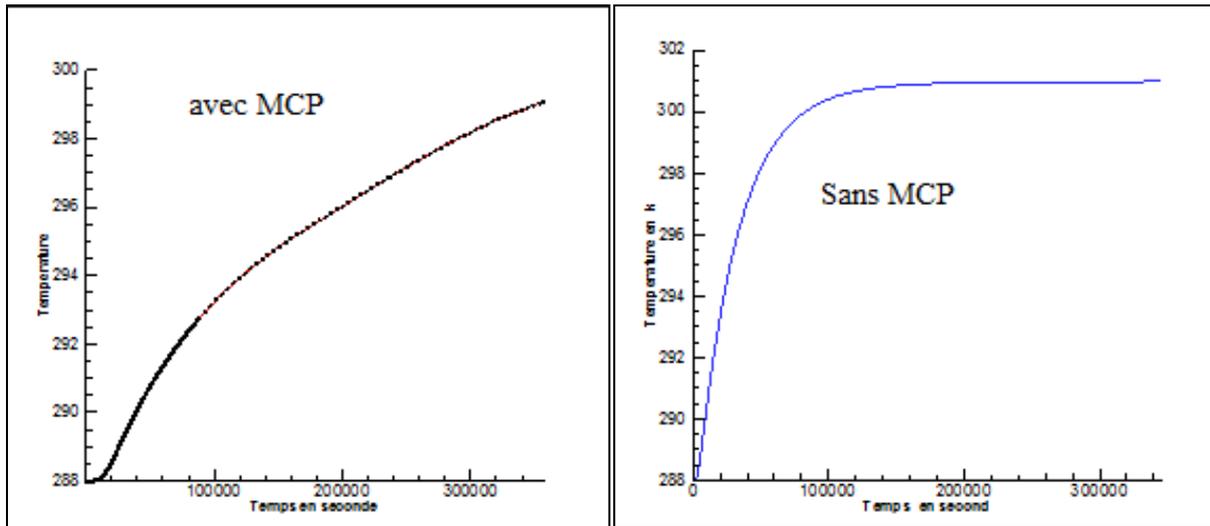


**Figure 4.7 :** Evolution de températures durant 04 jours

La figure 4.7 présente l'évolution du champ de température de l'air pendant quatre jours. La température intérieure se stabilise entre 22°C et 25°C (Cas avec paraffine) et entre 25°C et 27°C (Cas sans paraffine) à 24:00 de la journée avec une température extérieure constante à 27°C. La différence de température entre la chambre d'essai avec et sans MCP est de l'ordre 3°C. On voit que la température maximale moyenne est atteinte 23 °C dans la salle de test avec paraffine après 24 h et 24,2°C dans le cas sans paraffine, respectivement.

Après les premiers 24 heures, la température à l'intérieure des cellules continué à augmenter plus dans la cellule sans paraffine que l'autre avec paraffine pendant les autres quatre jours. On peut dire que Le MCP peut réduire considérablement la température intérieure. Les toitures composées de paraffine améliorent le confort thermique de la chambre d'essai en dans ces conditions.

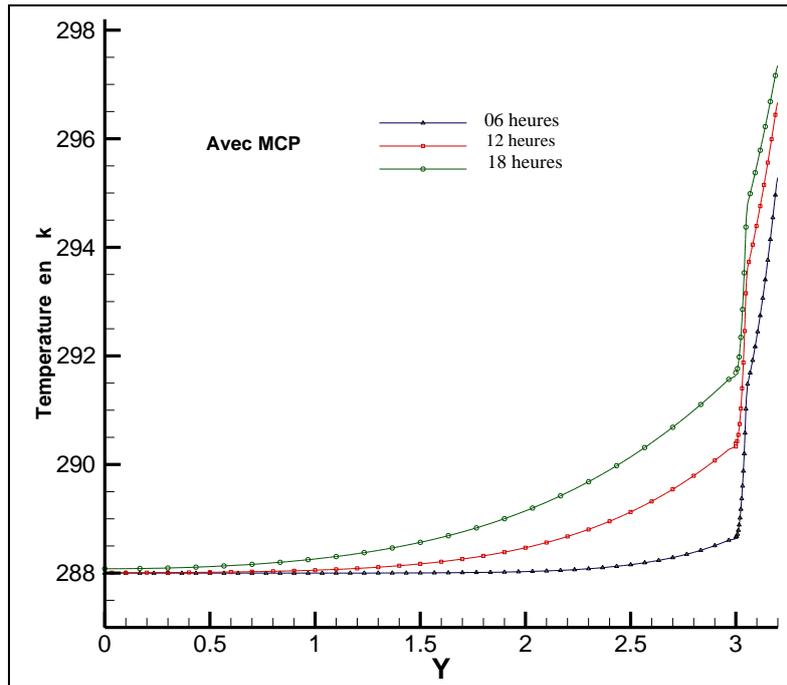
Un autre effet est l'amélioration de la convection naturelle dans le cas de cellule teste avec MCP ce qui diminue le gradient de température de l'air dans la chambre test. Le pic de température maximum est enregistré près du plafond ceci indique clairement la présence de pont thermique



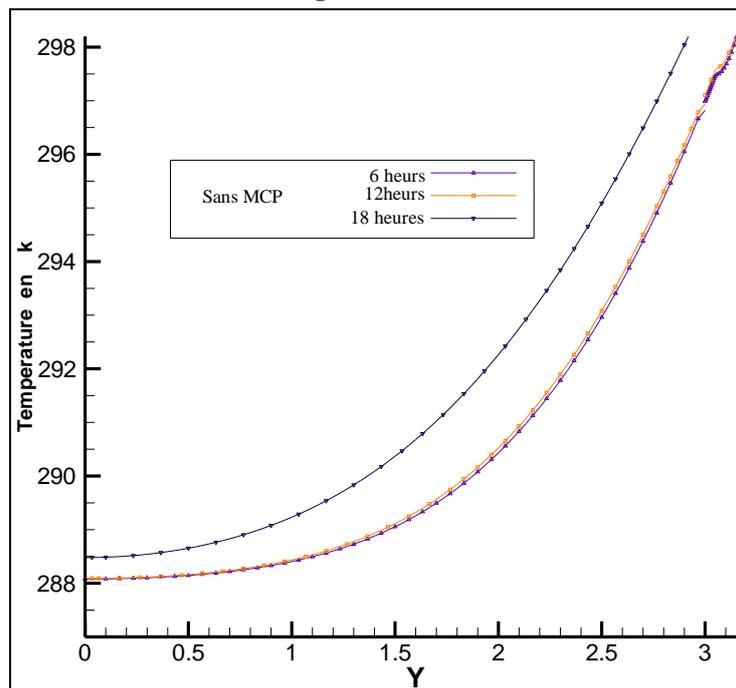
**Figure 4.8 :** Evolution en fonction du temps (en seconde) des Températures intérieure avec et sans paraffine

La figure 4.8 présente les profils de températures intérieures de la cellule test durant 04 jours (96 heures) avec et sans paraffine. On peut remarquer que l'amplitude des températures de la chambre test sans paraffine est plus importante (+27°C) par rapport aux températures de la chambre test avec paraffine (25.5°C). Toutefois, un déphasage de temps est observé autour 6,3 h à la présence des Matériaux à changement de phase l'influence de la température sur les cellules est plus long cela veut dire que le paraffine se charge à partir de la température extérieure sur eux et joue un rôle d'accumulateur d'énergie thermique et régule plus parfaitement la température de l'ambiance.

Pour comparer les performances de stockage thermique, une simulation numérique avec et sans paraffine est examinée.



**Figure 4.9.a :** Profils de températures aux instants (6, 12, et 18h) de la journée avec paraffine

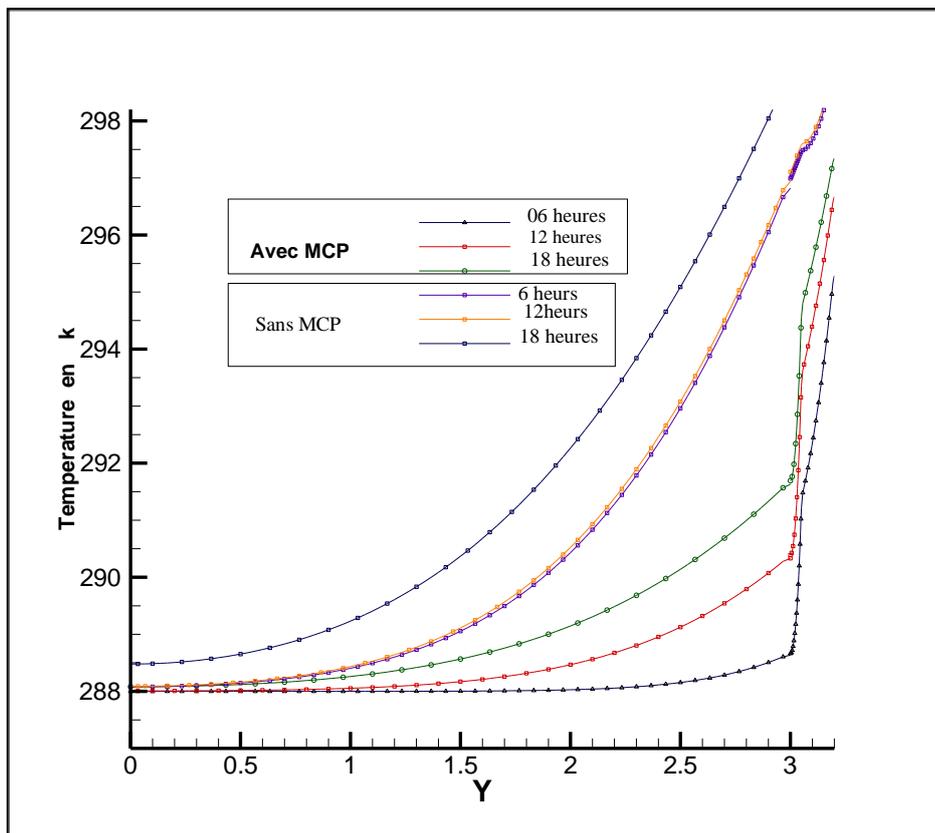


**Figure 4.9.b :** Profils de températures aux instants (6, 12, et 18h) de la journée Sans paraffine

Les figures 9a et 9 b illustrent les profils des températures intérieures ( $x=1,5m$ ), avec et sans paraffine à différents instants (6, 12 et 18 heures)

Au début de période  $t=06$  h, nous enregistrons le début de réchauffement dans l'habitat et à 12 h, la température ambiante dans le cas sans paraffine atteint  $19^{\circ}\text{C}$  en raison de l'intense rayonnement solaire. Cependant, la température ambiante dans le cas avec paraffine reste inférieure à  $16^{\circ}\text{C}$  en raison de la couche de MCP, qui commence à absorber la chaleur par le processus de fusion / solidification. Cela montre que le gain de chaleur est effectivement absorbé par la paraffine.

À  $t=18$  h, on observe une augmentation de la température ambiante dans le cas sans MCP pour atteindre  $20^{\circ}\text{C}$  environ. La température dans le cas sans paraffine reste aux alentours de  $17^{\circ}\text{C}$ . Ainsi, la paraffine agit comme un accumulateur d'énergie thermique et de régulateur parfait de la température ambiante comparée au cas sans paraffine



**Figure 10** : Profils de températures aux instants (6, 12, et 18h) de la journée Sans et avec paraffine

### **7. Conclusion :**

Une dalle associant un matériau à changement de phase a été étudiée. Une cellule-test composée d'un seul niveau utilisant cette dalle a été modélisée et ses performances ont été comparées à celles d'une cellule-test ayant une dalle classique. L'étude numérique a été effectuée à l'aide du logiciel Fluent 6.3.26 pour simuler la cellule test équipée de MCP et utilisant les apports solaires et capable de traiter le problème de changement de phase en prenant une capacité thermique massique effective. Le comportement thermique de la cellule test avec et sans paraffine a été simulé et comparé. Les résultats confirment que la présence de paraffine permet de jouer un rôle remarquable dans le confort thermique notamment en stabilisant la température du milieu dans lequel il est inséré. La présence de MCP dans de telle épaisseur mince joue son rôle d'« amortisseur thermique » et permet d'atténuer les variations de température.

Enfin, ce chapitre montre que, pour l'exemple étudié, les dalles de bâtiment intégrant des matériaux à changement de phase présentent de meilleures performances énergétiques qu'une dalle de bâtiment classique.

## Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail de recherche, une solution d'économie d'énergie dans l'habitat peut être envisagée et qui consiste à accroître l'inertie thermique des dalles par l'incorporation des matériaux à changement de phase, caractérisé par une faible masse structurelle et une inertie thermique améliorée

Cette recherche a pour but d'étudier le phénomène de stockage/déstockage de ce type de matériaux MCPs d'importantes quantités de chaleur dans des volumes réduits par le processus fusion / solidification à des températures caractéristiques

L'objectif de cette étude est d'assurer la stabilité de la température du milieu ambiant intérieure d'une cellule à des perturbations de température du milieu ambiant extérieur. Cette cavité pouvant désigner un espace habitable.

L'étude numérique est réalisée à l'aide d'un modèle physique traitant une cellule avec une couche de MCP sur la toiture et une autre cellule sans MCP pour faire la simulation sous des conditions climatiques de la zone de Tlemcen. Le transfert de chaleur avec changement de phase est modélisé numériquement par la méthode de la capacité thermique effective  $C_{eff}$ . Le type de matériau à changement de phase utilisé est le Paraffine qui demande une température de fusion arrive à 22.5°C.

L'ensemble des applications traitées confirme que la présence de ce matériau permet de jouer un rôle notable dans le confort thermique, notamment en stabilisant la température du milieu dans lequel il est inséré et permet aussi de réduire la consommation quotidienne d'énergie et fournit un milieu interne modéré

Les résultats numériques obtenus montrent que l'utilisation des MCP dans les dalles en tant que composants de stockage d'énergie peut réduire la température intérieure d'environ 3-4°C par rapport à la température extérieure, le MCP se charge pendant la journée par la chaleur extérieure et la restituer pendant la nuit. Le temps aussi joue un rôle au fonctionnement de la température extérieure sur les cellules on observant que la cellule avec MCP se chauffe plus lentement que la cellule sans MCP on peut dire que le MCP est un amortisseur thermique.

Malgré le cout élève de ce type de matériau à changement de phase mais ses avantages peuvent couverts ce défaut, donc il faut bien trouver une solution qui convient pour une utilisation facile et peu couteuse des MCPs.

## Bibliographie

1. *www.ecuperation-chaueur.fr*. [En ligne]
2. **M.Mazman**. Latent and heat storage and application. Adana : PhDthesis, Institute of natural and applied sciences , 2006. 110.
3. **Maha.A**. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments, Thèse de Doctorat: Mécanique-Energétique, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2004.
4. **L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A. Mishkinis et P.V. Bohan**. «Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine». s.l. : Applied Thermal Engineering, 2000. Vol. 20, 913-923.
5. **Flory-Celini, C**. Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiels existant. *thes de Doctorat genie civil*. Lyon : s.n., 2008.
6. **A. Bricard, J. Chabanne, A. Manificat, F. Vacher**. Stockage et modélisation entre 100 et 235° C. *Revue générale Thermique* . 1983. Vol. 254, 143-149.
7. **H.O.Paksoy**. Thermal analysis of heat storage Materials and integrated heat pump and thermal energy storage system . Adana : PhD, Ç.U.Institute of natural and applied sciences , 1992.
8. **H.H.Ozturk**. The research on storage of solar energy in phase change material PCM for greenhouse heating . s.l. : C.U.Institute of natural and applied sciences , 1997.
9. **L.F.Cabeza, H.Mehling et**. Heat and cold storage with PMC. Berlin : Heidelberg, 2008.
10. **WWW.MCI6TECH.COM**. [En ligne]
11. **Sharma, Atul**. «Review on thermal energy storage with phase change material and. *Renewable and sustainable reviews* . 2009. 13.
12. **D.Feldman, D.Banu , D.Hawes A.Athientis and C.Liu**. Energy storage building materials with organic MCPs . Georgia : s.n., 1993. Vol. 2.
13. **M.Larnicol**. «Stocker de la chaleur avec les Matériaux à changement de phase». Ghislenghien : s.n., 2009.

14. **D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu.** Energy storage building materials with organic PCM's. *28th Intersociety energy conversion engineering* . Georgia : s.n., August 8-13, 1993. Vol. 2, 143-148.
15. **Pedro, M. Pierre.** «développement d'un procédé de stockage d'énergie thermique haute. Institut national polytechnique de Toulouse : s.n., Lundi 9 décembre 2013.
16. **L.F. Cabeza, G. Svensson, S. Hiebler et H. Mehling.** Thermal performance of sodium acetate trihydrate thickened with different materials as phase change energy storage material . 2003. Vol. 23, 1697-1704.
17. **Abhat.** Low temperature latent heat thermal energy storage . *Heat storage materials* . 1983. Vol. 30, 4.
18. **M.M. Farid et al.** A review on phase change energy storage . *Materials and applications* . 2004. Vol. 45, 1597-1615.
20. **J.C. Petinelli.** «Produits paraffineux dans le domaine du stockage de l'énergie thermique, communication à Stockage d'Énergie par Chaleur Latente. la Baule : s.n., 12-13 juin 1980.
21. **C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlison.** Solar thermal energy storage in phase change materials. *ASES Annual conf. USA* : s.n., 1992.
22. **A. Sharma, V.V. Tyagi , C. Chen et C.R. Buddhi.** Review on thermal energy storage with phase change materials and applications . *Renewable and sustainable energy reviews* . 2009. 13.
23. **K. Peippo, P. Kauranen and P. D. Lund.** A multicomponent PCM wall optimized for solar heating . *Energy and buildings* . 1991. Vol. 17, 259-270.
24. **GmbH, RUBITHERM.** Paraffin in thermal energy storage application . s.l. : [www.rubitherm.com](http://www.rubitherm.com).
25. **L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A.D. Gracia et A.I. Fernandez.** Materials used as PCM in thermal energy storage in building . *A review, Renewable and Sustainable Energy reviews* . 2011. Vol. 15, 1675-1695.
26. **A.K. Sircar, I.O. Salyer and.** Phase change materials for heating and cooling of residential buildings . *Proceedings of the 28th intersociety energy conversion engineering conference* . Reno, Nevada : s.n., 12-17 Aout 1990.
27. **A.K. Sircar, I.O. Salyer.** development of phase change technologie for heating and cooling of residential buildings and other applications . *Proceedings of the 28th inter society energy conversion engineering conference* . Atlanta : s.n., 8-13 Aout 1993.

28. **E.Jahns.** Microencapsulated phase change material . *Basf AG.* s.l. : ekkehard.jahns@basf-ag.de.
29. **H.J.Zhu, M.N.Hawlater.M.S.Uddin et.** Microencapsulated phase change materials . New Zealand : s.n., 2002.
30. **M.N. Hawlater, M.S. Uddin et H.J. Zhu.** Encapsulated phase change materials for thermal energy storage . *Experiments and simulation* . 2002. 159-171.
32. **Kenisarin, M. M.** High temperature phase change materials for thermal energy storage . *Renewable and sustainble energy reviews* . Apr 2010. Vol. 14, 3.
33. **Pielichowski, K. Pielichowska et K.** Phase change materials for thermal energy storage . *Progress in materials science* . Aug 2014. Vol. 65, 01.
34. **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 transferfluids for concentrated solar powar . 2011.
35. **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 sustainble energy reviews* . May 2013. Vol. 21, 0.
36. **B. Zalba, J. M. Marin, L. F. Cabeza, et H. Mehling.** Review on thermal energy storage with phase change:materials, heat transfert analysis and applications. *Applied thermal engineering* . Feb 2003. Vol. 23, 3.
37. **Lane.** Solar heat storage . *Latent heat material* . USA : Background and scientific , 1983. Vol. 1.
38. **Telkes.M.** Thermal storage for solar heating and cooling . *Proceedings of workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings* . Charlottesville, Virginia, USA : s.n., 1975.
39. **Al, Telkes &.** Trombe wall with phase change storage material . *Proceedings of the 2nd national passive solar conference* . Philadelphia,PA,USA : s.n., 1978.
40. **K.Kaygusuz, A.Sari et.** Energy and exergy calculations of latent heat storage systems. *Energy sources* . pp. 117-126.
41. **El-Dessouky, H., Al-Juwayhel, F.** Effectiveness of a thermal energy storage system using phase change materials. *Energy conversion and management*. Vol. 38, pp. 601-617.
42. **Bransier.** Stockage Périodique par Chaleur Latente. *Aspects Fondamentaux Liés à la Cinétique des Transferts, Int. J. Heat Mass Transfer*. 1979. Vol. 22, pp. 875-883.

43. [9] **Farid, M.M., Husian, R.M.** An electrical storage heater using the phase change method of heat storage. *Energy Conversion and Management*. 1990. Vol. 30(3), pp. 219–230.
44. **M.Galanis, Laouadi. A., Lacroix.** Thermal performance of a planar latent heat energy storage unit with electric heat sources. *Fundamentals of phase change*. Chicago. Nov : s.n., 1994.
45. **Brousseau. P., Lacroix. M.** "Numerical simulation of a compact multi-layer phase change material energy storage system". *Fundamentals of phase change: Sublimation Solidification*. Chicago : s.n., 1994. pp. 13- 18.
46. **Farid M. M., et Kanzawa A.** Thermal Performance of a Heat Storage Module using PCM's with Different Melting Temperatures: Mathematical Modeling. *ASME J. Solar Energy Eng.* (1989). Vol. 111, pp. 152- 157.
47. **Farid M. M., Kim Y., et Kanzawa A.** Thermal Performance of a Heat Storage Module using PCM's with Different ~MeltingT emperatures: Experimenta. *ASME J. Solar Energy Eng.* ( 1990). Vol. 112, pp. 125- 132.
48. **A., Zhang . et Bejan.** Melting in an Enclosure Heated at Constant Rate. *J. Heat. Mass Transfer.* (1989). Vol. 22, 6, pp. 1063- 1076.
49. **K. Hirata T. et Nishida.** An Analysis of Heat Transfer using Equivalent Thermal Conductivity of the Liquid Phase during Melting Inside an Isothermally Heated Horizontal Cylinder. *J. Heat Mass Transfer.* (1989). Vol. 32, 9, pp. 1663-1670.
50. **H.E.S., Fath.** Heat Exchanger Performance for Latent Heat Thermal Energy Storage System. *Energy Conves. Mgmt : s.n., 1991.* Vol. 31, 2, pp. 49-155.
51. **M.Lacroix.** Numerical Simulation of a Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit. *Solar Energy.* (1993). Vol. 50, 4, pp. 357-367.
52. **C, Comini. G.. Nonino.** "Thermal analysis of floor heating panels". *numerical Heat Transfe.* 1994. Vol. 25, pp. 537-3150.
53. **J.L., Schoenfelder.** "Heat storage system adripted for incongruently melting heat storage materials and congruently melting heat storage materials" . *United States Patent.* 1980.
54. **Laouadi LAOUADI A. and LACROIX M. , L.** Thermal performance of a heat energy storage ventilated panel for electric load management. s.l. : International Journal of Heat and Mass Transfer, (1999). 42.
55. **Yamaha M., Misaki S.** An evaluation of PCM storage installed in air distribution systems. Sofia,Bulgaria, Stockholm : Second Workshop, November 1998. pp. 12-13.

56. **Vakialtojjar, S. M., and W. Saman.** Analysis and modelling of a phase change storage system for air conditioning applications. *Applied Thermal Engineering (Great Britain)*. 2001. 21, pp. 249-263.
57. **Bansal NK, Buddhi D.** An analytical study of a latent heat storage system in a cylinder. s.l. : Solar Energy, 1992. Vol. 33(4), pp. 235–242.
58. **A. Kurklu, A., O' Zmerzi, A., Bilgin, S.** Thermal performance of a water- phase change material solar collector. s.l. : Renewable Energy , (2002). Vol. 26, pp. 391–399.
59. **W.Saman, F.Bruno,E.Halawa.** Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system. s.l. : Solar Energy, 2005. Vol. 78, pp. 341-349.
60. **T.Kuroki, M.Higuchi, M.Nakamuri.** Application of phase change material to passive cooling of apartment house. Tokyo, Japan : 3rd workshop, oct.2002.
61. **Vineet Veer Tyagi and D. Buddhi.** PCM thermal storage in buildings: a state of art,. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, in press.* 2006.
62. **Paolo Principi, Roberto Fioretti.** PCM (Phase Change Materials) : A state of the art. November 2005.
63. **J.K. Kissock, J.M. Hannig, T.I. Whitney et M.L. Drake.** Early results from testing phase change wallboard . *Phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage* . 16-17 April 1998.
64. **T. Kondo, T. Lbamoto et T. Yuuji,.** Research on the thermal storage of PCM. KANAGAWA,Japon : Department of Architecture, Faculty of Engineering.
65. **I. Ceron, J. Neila et M. Khayet,.** Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43, pp. 1874-1869.
66. **U. Stritih, V. Butala ,.** Energy Savings in Building with a PCM Free Cooling System. s.l. : Journal of Mechanical Engineering 57, 2011. pp. 125-134.
67. "Sugar Alcohol based Materials for Seasonal Storage Applications", . s.l. : SAMSSA Newsletter, 2015.
68. **A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda, et T. Akiyama,.** "Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate forwaste heat transportation system" ,. *Heat Mass Transfer*. 2008. Vol. 44, 7, pp. 763-769.

69. **A. Gil, C. Barreneche, P. Moreno, C. Solé, A. Inés Fernandez, et L. F. Cabeza.** "Thermal behaviour of d-mannitol when used as PCM: Comparison of results obtained by DSC and in a thermal energy storage unit at pilot plant scale",. *Applied Energy*. Nov 2013. Vol. 111, pp. 1107-1113,.
70. **A. Solé, H. Neumann, S. Niedermaier, I. Martorell, P. Schossig, et L. F. Cabeza.** "Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage". *Solar Energy Materials and Solar Cells*. July 2014. Vol. 126, 0, pp. 125-134,.
71. **F. Kuznik, J. Virgone, J.J Roux.** Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-experimental investigation. *Energy and buildings*. 2008. 40(2), pp. 148-156.
72. **H. Necib, N. Settou, N. Saifi et D. Damene.** Brick experimental and numerical study of a usual brick filled with pcm to improve the thermal inertia of buildings . 15-17 fevrier 2013.
73. International Electricity & National Gas Report & Cost Survey" International Electricity & National Gas Survey & Cost Comparison. 2009.
74. [countrysimeters.info](http://countrysimeters.info). [En ligne] 2019.
75. [www.energie-travaux.fr](http://www.energie-travaux.fr). [En ligne] 09 Mars 2017.
76. [www.lamaisonpassive.fr](http://www.lamaisonpassive.fr). [En ligne] mars 2012.
77. [www.edfenr.com](http://www.edfenr.com). [En ligne] 2016.
78. [www.environnement.brussels/thematiques/batiments](http://www.environnement.brussels/thematiques/batiments) . [En ligne] 21 fevrier 2013.
79. A common definition for zero energy buildings. s.l. : US department of energy , septembre 2015.
80. laboratoire de physique et ingénierie mathématique pour l'énergie et l'environnement et le bâtiment . [www.univ-reunion.fr](http://www.univ-reunion.fr) . [En ligne] 2013.
81. **Mazouz.S.** Confort thermique. s.l., département d'architecture université de Biskra cours . p. 55.
82. **Hoffmann, J. B.** Ambiances climatisées et confort thermique. Edition COSTIC , 1994.