

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : TECHNOLOGIE  
Filière : GENIE MECANIQUE  
Spécialité : ENERGETIQUE

Thème

Etude expérimentale du stockage thermique à base des Matériaux à Changement de Phase (MCP)

**Présenté Par :**

- 1) BERRAHIL Mahmoud
- 2) AHMED AMMAR Abderahim

**Devant les jurys composés de :**

M.BELHAMIANI	Docteur.	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
SARIHASSOUN Zakaria	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur
ALIANE Khaled	Professeur	UABT (Tlemcen)	Co.encadreur
F.BOUFIA	Docteur	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice

*Année universitaire 2018/2019*

## REMERCIEMENTS

*D'abord nous remercions le bon Dieu qui nous a donné la foi, le Courage et la patience pour bien mener ce travail.*

*Ensuite nous exprimons nos profondes gratitude à nos encadreurs monsieur **SARI HASSOUN Zakaria** et monsieur **ALIANE Khaled** qui ils sont acceptés de diriger ce travail, ses conseils et ses disponibilité durant toute l'année pour arriver à concrétiser ce document.*

*Par ailleurs nous tenons à remercier les membres du jury qui nous ont fait l'honneur par leurs présences et leurs disponibilités, à accepter d'évaluer ce travail.*

*Enfin, nous tiens à remercier les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste TRAVAIL*

*A ma très chère mère, source de tendresse*

*A mon très cher père, qui m'encourage*

*DANS les instants délicats*

*A mes chères sœurs*

*A mes chères amies*

*A mes TANTES et oncles*

*A toute ma famille*

*A tous mes Amis*

**BERRAHJI Mahmoud**

# Dédicace

*Je dédie ce modeste TRAVAIL*

*A ma très chère mère, source de tendresse*

*A mon très cher père, qui m'encourage*

*DANS les instants délicats*

*A mes chères sœurs*

*A mes chères amies*

*A mes TANTES et oncles*

*A toute ma famille*

---

*A tous mes Amis*

**AHMED AMMAR Abdelakim**

# Liste des figures

---

## Liste des figures

### Chapitre 1 : Recherche bibliographique

<b>Figure 1.1:</b> l'intégration des éléments de MCP dans les murs solaires passifs.....	5
<b>Figure 1.2:</b> dessin en coupe du système.....	6
<b>Figure 1.3:</b> Structure réelle du mur en PCM.....	6
<b>Figure 1.4:</b> schéma de principe du système d'air chauffé.....	6
<b>Figure 1.5:</b> Toit avec PCM.....	8
<b>Figure 1.6:</b> Configuration fabriquée de PCM.....	9
<b>Figure 1.7:</b> Variation de la température avec le temps.....	10
<b>Figure 1.8:</b> Variation de température pour différentes dates aux heures de pointe.....	10
<b>Figure 1.9:</b> Détaillé vue croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique s'associé avec MCP.....	12
<b>Figure 1.10:</b> Schéma d'un échangeur de résultats expérimentaux.....	13
<b>Figure 1.11:</b> Système de stockage de l'énergie solaire utilisant un MCP.....	13
<b>Figure 1.12:</b> Fonction principale du système de refroidissement air-MCP: (a) pendant le jour, le MCP est en train de fondre et (b) pendant la nuit, le MCP se solidifier.....	14
<b>Figure 1.13:</b> Représentation schématique du système stockage d'énergie thermique.....	14
<b>Figure 1.14:</b> Nombre de Nusselt local pour différentes positions et différents nombres de Fourier.....	15
<b>Figure 1.15:</b> Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.....	15
<b>Figure 1.16:</b> Effet de température d'entrée du HTF sur le temps de fusion du MCP....	16
<b>Figure 1.17 :</b> Effet de température d'entrée du HTF sur la fraction de liquide du MCP..	16
<b>Figure 1.18:</b> module de stockage de chaleur latent avec deux PCMs(LHSU2). .....	16
<b>Figure 1.19:</b> Variation de la température en fonction de temps ; comparaison entre les mesures et les calculs.....	17
<b>Figure 1.20:</b> Système de stockage de l'énergie solaire utilisant un MCP.....	18
<b>Figure 1.21:</b> Lit de stockage multicouche et modèle physique.....	18
<b>Figure 1.22:</b> Températures en fonction de temps pour différents simples points de mesure. ....	19
<b>Figure 1.23:</b> Emplacements de thermocouples l'intérieur de la sphère.....	19
<b>Figure 1.24:</b> Représentation schématique du domaine physique.....	20
<b>Figure 1.25:</b> Modèle de calcul de la capsule avec du vide.....	20
<b>Figure 1.26:</b> Evolution des phases solide et liquide pendant la solidification.....	25

## Liste des figures

---

<b>Figure 1.27:</b> Variation transitoire de la fraction liquide pour différente concentration .....	26
--	----

### **Chapitre 2 : Modélisation des matériaux à changement de phase (MCP)**

<b>Figure 2.1:</b> Différents types de stockage thermique de l'énergie thermique .....	29
<b>Figure 2.2:</b> Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	30
<b>Figure 2.3 :</b> Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide.....	31
<b>Figure 2.4:</b> Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange.....	32
<b>Figure 2.5 :</b> Evolution de Q en fonction de T pour un corps pur.....	33
<b>Figure 2.6 :</b> Classification des PCM.....	37
<b>Figure.2.7:</b> Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP .....	47
<b>Figure.2.8:</b> Schéma de principe de la gestion thermique d'une puce électronique avec un MCP .....	48
<b>Figure 2.9 :</b> Echangeur de chaleur à MCP.....	49

### **Chapitre 3 : Résultats et interprétations**

<b>Figure 3.1 :</b> Schéma de l'installation expérimental.....	52
<b>Figure .3.2:</b> Serpentin du chauffe-eau utilisé .....	53
<b>Figure 3.3 :</b> Serpentin du chauffe-eau utilisée .....	53
<b>Figure 3.4:</b> la Leine de verre utilisée comme calorifuge .....	54
<b>Figure 3.5 :</b> Calorifugeage du serpentin avec la Leine de verre.....	54
<b>Figure 3.6 :</b> Serpentin calorifugé avec une plaque d'aluminium à l'intérieur .....	55

## Liste des figures

---

<b>Figure 3.7</b> : Raccord en « Te » pour l'entrée et la sortie du serpentin .....	55
<b>Figure 3.8</b> : Emplacement des thermocouples dans le serpentin .....	56
<b>Figure 3.9</b> : Le module du banc d'essai .....	57
<b>Figure 3.10</b> : Réservoir d'eau chaude .....	58
<b>Figure 3.11</b> : Résistance électrique de chauffage .....	58
<b>Figure 3.12</b> : contrôleur de température .....	58
<b>Figure 3.13</b> : pompe de circulation du fluide .....	59
<b>Figure 3.14</b> : Différents capteurs de mesure .....	59
<b>Figure 3.15</b> : Connecter l'alimentation en eau froide et égouttez .....	60
<b>Figure 3.16</b> : Le matériel et les logiciels VDAS .....	60
<b>Figure 3.17</b> : Connexion le banc d'essai avec logiciel (VDAS) .....	61
<b>Figure 3.18</b> : Evolution de la température de MCP pour une température du HTF=60°C et pour les trois débits étudiée.....	63
<b>Figure 3.19</b> : Evolution de la température de MCP pour une température du HTF=70°C et pour les trois débits étudiée.....	64
<b>Figure 3.20</b> : Evolution de la température de MCP pour une température du HTF=75°C et pour les trois débits étudiée.....	64
<b>Figure 3.21</b> : Influence de la température d'entrée du HTF .....	65
<b>Figure 3.22</b> : Influence de la masse du MCP .....	67
<b>Figure 3.23</b> : Ajout de 10% de sel .....	68
<b>Figure 3.24</b> : Ajout de 20% de sel .....	69
<b>Figure 3.25</b> : Comparaison pour un ajout de 10% de sel.....	69
<b>Figure 3.26</b> : Comparaison pour un ajout de 20% de sel.....	72

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

### Chapitre 1 : Recherche bibliographique

**Tableau 1.1 :** Systèmes passifs verticaux de stockage de chaleur latente ..... 21

### Chapitre 2: Modélisation des matériaux à changement de phase (MCP)

**Tableau 2.1 :** Propriétés thermo physiques de certains MCP ..... 36

### Chapitre 3: Résultats et interprétations

**Tableau 3.1:** Caractéristiques de paraffine alimentaires de 50/52 à 68/70.....62

**Tableau 3.2:** Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents débits  
..... 66

**Tableau 3.3:** Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents débits  
..... 67

**Tableau 3.4:** Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents  
température et  
 $Q_v=4.5l/mn$ ..... 70

**Tableau 3.5:** Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents  
température et  $Q_v=4.5l/mn$  ..... 71



# Nomenclature

---

## Nomenclature

<b>Cp</b>	Chaleur massique [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ]
<b>D</b>	Diamètre de la conduite [m]
<b>fr</b>	Fraction liquide/solide [-]
<b>H</b>	Enthalpie totale [ $kJ kg^{-1}$ ]
<b>h</b>	Coefficient de transfert thermique convectif [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]
<b>q</b>	Chaleur latente [ $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ]
<b>L</b>	Langueur de la plaque [m]
<b>Nu</b>	Nombre de Nusselt [-]
<b>R</b>	Rayon de la conduite [m]
<b><math>\delta</math></b>	Epaisseur de la paroi.
<b>Re</b>	Nombre de Reynolds [-]
<b>T</b>	Température [K]
<b>t</b>	Temps [s]
<b>U</b>	Vitesse d'écoulement [ $m s^{-1}$ ]
<b>x</b>	Coordonnées axiales [m]
<b>x</b>	Position axiale le long du cylindre [m]
<b>Qv</b>	Débit volumique [ $l mn^{-1}$ ]

### Symboles Grecs

<b><math>\rho</math></b>	Densité [ $kg/m^3$ ]
<b><math>\mu</math></b>	Viscosité dynamique [ $kg/m.s$ ].
<b><math>\Delta t</math></b>	Pas de temps.[s]
<b><math>\lambda</math></b>	Conductivité thermique [ $W /m.K$ ]
<b><math>\nu</math></b>	Viscosité cinématique [ $m^2/ s$ ]

### Abréviations

<b>THF</b>	Température d'entrée d'eau chaude
<b>MCP</b>	Matériau à changement de phase
<b>NEPCM</b>	Nanomatériau à changement de phase

# Table des matières

---

## TABLE DES MATIERES

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Résumé	
Introduction générale .....	1

### Chapitre 1 : Recherche bibliographique

1.1 Introduction.....	3
1.2. Stockage d'énergie par chaleur latente .....	4
1.3. Stockage d'énergie par chaleur sensible .....	22
1.4. Amélioration des performances du stockage d'énergie .....	24
1.5. Conclusion .....	27

### Chapitre 2 : Modélisation des matériaux à changement de phase (MCP)

2.1. Introduction.....	28
2.2. Stockage de l'énergie thermique.....	28
2.2.1. Stockage par chaleur sensible.....	29
2.2.2 Le stockage par chaleur latente.....	31
a / Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente.....	33
b/ Les avantages du stockage par chaleur latente .....	34
2.2.3. Stockage Thermochimique .....	34
2.3. Les matériaux à changement de phase .....	35
2.3.1. Définition .....	35
2.3.2. Types des matériaux à changement de phase (MCP).....	35
a/ Les MCP inorganiques.....	35
b/ Les MCP Organiques.....	35
C/Les MCP eutectiques .....	36
2.3.3. Classification des matériaux à changement de phase(PCM) .....	37
a/ les composés organiques.....	38
b/ les sels hydratés.....	42

## **Table des matières**

---

2.3.4. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage.....	44
a- La surfusion.....	44
b- La surchauffe.....	44
c- La dilatation.....	44
2.3.5. Le choix d'un MCP .....	45
a. Considérations thermiques .....	45
b. Propriétés physiques .....	45
c. Considérations cinétiques.....	45
d. Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux.....	45
e. Considérations chimiques .....	45
f. Considérations économiques .....	46
2.3.6. Applications des MCP .....	46
a/ Le transport de produits alimentaires .....	46
b/ Le stockage de l'énergie thermique.....	46
c/ Applications médicales .....	46
d/Le refroidissement électronique.....	47
2.4. Conclusion.....	50

## **Chapitre 3 : Résultats et interprétations**

Introduction.....	51
3.1. Description Du Dispositif Expérimental .....	52
3.1.1 Description l'enceinte où se trouve le MCP.....	53
3.1.2 Description de l'installation du banc d'essai.....	56
3.1.2.1 Eléments du banc d'essai .....	57
3.1.2.1-a Les deux sources d'alimentation en eau .....	57
3.1.2.1-b Système d'acquisition des données .....	60
3.1.3.1-c Connexion à VDAS .....	61
3.2 Propriétés de la paraffine utilisée dans cette expérience .....	62
3.2.1 Description .....	62

## Table des matières

---

3.2.1 Caractéristiques .....	62
3.3 Evolution de la température du MCP pendant les processus de charge et décharge .....	63
3.4 Influence de la température d'entrée du HTF.....	64
3.5 Influence de la masse du MCP .....	66
3.6 Influence de la masse du sel rajouté au MCP.....	68
3.6.1 Ajout de 10% de sel.....	68
3.6.2 Ajout de 20% de sel.....	68
3.7 Comparaison des résultats sans et avec l'ajout du sel à la paraffine.....	69
3.7.1 Comparaison pour un ajout de 10% de sel.....	69
3.7.2 Comparaison pour un ajout de 20% de sel.....	70
Conclusion générale.....	74
Références .....	76

## Résumé

L'objectif de ce travail est de faire un travail expérimentale a fin de concevoir un nouveau système utilisant les matériaux à changement de phase dites " MCP " comme moyen de stockage de l'énergie thermique.

L'influence de plusieurs paramètres sur le stockage est examiné, en particulier : la température d'entrée d'eau chaude (THF), le débit du fluide caloporteur. Deux nouveaux paramètres ont été encore examinés : c'est l'effet de la masse de la paraffine mise en jeux (120g et 500g) et le dosage de la paraffine avec des sels avec différentes quantités (10% et 20%).

Le dosage à 10%, augmente la conductivité thermique du mélange paraffine-sel se qui conduit à un gain maximal en temps de charge de 37% enregistré pour THF=70°C et un temps de décharge de 43% enregistré pour THF=60°C.

Le dosage à 20% de sel est un dosage excessif où cette quantité de sel ne peut pas être dissoute totalement dans la paraffine est donc une partie a l'état solide reste on excès. Cela rend l'effet de l'ajout du sel à ce dosage (20%) presque inutile.

## Abstract

The objective of this work is to do an experimental work to design a new system using phase change materials called "MCP" as a means of storing thermal energy.

The influence of several parameters on the storage is examined, in particular: the hot water inlet temperature (THF), the flow rate of the heat transfer fluid. Two new parameters were further examined: the effect of the paraffin mass involved (120g and 500g) and the paraffin assay with salts with different amounts (10% and 20%).

The 10% assay increases the thermal conductivity of the paraffin-salt mixture resulting in a 37% maximum charge time gain recorded for THF = 70 ° C and a 43% discharge time recorded for THF = 60 ° C.

The 20% salt dosage is an excessive dosage where this amount of salt can not be totally dissolved in the paraffin is therefore a part in the solid state remains excess. This makes the effect of adding salt to this dosage (20%) almost useless.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو القيام بعمل تجريبي لتصميم نظام جديد باستخدام مواد تغيير الطور تسمى "MCP" كوسيلة لتخزين الطاقة الحرارية. يتم فحص تأثير العديد من المعلمات على التخزين ، على وجه الخصوص: درجة حرارة مدخل الماء الساخن (THF) ، ومعدل تدفق السائل نقل الحرارة. تم فحص معلمتين جديدتين: تأثير كتلة البارافين المعنية (120 غ و 500 غ) ومقايسة البارافين بالأملاح بكميات مختلفة (10 % و 20 %) يزيد اختبار 10% من الموصلية الحرارية لخليط ملح البارافين مما يؤدي إلى زيادة 37% من وقت الشحن الأقصى المسجل في THF = 70 درجة مئوية ووقت تفريغ بنسبة 43% مسجل في THF = 60 ° C. جرعة الملح 20 % هي جرعة زائدة حيث لا يمكن إذابة هذه الكمية من الملح بالكامل في البارافين وبالتالي يبقى جزء في الحالة الصلبة الزائدة. هذا يجعل تأثير إضافة الملح إلى هذه الجرعة (20 %) عديمة الفائدة تقريبا.

# **Introduction Générale**



## Introduction générale

---

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 l'agroalimentaire ou pour le chauffage et la climatisation dans le secteur résidentiel ainsi que de dissipation de chaleur par chaleur latente dans les systèmes passifs de refroidissement de composants électroniques.

La récupération de chaleur rejetée par des procédés industriels, le stockage d'énergie solaire durant le jour et le stockage d'énergie électrique pour délester le problème de pointe en utilisant des systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase représentent des moyens efficaces pour économiser de l'énergie.

Plus récemment un intérêt particulier a été porté à l'étude et développement d'accumulateurs d'énergie par chaleur latente en vue de gérer la demande et la consommation d'électricité.

En effet l'énergie sous forme thermique se caractérise souvent par son inadéquation entre les besoins et les ressources sur le plan temporel d'une part, en puissance et en température d'autre part.

Le stockage de la chaleur est le moyen le plus évident pour atténuer ces inadéquations, mais son application industrielle nécessite des compromis sur des critères souvent antagonistes tels que:

- Densité énergétique (capacité de stockage par unité de volume ou de masse),
- Puissance thermique instantanée stockée et/ou délivrée,
- Simplicité du procédé,
- Efficacité énergétique (absence de pertes),...etc.

Les systèmes de stockage présentent beaucoup d'intérêt pour gérer efficacement la source d'énergie primaire (solaire, électrique, ou autre).

## Introduction générale

---

Il est bien sûr possible de stocker de l'énergie par la simple augmentation de température d'un matériau. L'énergie est alors accumulée sous forme de chaleur sensible. Toutefois, afin de parvenir à stocker une quantité appréciable d'énergie, cette méthode doit faire intervenir des températures élevées. Ceci provient du fait que les chaleurs spécifiques de la plupart des matériaux sont relativement faibles.

Une autre façon de stocker de l'énergie calorifique consiste à utiliser des matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant grâce à leur solidification. Le choix d'un MCP dont la chaleur latente est élevée et dont la température de changement de phase est proche de la température ambiante permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'appareil et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

Cependant, les systèmes de stockage d'énergie par chaleur latente ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transfert thermiques qui se déroulent en leur sein.

Des études théoriques et expérimentales sont actuellement en cours au sein de multiples groupes de recherche afin de mieux comprendre ces phénomènes complexes, et ce dans le but ultime de concevoir un accumulateur de chaleur de ce type qui puisse être utilisé dans le secteur résidentiel.

Plusieurs options d'un tel accumulateur sont en cours d'étude:

- Accumulateur de forme parallélépipédique à une ou plusieurs couches de MCP.
- Accumulateurs cylindriques (cylindres concentriques ou échangeurs de chaleur à tubes et calandre).

L'objectif de ce travail est de faire un travail expérimentale a fin de concevoir un nouveau système utilisant les MCP comme moyen de stockage de l'énergie thermique. L'influence de plusieurs paramètres sur le stockage va être examiné, en particulier : la température d'entrée (THF) et le débit du fluide caloporteur, l'introduction des sels avec différentes quantités et leur mélange avec le MCP pour améliorer la conductivité thermique du MCP.

# **CHAPITRE 1**

## **Etude Bibliographique**

## 1.1 Introduction :

Certaines recherches s'orientent vers les méthodes d'économie d'énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles, l'un de ces moyens d'économie est le stockage. Le stockage d'énergie est une solution d'appoint aux moyens traditionnels de production de pointe. La fonction du stockage d'énergie est essentielle pour apporter de la flexibilité et renforcer la fiabilité des systèmes énergétiques. Les systèmes de stockage d'énergie sont identifiés dans de nombreux pays comme une thématique prioritaire pour la recherche. Donc le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique. Le stockage thermique par changement de phase est efficace pour des différences de températures faibles et si les périodes de charge et de décharge se succèdent à température constante. Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Ce stockage peut être sous deux formes:

- ✚ **Le stockage par la chaleur sensible** (Stockage Thermique Sensible, STS) dans lequel la température des matériaux de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée et le matériau ayant une grande capacité thermique.
- ✚ **Le stockage par la chaleur latente** (Stockage Thermique Latente, STL) qui utilise l'énergie emmagasinée ou restituée lorsqu'un corps change d'état (solide, liquide, gaz). Pour avoir des ordres de grandeur.

Le stockage thermique par chaleur latente dans les liquides ou les solides peut être un moyen très intéressant en utilisant des matériaux à changement de phase. Ces matériaux présentent l'avantage de stocker une grande quantité d'énergie avec un bon rapport masse/volume. Ainsi, et depuis quelques années, l'analyse et la modélisation du phénomène de stockage de l'énergie thermique par la chaleur latente ont fait l'objet d'un certain nombre de travaux.

Dans cette étude bibliographique nous présentons les travaux de la recherche sur le stockage d'énergie par chaleur latente dans plusieurs configurations géométriques enceintes.

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 (*Lane, 1983*) [1]. Ses travaux n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêts et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80. La première application d'un PCM décrite dans la littérature était leur utilisation pour le chauffage et la climatisation dans les bâtiments, par *Telkes (1975)* [2], et *Lane (1983)* [1].

*Telkes & Al (1978)* [3] a émis l'idée d'utiliser des PCM dans des murs, mieux connus sous l'appellation « mur Trombe ».

Les matériaux à changement de phase (PCM) ont été étudiés pour la thermo stockage dans les bâtiments depuis avant 1980 [4]. Ces systèmes fournir une inertie thermique plus élevée au bâtiment qui, combiné avec une isolation thermique peut réduire la consommation d'énergie du bâtiment en absorbant les gains de chaleur et en réduisant le flux de chaleur. Pendant la journée, le PCM peut absorber une partie de la chaleur à travers le processus de fonte, et pendant la nuit la chaleur est libérée par le solidification du PCM, ce qui a pour effet de réduire le flux de chaleur dehors à l'intérieur.

## 1.2. Stockage d'énergie par chaleur latente :

**YOUNSI** [5] a étudié l'intégration des éléments de MCP dans les murs solaires passifs. Le matériau à changement de phase étudié (MCP 27 sels hydratés) a un point de fusion situé à 27°C. Les échantillons fournis par le fabricant sont des élément parallélépipédiques (briquettes) de dimensions 210×140×25mm<sup>3</sup>. Géométrie qui semble bien adaptée à l'intégration dans un mur.

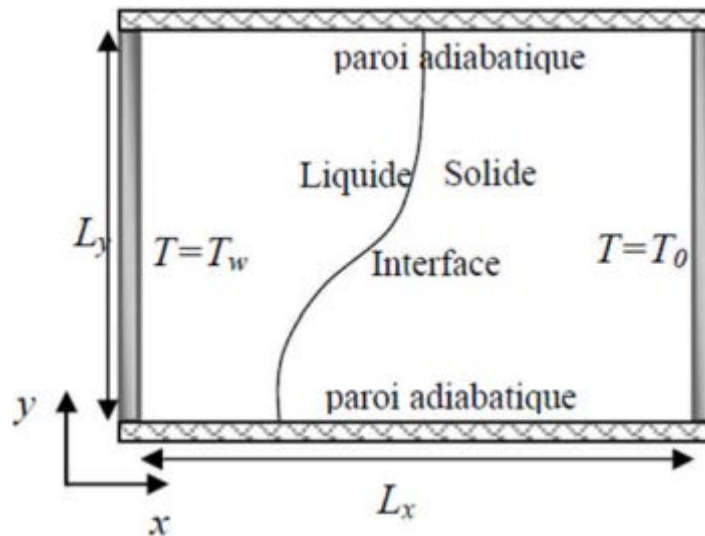


Figure 1.1 : l'intégration des éléments de MCP dans les murs solaires passifs

L'objectif est d'étudier les caractéristiques thermiques du processus de fusion du MCP chauffé sur une paroi verticale d'une enceinte rectangulaire (Fig.1.1). Une formulation enthalpique est utilisée pour analyser le stockage par chaleur latente. La solution est obtenue en employant la méthode des volumes finis afin de comprendre la part de convection naturelle dans la fusion.

**X. Shi et al. [6]** ont effectué une évaluation expérimentale des positions (liées de manière externe, laminées à collés intérieurement) de matériaux à changement de phase encapsulés dans des murs de béton aux températures intérieures et taux d'humidité. Les résultats ont montré que le modèle avec PCM laminé dans les murs de béton présentait les meilleures performances. Contrôle de la température et a été efficace pour réduire la température maximale de 4 ° C. Cependant, le modèle avec Les PCM placés à l'intérieur des murs de béton ont montré le meilleur contrôle de l'humidité et réduit l'humidité relative. By16% de plus que le modèle de contrôle.

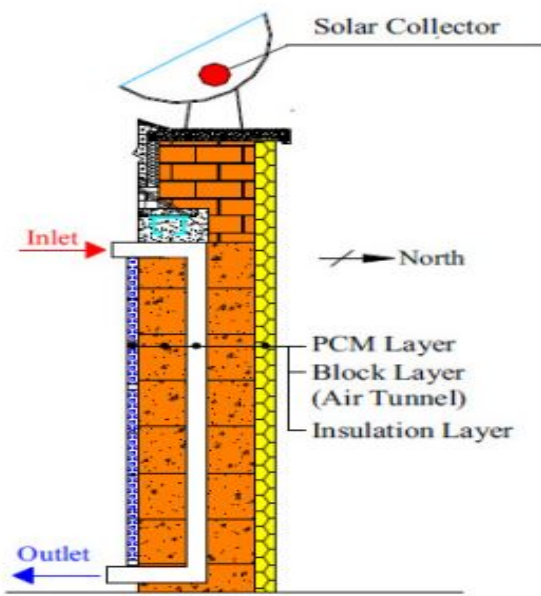


Figure 1.2 : dessin en coupe du système.

Figure 1.3 : Structure réelle du mur en PCM

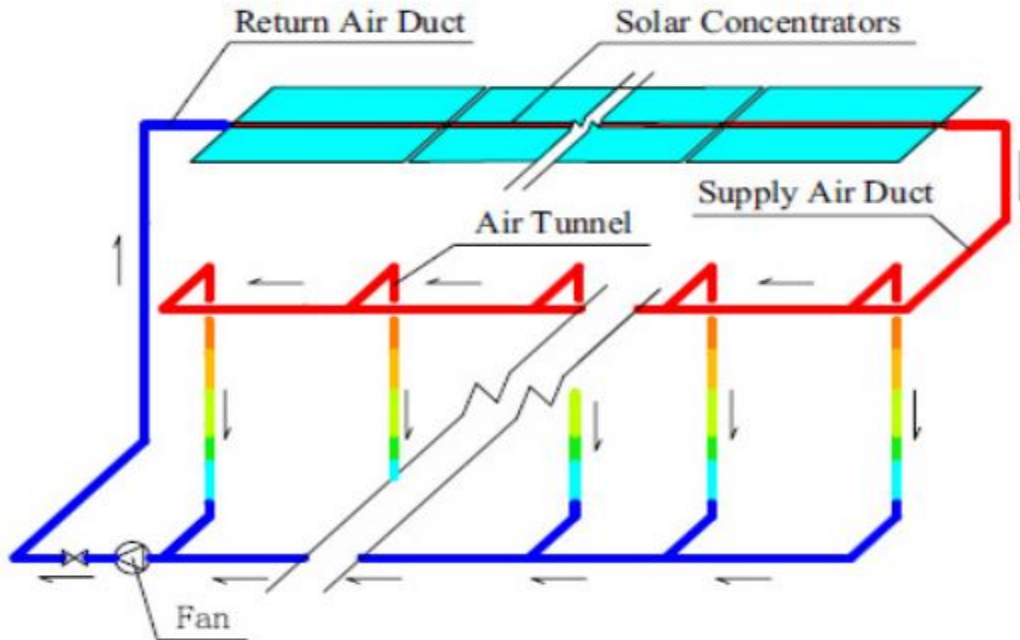


Figure 1.4 : schéma de principe du système d'air chauffé

Selon la recherche sur PCMIBW, de nouvelles découvertes peuvent être obtenues. Tout d'abord, les paramètres de la propriété thermique peut être résumé. La plage de

température de fusion varie entre 19 et 28 ° C pour les MCP organiques et entre 25 et 35 °C.pour les MCP inorganiques, la chaleur de fusion atteint presque 120 à 280 kJ / kg, quel que soit le type de MCP, la conductivité thermique est proche de 0,2 pour les MCP organiques et de 0,6 pour les MCP inorganiques, la plage de densité va de 700 à 900 kg / m<sup>3</sup> pour les PCM organiques et 1300 à 1800 kg / m<sup>3</sup> pour les PCM inorganiques. De plus, l'application les emplacements géographiques sont principalement concentrés sur quatre zones de latitude nord de 25 à 60 degrés et de latitude sud de 35 à 40 degrés, l'utilisation de la paraffine est la plus large et la fréquence d'utilisation maximale va jusqu'à 87,5%. Enfin, il faut noter que l'application technique pratique sur les murs en PCM est rare et les recherches montrent que l'application

des murs en PCM n'est pas indépendante, mais combinée avec d'autres supports ou dispositifs de manière à renforcer la effet d'application.

**M.Purusothaman, Saichand kota , Sam Cornilius. , Siva.[7]** ils ont utilisé des applications pour stocker la chaleur à l'aide d'un MCP dans une voiture. Le matériau à changement de phase a une chaleur de fusion élevée capable de stocker et libérer une grande quantité d'énergie. Ce PCM a été isolé dans le toit de la véhicule pour arrêter la chaleur entrant dans la cabine du véhicule. Analyses expérimentales et numériques ont été menées pour comparer les performances thermiques de la nouvelle structure de toiture et la toiture normale. Grâce à cette expérience, le processus de refroidissement de la cabine pourrait être beaucoup moins rapide. L'enquête expérimentale a révélé que, par une journée chaude, la température intérieure des véhicules la cabine était environ 22°C supérieure à la température ambiante. Les résultats montrent que la nouvelle structure de toiture pourrait effectivement réduire l'entrée de chaleur du toit dans la cabine. Comme En conséquence, la température intérieure de la cabine pourrait être beaucoup plus basse.

Le matériau à changement de phase étudié (PCM-dodecanol) à une température de fusion entre 24°C et 27°C. Les échantillons fournis par le fabricant sont :

-Le toit avec PCM est également composé du même matériau que le toit en acier TATA SIERRA. Le toit contient le matériau isolé. Le matériau utilisé est un PCM qui a la capacité spéciale d'arrêter la chaleur en elle-même. Le processus réduit ainsi la

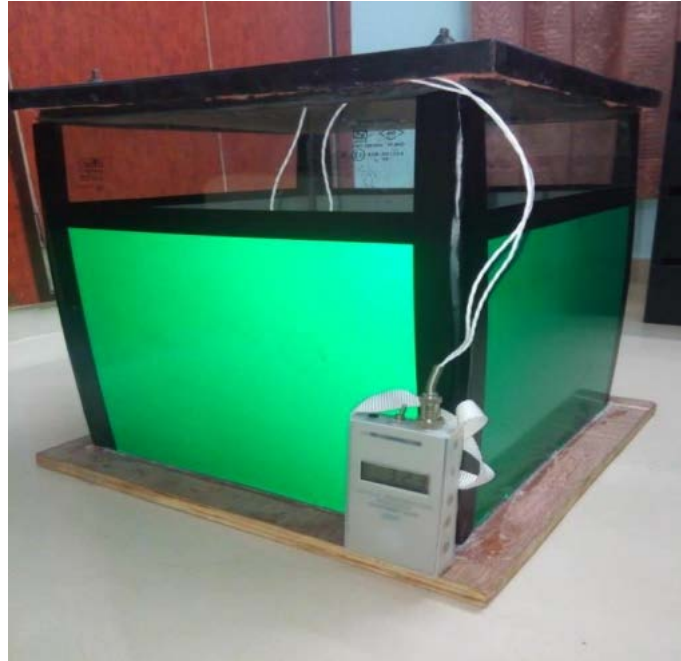


quantité de chaleur entrant dans la cabine du véhicule. Comme la chaleur entrant dans la cabine diminue, la température à l'intérieur de la cabine est basse par rapport au toit sans l'isolation. La figure 2 ci-dessous montre la toiture construite et isolée, contient le PCM entre les deux couches du métal du toit et de l'isolant.



*Figure 1.5 : Toit avec PCM*

La configuration de test est construite avec les matériaux mentionnés ci-dessus. Les verres feuilletés ont été joints avec l'aide d'un mastic liquide de telle sorte que la chaleur de la cabine n'échappe pas à l'installation. Les toits ont été découpés dans le toit d'une voiture et une autre couche de tôle est découpée et placée entre le toit et l'isolation pour placer le PCM en position. Un autre toit du même matériau a été fabriqué sans le PCM isolant pour que la différence soit visible en température. La construction a été achevée comme la configuration conçue comme indiqué à la figure 1.6..



*Figure 1.6 : Configuration fabriquée de PCM*

La cabine du véhicule est représentée par un dispositif d'essai constitué des mêmes matériaux présents dans un véhicule. Les graphiques des résultats obtenus par l'expérience sont représentés à la figure 1.7 et à la figure 1.8. Le graphique ci-dessous montre les différentes variations de la température présente dans la cabine de la voiture avec et sans le toit PCM. Les variations ont été notées pour une journée complète. Les variations montrent une augmentation progressive et diminution progressive de la température de l'habitacle du véhicule. La température était noté le maximum aux heures de pointe. La même chose a été notée pour la cabine avec le toit en PCM, la température était maximale aux heures de pointe. Mais, le toit isolé PCM avait une différence d'environ 13°C entre les deux configurations de cabines différentes aux heures les plus chaudes de la journée.

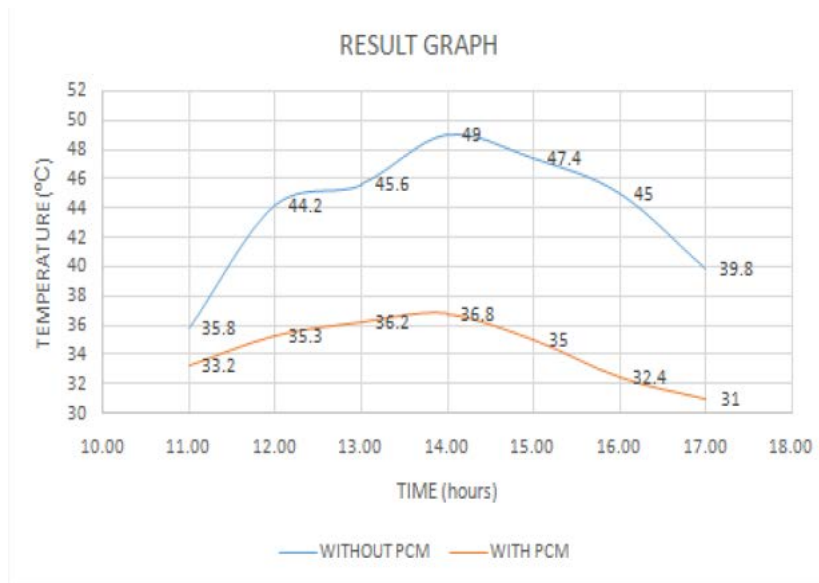


Figure 1.7 : Variation de la température avec le temps

L'autre graphique montre la température maximale de l'habitacle du véhicule, la température a été mesurée tous les jours à 13h afin de connaître la plage de température maximale de la configuration de test en cabine allant de aux températures maximales. La température des cabines a été notée très élevée avec la toiture normale structure que la température de la cabine avec la structure de toit isolé le toit isolé avait arrêté la majeure partie de la chaleur d'entrer dans la cabine.

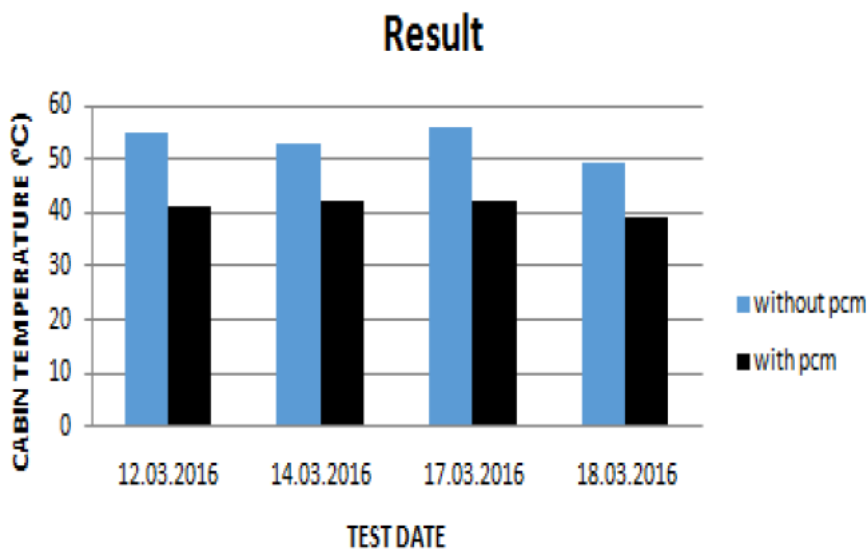


Figure 1.8 : Variation de température pour différentes dates aux heures de pointe

Ce projet montre une nouvelle conception de la structure du toit du véhicule, qui a été réalisée en ajoutant une couche de PCM dans le toit du véhicule. Le résultat montre une diminution décente de la température du véhicule cabine lorsqu'un toit isolé PCM est fixé au toit du véhicule. L'expérience a complètement rempli le diminution de la température de la cabine du véhicule lorsqu'un véhicule est garé dans un endroit en droit ensoleillé ou une zone non ombragée. Les résultats obtenus sont favorables à l'expérience. Lorsque la température mesurée à la fois cabine isolée et non isolée, la cabine intérieure avait une température interne très inférieure à celle de la cabine non isolée. Les résultats ont été calculés pour trois types de lectures, une lecture a été pris à une température maximale entre 12h30 et 14h00 de quatre jours différents, une autre lecture a été prise toute la journée de 10h à 17h avec le toit non isolé, une autre lecture a été prise la prochaine jour avec toit isolé pour la même période et les lectures ont été notées. Résultats expérimentaux ont montré que la nouvelle conception offre de meilleures performances thermiques que la structure de toit normale du véhicule disponible. La nouvelle conception peut aider à réduire d'environ 30% de la quantité d'énergie requise pour refroidir la chaleur qui pénètre dans la cabine par le toit. Le taux d'épargne pourrait même être beaucoup plus élevé en cas de vent naturel et de mouvement de la voiture utilisée. Ainsi, la cabine de test de toit isolé PCM la température de la cabine la plus basse par rapport à la cabine normale, le PCM avait résolu le problème empêcher la chaleur extérieure de pénétrer dans le véhicule, ce qui augmente le nombre de personnes dans la cabine et si tous les véhicules sont isolés avec le PCM, la température de la cabine serait très basse. Moins et cela diminuerait la détérioration des pièces en plastique du véhicule. C'est un design prometteur qui pourrait être produit en masse en raison de sa structure simple et son prix raisonnable.

**Suat Canbazog̃lu [8]** a présenté les variations temporelles des températures d'eau au milieu d'un réservoir de stockage de la chaleur avec un système eau-chauffant de solaire passif combiné avec matière du changement de phase hydrate du sodium MCP pour amélioration de performance du stockage de l'énergie thermique solaire du système par comparer avec ceux de système conventionnel qui n'inclut aucun MCP a

été observé, le stockage du même système l'eau-chauffage solaire combinées avec plusieurs types de MCP.

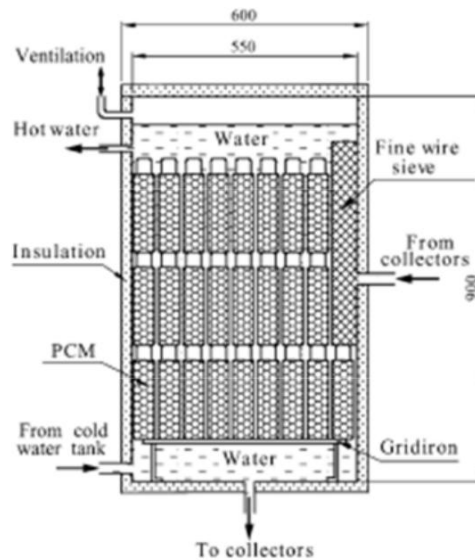


Figure 1.9 : Détaillé vue croix d'un groupe du réservoir de la chaleur cylindrique s'associé avec MCP.

**Ismail et al [9]** présentent les résultats d'une étude expérimentale et numérique sur des plaques parallèles constituées de matériau à changement de phase (la glace). L'objectif est d'identifier l'importance relative des paramètres géométriques et opérationnels et leur influence sur la performance de l'ensemble des plaques. Le modèle mathématique est basé sur une formulation monodimensionnelle de problème de changement de phase, et sa solution numérique a été réalisée en utilisant la méthode des différences finies. Les prédictions du modèle ont été comparées avec l'expérience. L'énergie stockée, la position de l'interface et le temps de solidification complète sont présentés en fonction de la température initiale du MCP, et de l'espace entre les plaques. L'efficacité de l'unité expérimentale est également présentée et discutée.

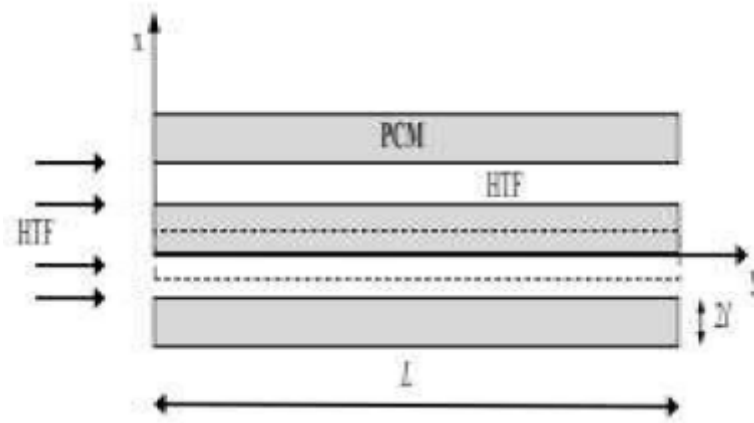


Figure 1.10: Schéma d'un échangeur de résultats expérimentaux

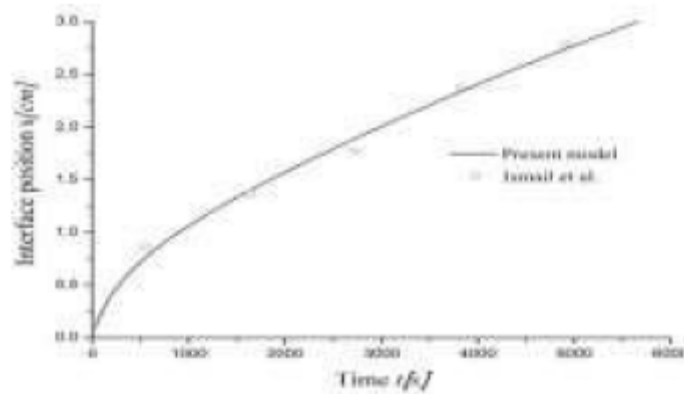


Figure 1.11: Comparaison du modèle actuel et la chaleur latente.

**Hed et Bellander [10]** ont inséré un matériau à changement de phase, MCP, dans un échangeur de chaleur à plaques parallèles qui utilise l'air comme fluide caloporteur. Au cours de la nuit le PCM se solidifie, et l'énergie est libérée. Pendant la journée, l'air est mis en circulation dans l'échangeur, l'énergie est absorbée et l'air ambiant est refroidi.

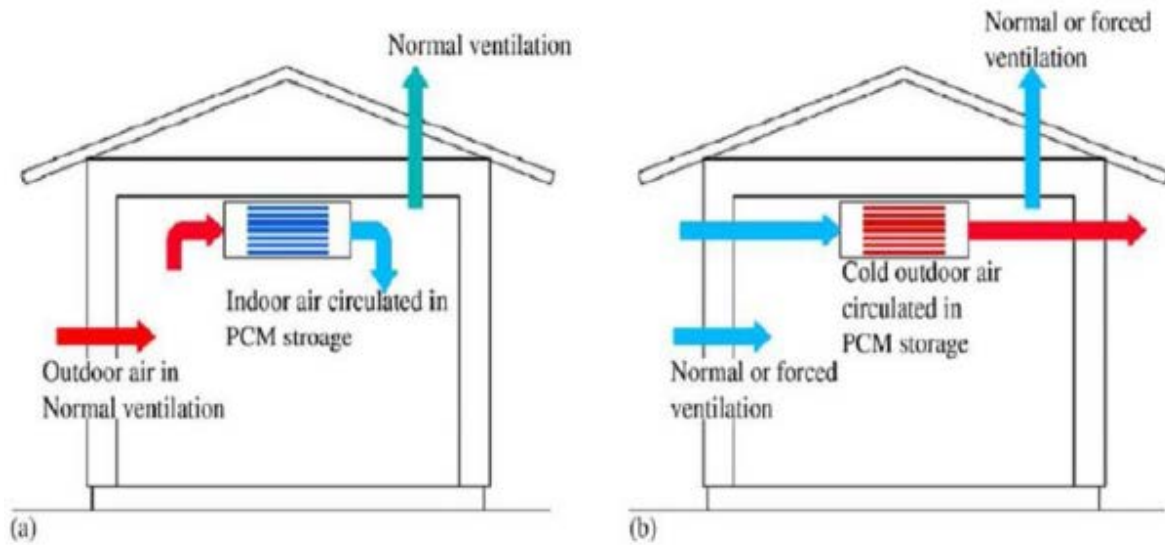


Figure 1.12: Fonction principale du système de refroidissement air-MCP: (a) pendant le jour, le MCP est en train de fondre et (b) pendant la nuit, le MCP se solidifier.

Zhang et Faghri [11] ont exposé une méthode d'analyse conjuguée pour étudier les phénomènes de transfert de chaleur et de masse entre un MCP placé entre deux tubes coaxiaux ; le fluide caloporteur (HTF) traverse le tube intérieur. Ils ont également signalé une erreur importante si une corrélation est utilisée pour calculer le nombre de Nusselt en régime pleinement développé dans le cas d'un nombre de Prandtl modéré.

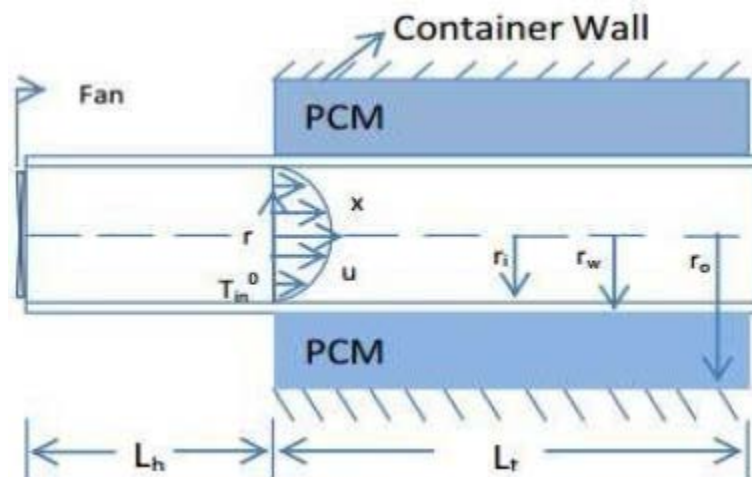


Figure 1.13: Représentation schématique du système stockage d'énergie thermique.

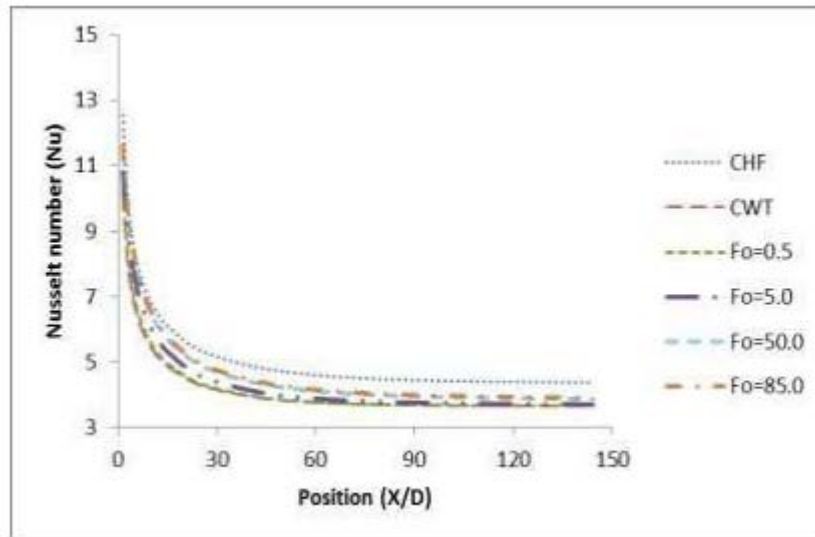


Figure 1.14: Nombre de Nusselt local pour différentes positions et différents nombres de Fourier.

**T. Anica& al [12]** ont présenté une analyse numérique du phénomène de transfert thermique pendant le processus de charge et de décharge d'un système de stockage thermique par chaleur latente LTES constitué de deux tubes concentriques. Le système est composé d'un récipient contenant des tubes dans lesquels l'écoulement du fluide caloporteur HTF circule. Le PCM (paraffine) remplit l'espace entre le récipient et les tubes. Une série de calculs numériques a été faite afin d'analyser l'influence de plusieurs conditions de fonctionnement de HTF et des paramètres géométriques sur le procédé de transfert thermique à l'intérieur de l'unité entre le HTF et PCM.

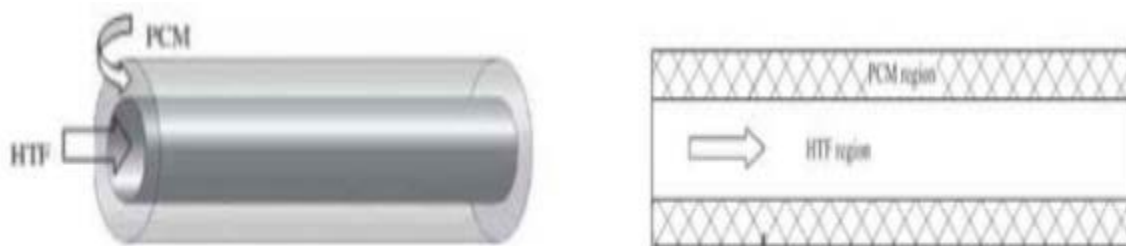


Figure 1.15: Schémas du système de stockage et du modèle physique étudié.



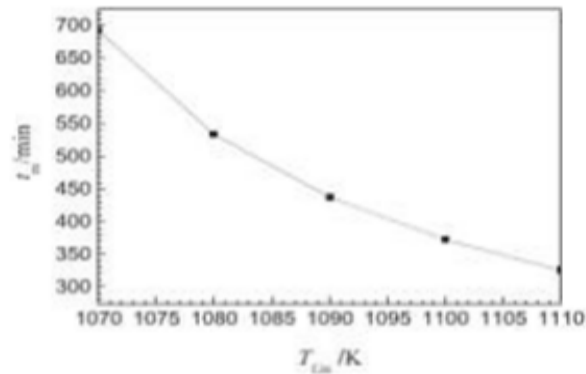


Figure 1.16: Effet de température d'entrée du HTF sur le temps de fusion du MCP.

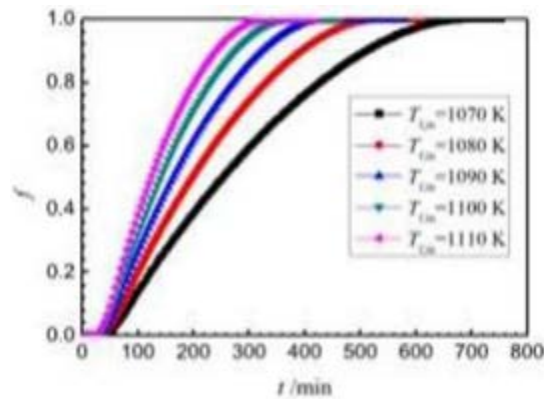


Figure 1.17: Effet de température d'entrée du HTF sur la fraction de liquide du MCP.

**Ait Adine et El Qarnia [13]** ont étudié numériquement une unité de stockage de chaleur latente (LHSU) constitué par deux tubes coaxiaux. L'espace entre les tubes est rempli de deux matériaux à changement de phase (PCM) différents, la paraffine P116 et le noctadécane, avec des températures de fusion différentes ( $50^{\circ}C$  et  $27,7^{\circ}C$ , respectivement).

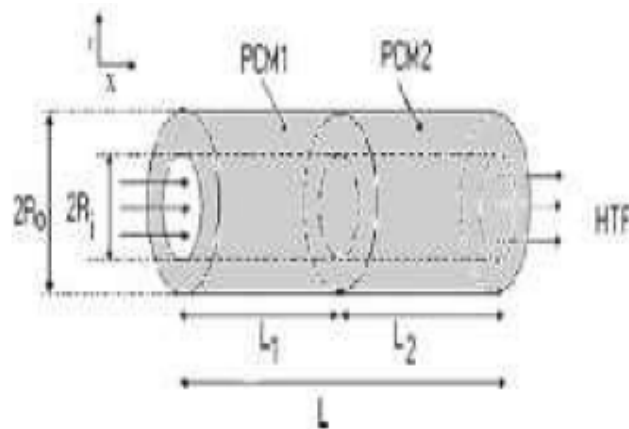


Figure 1.18: module de stockage de chaleur latent avec deux PCMs(LHSU2).

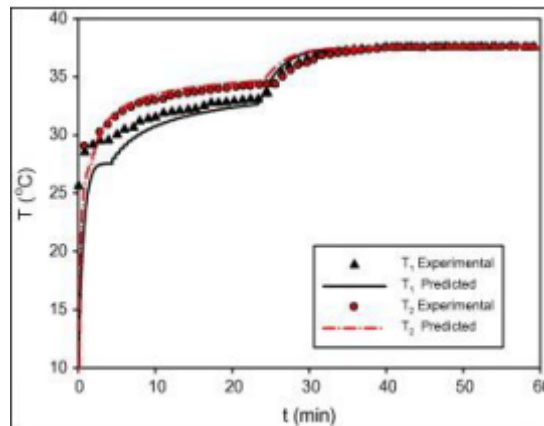


Figure 1.19: Variation de la température en fonction de temps ; comparaison entre les mesures et les calculs.

**Choi [14]** a étudié expérimentalement l'effet de la température d'entrée et le nombre de Reynolds d'un fluide frigopporteur sur la durée de charge des capsules sphériques remplies d'un MCP. L'auteur a montré que plus la température du fluide à l'entrée est basse plus la durée de charge est courte. Le nombre de Reynolds s'est avéré inversement proportionnelle à la durée de solidification complète. Le temps adimensionnel nécessaire pour atteindre la capacité thermique de stockage a diminué au cours du processus de congélation. Pour un nombre Reynolds égala8, il a fallu plus de 30% pour atteindre la capacité thermique de stockage adimensionnel que pour un nombre Reynolds égala 16 pendant les processus de changement de phase.

**Kouskso et al. [15]** ont présenté un système constitué d'un collecteur solaire chauffant l'air associé avec un réservoir cylindrique contenant des capsules sphériques rempli d'un MCP. le modèle numérique utilisé dans cette étude a montré que l'efficacité thermique du système peut être considérablement amélioré pour une sélection adéquate de la température de fusion du MCP, et peut réduire aussi l'irréversibilité à l'intérieur du système en utilisant un MCP multiple. Le processus de la sélection des MCP doit être basé sur les conditions opératoires.

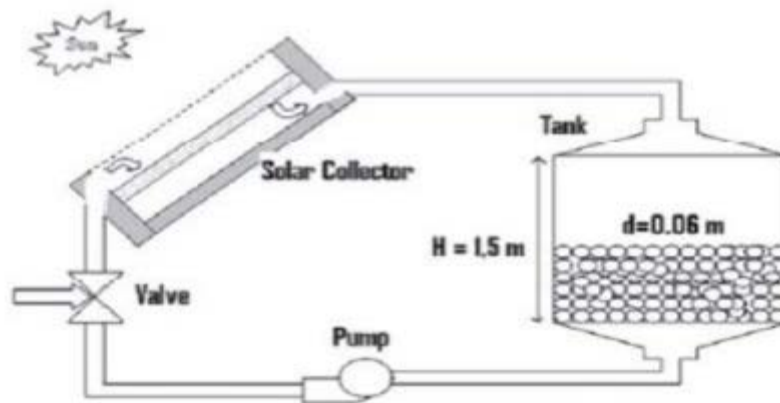


Figure 1.20: Système de stockage de l'énergie solaire utilisant un MCP.

**Abdeljalil Benmansour [16]** à présente une étude numérique du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C), dans un lit fixe multicouche composé de trois sections de hauteur égale. Chaque section contient un matériau de changement de phase MPC avec des températures de fusion différente rempli dans des sphères disposées de manière quelconque et traversé par un fluide. Ce modèle a montré que l'utilisation de trois MCP au lieu d'un seul se traduit par un gain énergétique sensible en particulier pour les faibles débits, et peut être appliqué à un lit multicouche composé d'un nombre de section quelconque.

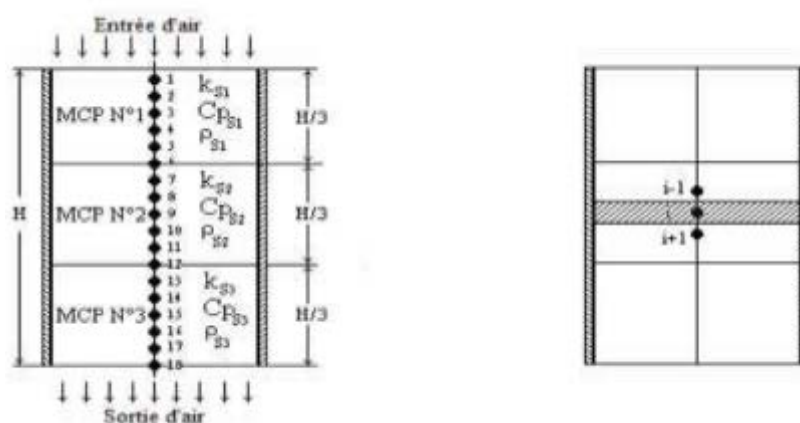


Figure 1.21: Lit de stockage multicouche et modèle physique.

Dans leur étude expérimentale **li et al** [17] ont essayé d'améliorer la conductivité thermique d'un matériaux à changement de phase inferieur à l'intérieur d'une sphère pendant la solidification. Dans ce processus quelques conclusions sont obtenues: Quand le MCP fond à l'intérieur d'une sphère, la fusion est plus rapide dans la partie supérieure que dans la partie inférieure, et la transfert de chaleur est dominée par la convection naturelle.

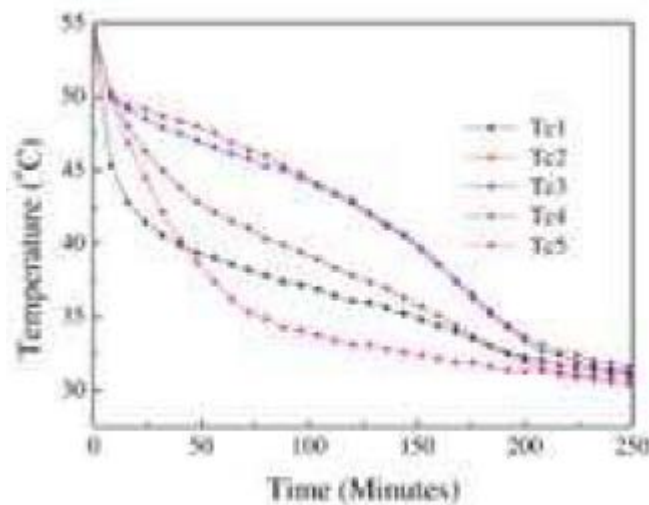


Figure 1.22:Températures en fonction de temps pour différents simples points de mesure.

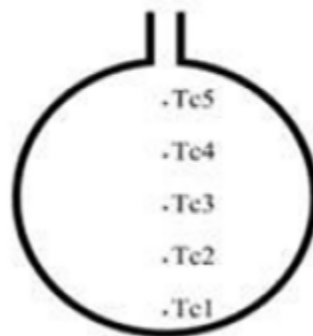


Figure 1.23:Emplacements de thermocouples l'intérieur de la sphère.

**Ramos et al** [18] ont présenté une étude expérimental analysante stockage thermique à l'intérieur d'une capsule sphérique. Le modèle mathématique était résolu en utilisant la méthode des volumes finis, pour résoudre des équations d'énergie dans les deux régions liquides et solides du MCP, la formulation d'enthalpie-porosité à été employée.

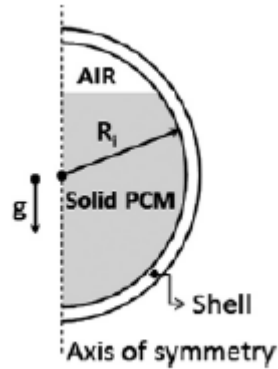


Figure 1.24: Représentation schématique du domaine physique.

Solomon et al [19] ont aussi réalisé un travail concernant l'effet de l'air interne sur les performances du transfert de chaleur et sur le stockage d'énergie par changement de phase dans une capsule sphérique. le cas d'un vide initiaient localisé au centre de la capsule a le plus haut taux de transfert de la chaleur et donc le plus court temps de fusion, une capsule avec un vide localisé au sommet a le plus long temps de fusion.

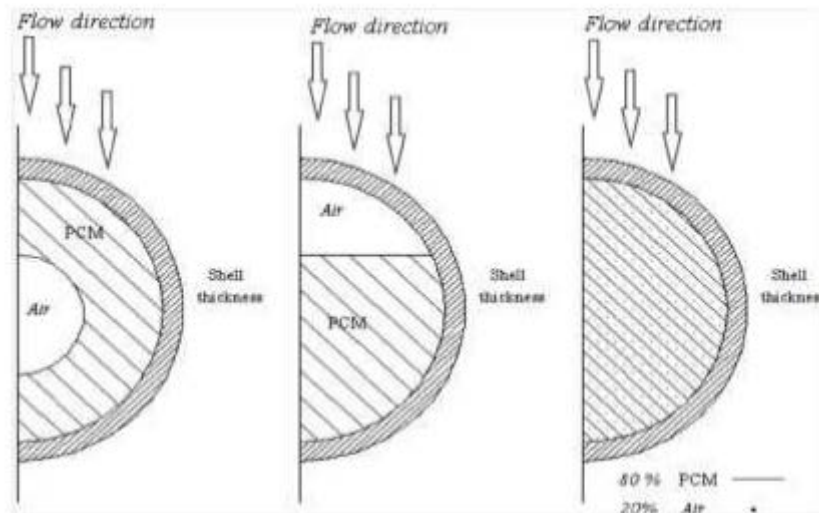



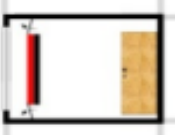


Figure 1.25 : Modèle de calcul de la capsule avec du vide.

De nombreux auteurs [20, 21] ont simulé et testé un mur Trombe utilisant du  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  comme matériau de stockage de la chaleur. **Bourdeau** [22] a étudié le comportement d'un mur Trombe en polyéthylène placés derrière un double vitrage. Une série de tests ont été réalisés à Los Alamos National Laboratory, pour valider le modèle numérique démontrant qu'un mur Trombe muni d'un accumulateur de chaleur latente

est plus efficace qu'un mur en béton classique [23, 24]. Cette étude a montré que l'épaisseur optimale d'une paroi en MCP est quatre fois plus mince qu'une paroi en béton.

**Knowles** [25] a utilisé les paraffines mélangés aux copeaux en métal pour augmenter la conductivité et l'efficacité du mur. L'étude réalisée par **Ahmad** [26] sur l'intégration du MCP à l'enveloppe du bâtiment le considère comme accumulateur thermique. L'étude effectuée par **Voelker et al.** [27] a permis d'examiner l'effet d'un système de chauffage au sol radiant auquel est intégré un MCP. Le matériau a permis d'économiser environ 25 % d'eau utilisée pour le refroidissement, tandis que la température à la surface du plancher en MCP était de 4°C inférieure à celle d'un plancher radiant standard.

Tableau 1.1: Systèmes passifs verticaux de stockage de chaleur latente

schéma	Types de parois
	<b>Mur en béton imprégné de MCP</b> Le béton constituant l'enveloppe du bâtiment contient un MCP micro-encapsulé pour augmenter sa capacité thermique. Cette solution est délicate car la MCP peut altérer les propriétés mécaniques du béton.
	<b>Mur Trombe en MCP</b> en partant de l'extérieur, la paroi est constituée de: un isolant transparent, une lame d'air, un MCP et une couche d'isolant. Pendant la journée, le rayonnement solaire chauffe le MCP. Pendant la nuit, les orifices se trouvant en haut et en bas de la paroi sont ouverts. Le MCP crée alors un écoulement convectif qui alimente en air chaud la pièce.
	<b>Volets en MCP</b> Le MCP stocke de la chaleur pendant la journée alors que les volets sont ouverts. Une partie de cette chaleur est rayonnée pendant la nuit dans la pièce, au travers des fenêtres.
	<b>Parois légères en MCP</b> Les parois intérieures verticales de la pièce sont multi-couches. L'une de ces couches, disposée proche de l'ambiance intérieure, contient un MCP.

### 1.3. Stockage d'énergie par chaleur sensible :

**Kakaç et Li [28]** ont analysé de point de vue théorique et expérimental un écoulement fluide en convection forcée turbulente entre deux plaques parallèles. Le fluide est soumis l'entrée du canal à des variations sinusoïdales de température. Le bilan d'interface inclut les caractéristiques thermiques de la paroi, considérée isotherme. Les mesures expérimentales mettent en évidence l'existence dans la section d'entrée d'un gradient de température transversal important. Ce profil d'amplitude de forme parabolique ( $\Delta\theta(\eta) = 1.035 + 0.098 \eta - 1.04 \eta^2$ ) est, d'après l'auteur, la source des écarts importants enregistrés entre le modèle analytique et les mesures expérimentales. En injectant dans le modèle analytique ce profil de température dans la section d'entrée, ces écarts se réduisent énormément.

En 2009, **Hadiouche et Mansouri [29]** présentent une étude théorique de la convection forcée laminaire à l'intérieur d'un conduit cylindrique et plan, soumis à une température d'entrée périodique. La diffusion thermique dans la paroi du conduit et les conditions aux limites qui définissent la convection extérieure, sont pris en considération. Dans la première partie, ce problème est résolu en appliquant la Technique de Transformée Intégrale Généralisée (GITT). Les valeurs et les vecteurs propres complexes sont écrits et comparés avec la littérature. Dans la deuxième partie, l'approche Quasi-stationnaire (QSA) qui utilise un coefficient de transfert thermique constant à interface fluide-paroi est aussi utilisée et comparée avec la solution GITT. La température moyenne, le nombre de Nusselt, le coefficient d'amortissement et de déphasage sont calculés.

Brièvement, on peut citer les travaux de **Brown et al. [30]**, **Kakaç et Yener [31]**, **Cotta et Özisik [32-33]**, **Kim et Özisik [34]**, **Kakaç et al. [35]**, **Guèdes et Cotta [36]**, **Guedes et Özisik [37]**, **Travelho et Santos [38]**, **Mansouri et Fourcher [39-40]**, **Cheroto et al. [41]**, **Mansouri et al. [42-43]**, **ArikL et al. [44]** et **Cossali [45]**, qui ont étudié explicitement la convection forcée laminaire ou turbulent en régime périodique dans les conduite cylindriques et planes.



La réponse transitoire d'une unité de stockage par chaleur sensible qui reçoit/fournit de la chaleur à un fluide caloporteur en écoulement est présenté par Schmidt et al. [46-47]. Dans la référence [48], l'unité de stockage est composée de certain nombre de canaux de section rectangulaire, traversés par le fluide en écoulement, montés en parallèle et séparés par le matériau de stockage. L'équation de l'énergie pour le fluide et l'équation de la conduction transitoire pour le matériau de stockage, sont résolus en utilisant la méthode des différences finies. Les paramètres qui caractérisent le comportement transitoire de cette unité sont identifiés. Des résultats convenables concernent la prédiction du taux de stockage et la température du fluide à la sortie de l'unité de stockage sont présentés en fonction des paramètres adimensionnels. Dans l'article [49], l'auteur a cherché l'optimisation de la conception d'une unité de stockage de chaleur sensible initialement à une température uniforme. L'unité de stockage est composée de certain nombre de canaux de section transversale rectangulaire traversés par le fluide caloporteur, connectés en parallèle et séparés par le matériau de stockage. L'optimisation de la conception est basée sur exploitation maximale de l'unité de stockage pour un ensemble donné de conditions de fonctionnement. Ce résultat est obtenu en faisant varier la géométrie de l'unité de stockage, tout en imposant des contraintes sur la valeur maximale et minimale de la longueur de l'unité, la longueur du canal traversé par le fluide, l'épaisseur du matériau de stockage, la température maximale et minimale de fluide à la sortie, et la quantité minimale de la chaleur qui peut être stockée.

Dans l'expérience [50], la réponse transitoire d'un échangeur de chaleur, fonctionne avec deux fluides caloporteurs et conçu pour le stockage de la chaleur sensible à base solides, est étudiée. L'unité de stockage est composée d'une série de canaux rectangulaires destinés pour l'écoulement de fluides caloporteurs, séparés par des plaques de matériau de stockage. Les fluides chaud et froid circulent en mode à contre courant, dans des canaux alternés de sorte que chaque plaque de matériau de stockage est en contact avec les deux fluides. L'ensemble du système est considéré comme étant initialement à l'équilibre à une température uniforme, une variation de la



température d'entrée de l'un des fluides est imposée, et la réponse thermique de l'unité est prédite jusqu'à ce que l'état d'équilibre soit atteint.

**Bardon, et al. [51]** ont étudié la cinétique des transferts thermiques entre un fluide caloporteur et un matériau de stockage. en tenant compte de la conduction dans le matériau et de la durée limitée du cycle. les résultats obtenus pour des éléments géométriques simples (plaque, cylindre, sphère) dans l'hypothèse d'un fonctionnement sinusoïdal sont présentés, en soulignant le rôle essentiel que jouent les groupes adimensionnels dont dépend l'énergie stockée, pour le choix optimal des caractéristiques de ces éléments. En suite les résultats sont examinés pour une plaque de grande étendue ainsi que pour une loi périodique non sinusoïdale.

### **1.4. Amélioration des performances du stockage d'énergie :**

**Khodadadi et Hosseinizadeh [52]** étaient les premiers à faire un rapport sur la fonctionnalité améliorée de nanostructure - des matériels de changement de phase améliorés (NeMCP) par la dispersion de nanoparticules. Ils ont simulé la solidification d'un nano fluide (l'eau avec des particules de cuivre de nano-taille) dans un modèle de stockage carré. Il a été trouvé que la chaleur latente de MCP baisserait et le temps de décharge a diminué quand la fraction massive de particules dispersées a été augmentée. La comparaison avec la recherche a consacré au NeMCP dans des conteneurs rectangulaires qui souligne la fonte améliorée de nanoparticule/les caractéristiques de solidification, quelques nombre d'articles sont associées aux capsules sphériques, cylindriques et annulaires. La figure suivante montre l'évolution des phases solide et liquide pendant la solidification.

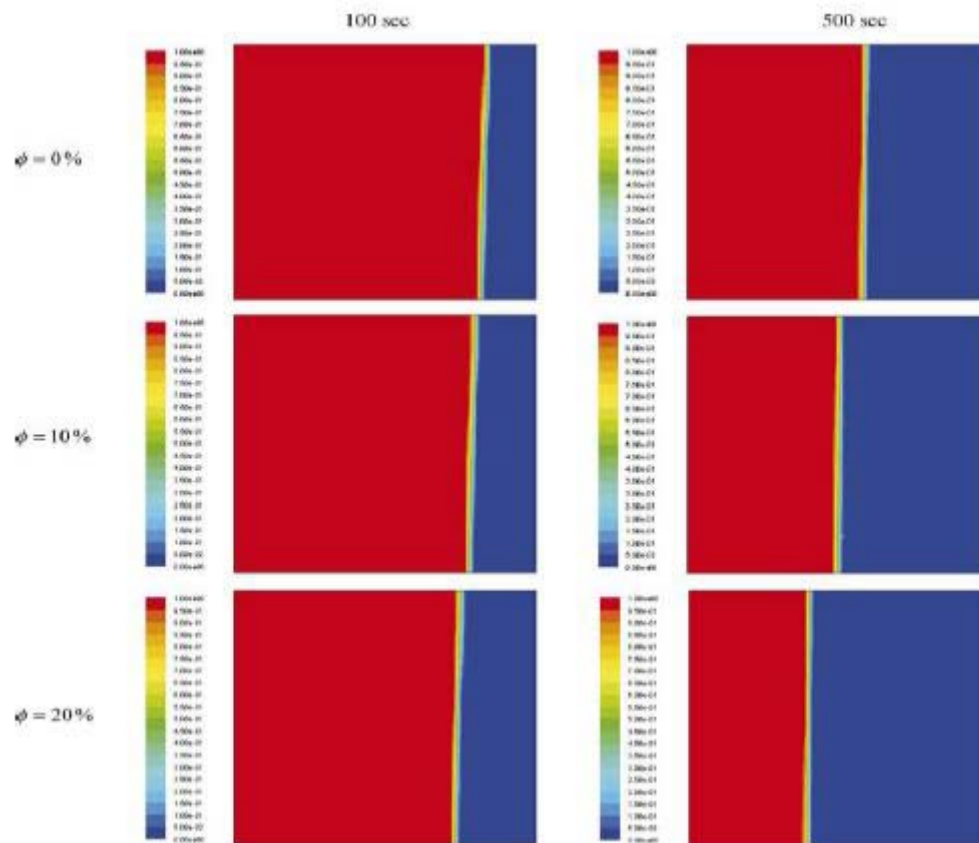


Figure 1.26 : Evolution des phases solide et liquide pendant la solidification.

Arasu et al. [53] ont étudiée numériquement la fusion du mélange paraffine/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans une enceinte carrée (25 mm x 25 mm) chauffée sur un seul côté. La fonction courant, les isothermes et l'interface liquide-solide à différentes étapes du processus de fusion sont présents et discutés. L'effet de l'orientation de la surface chauffée et la concentration de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans la paraffine sur le rendement du système de stockage de chaleur latente sont analysés. La figure suivante montre la variation transitoire de la fraction liquide pour différente concentration.

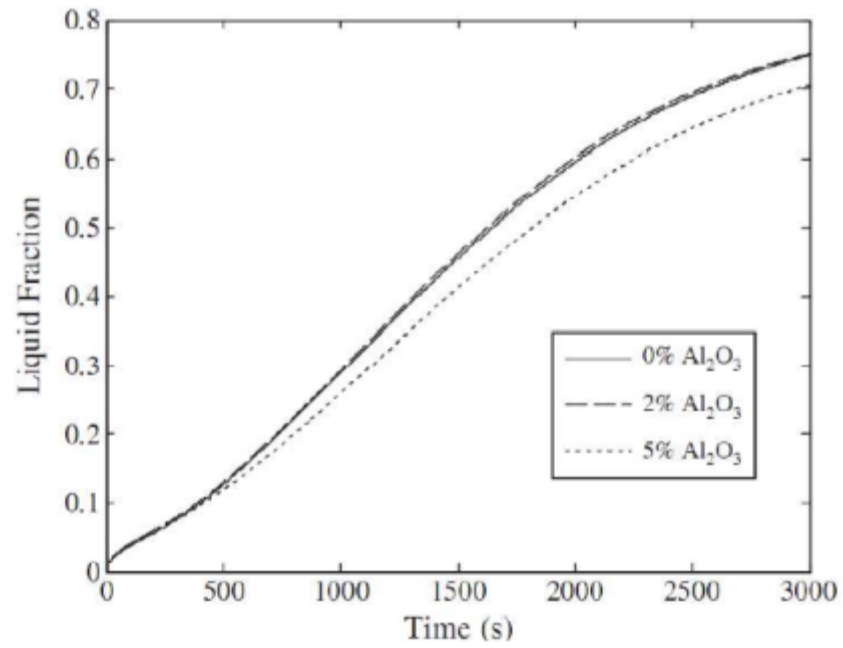


Figure 1.27 : Variation transitoire de la fraction liquide pour différente concentration.

## 1.5. Conclusion

L'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a suscité un regain d'intérêt ces dernières années. Cela est dû au fait que les MCP ont de fortes densités de stockage (quantité d'énergie stockée par unité de masse). En outre, ces matériaux peuvent être appliqués dans plusieurs domaines. Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée en fonction du changement d'état du matériau de stockage (fusion ou solidification). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la masse du matériau à changement de phase. La performance des systèmes de stockage par chaleur latente est limitée par la faible conductivité thermique des MCPs utilisés. Dans la plupart des travaux, le MCP occupe tout le domaine et est considéré homogène. Les matériaux à changement de phase (MCP) présentent un inconvénient majeur, à savoir leur faible conductivité thermique. L'ensemble de ces travaux montre une claire préférence pour les approches numériques et expérimentales par rapport aux approches analytiques. Les études traitant le stockage par chaleur latente sont plus nombreuses par rapport à celles qui traitent le stockage par chaleur sensible, avec l'amélioration des performances du stockage d'énergie. Par ailleurs nous pouvons dire que l'utilisation des matériaux à changement de phase pour le stockage de l'énergie thermique présente un grand intérêt au regard du contexte énergétique actuel.

# **CHAPITRE 2**

## **Généralités sur les Matériaux à Changement de Phase (MCP)**

**2.1. Introduction :**

Le Stockage de l'énergie thermique (TES: Thermal Energie Storage) en général, et les matériaux à changement de phase en particulier, ont été un sujet principal dans la recherche au cours des 20 dernières années, mais bien que l'information est quantitativement énorme, il est également largement répandu dans la littérature, et difficile à trouver. L'intérêt international pour l'énergie de stockage thermique car il traite de l'économie d'énergie, l'utilisation efficace et rationnelle des ressources disponibles et l'utilisation optimale des énergies renouvelables. Dans ce cadre, le TES fournit des solutions dans des domaines très spécifiques: Le temps de retard et la puissance disponible entre la production ou la disponibilité de l'énergie et sa consommation dans les systèmes de réception (de l'énergie solaire, cogénération, etc.) Sécurité de l'approvisionnement énergétique (hôpitaux, centres informatiques, etc.) L'inertie thermique et une protection thermique. [54]

**2.2. Stockage de l'énergie thermique :**

L'énergie thermique peut être stockée sous la forme d'un changement de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermochimique ou d'une combinaison de ceux-ci. Un aperçu de la technique majeur du stockage de l'énergie solaire thermique est représenté sur la figure (2.1). [55]

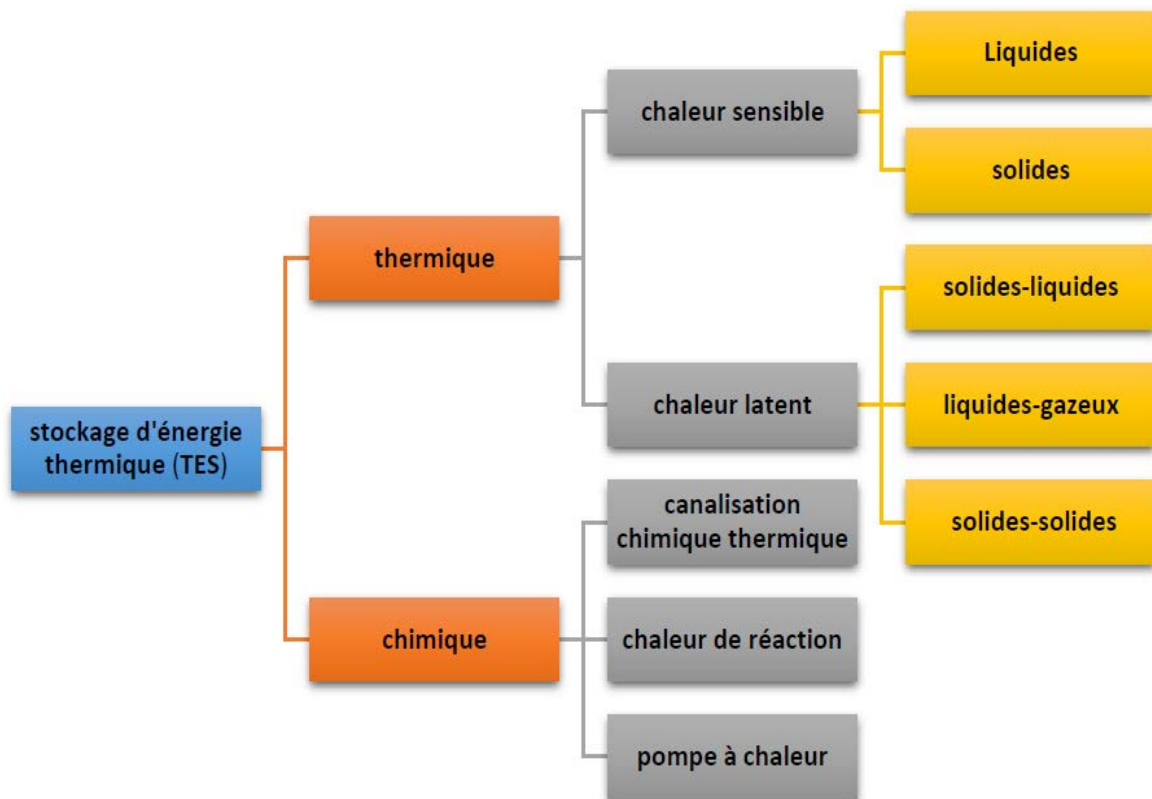


Figure 2.1 : Différents types de stockage thermique de l'énergie thermique [56]

### 2.2.1. Stockage par chaleur sensible :

Dans une unité de stockage de chaleur sensible, de l'énergie thermique est stocké par modification de la température du support de stockage, qui peut être un liquide ou un solide. La quantité d'énergie stockée dans l'unité dépend de la capacité calorifique du fluide, des changements de température et de la quantité du matériau de stockage. Ainsi, il est souhaitable que le support de stockage ait une grande capacité thermique spécifique, stabilité à long terme sous le cycle thermique, la compatibilité avec son enceinte de confinement et, surtout, à faible coût. Le stockage de chaleur sensible peut être classé sur la base du support de stockage de chaleur que le stockage de milieux liquides tels que l'eau, les fluides à base d'huile, sel fondu, etc., ou solide et le stockage des supports comme des pierres, des métaux et d'autres.[57]

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT = m C_{ap} (T_f - T_i) \quad (2-1)$$

Où :

$T_i$  est la température initiale [K],

$T_f$  est la température finale [K].

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

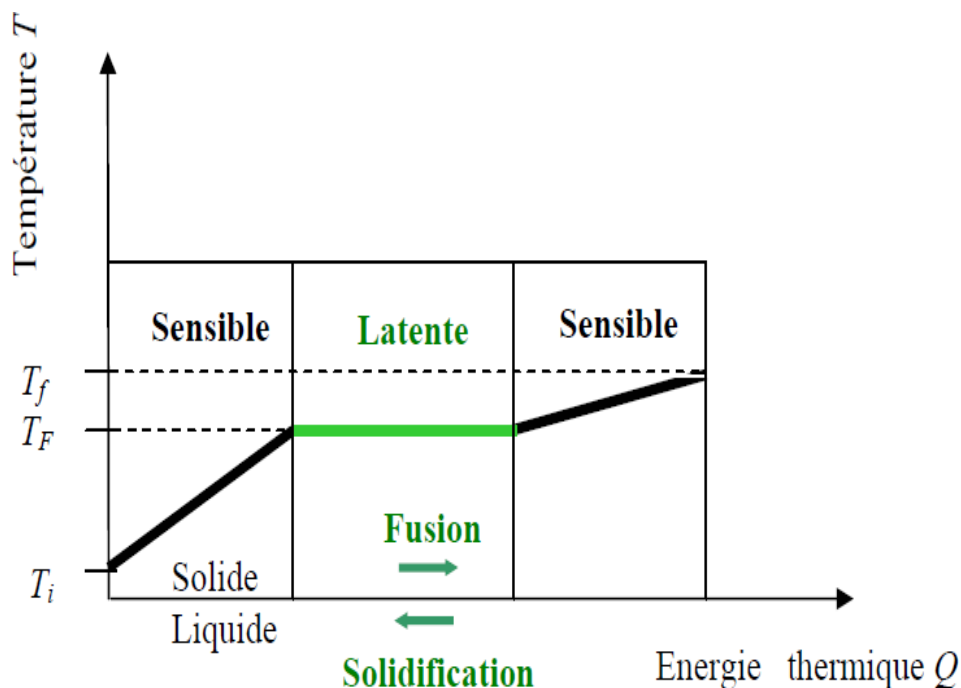


Figure 2.2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

Le classement du type de stockage par chaleur sensible dépend du milieu de stockage, en Particulier de son état physique. On définira ainsi:

Le stockage par un fluide (l'eau, l'huile, des sels fondus).

Le stockage par un solide (pierre, métaux,...).



2.2.2 Le stockage par chaleur latente :

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande quantité 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. Pour donner des ordres de grandeur, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, autrement dit et pour chiffrer l'énergie nécessaire, alors que l'on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à T = 0°C. Une autre image en est donnée figure (2.3).

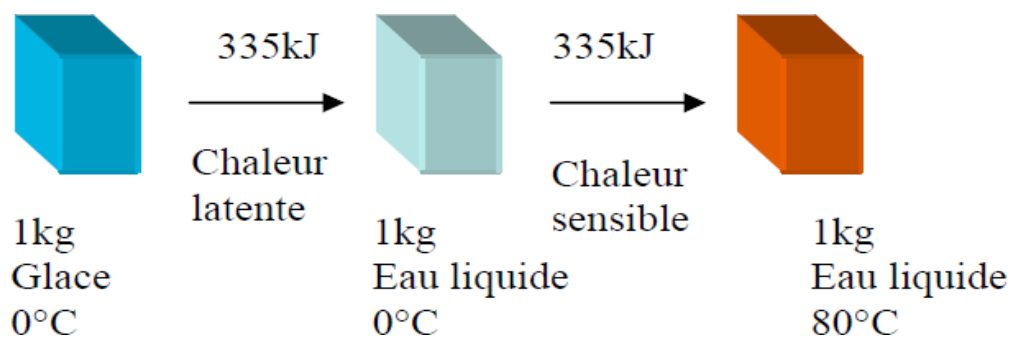


Figure 2.3 : Equivalence entre la chaleur latente nécessaire pour fondre 1 kg de glace et la chaleur sensible nécessaire pour chauffer l'eau liquide.

On remarque donc que:- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de Température pas trop important).

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).

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

$$Q=m(h_f - h_i) = m\Delta h_f \quad (2-2)$$

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 :

$$Q = m(h_f - h_i) = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) + m\Delta h_f \quad (2-3)$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure 1.1. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante. Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure (2.4). On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température).

Dans le cas d'un mélange (alliage,...), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) figure 2.4) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente (Annexe 1).

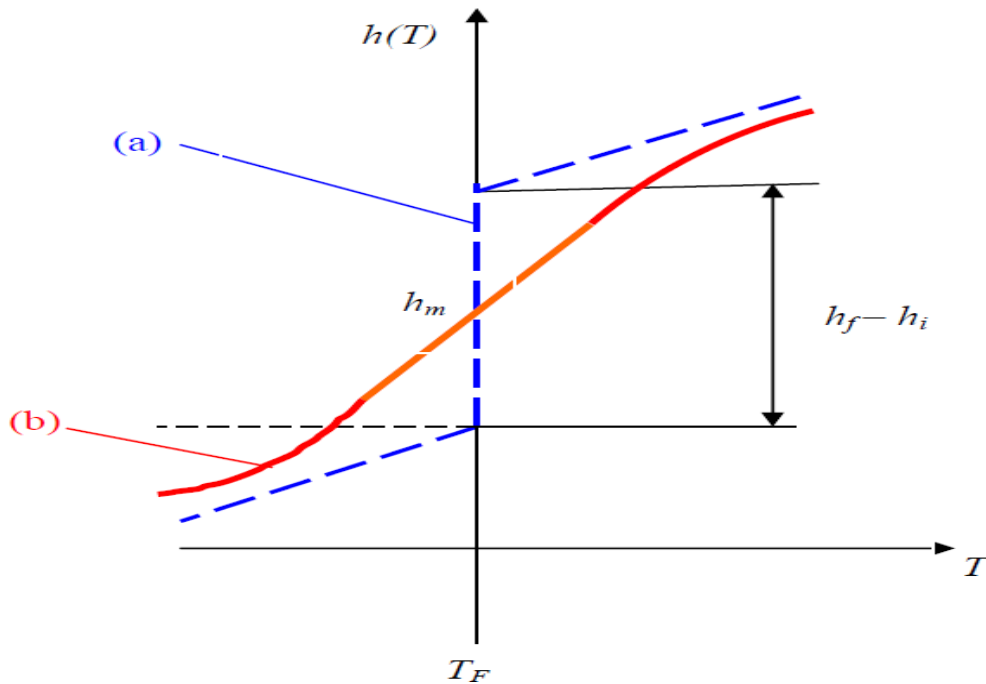


Figure 2.4 : Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange.

C'est une des caractéristiques essentielle du matériau. Elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de chaleur latente. Ainsi la quantité de chaleur stockée par un MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes qui sont :

Dans le cas des corps purs, la quantité de chaleur stockée en fonction de la température est illustrée par la figure suivante. [58]

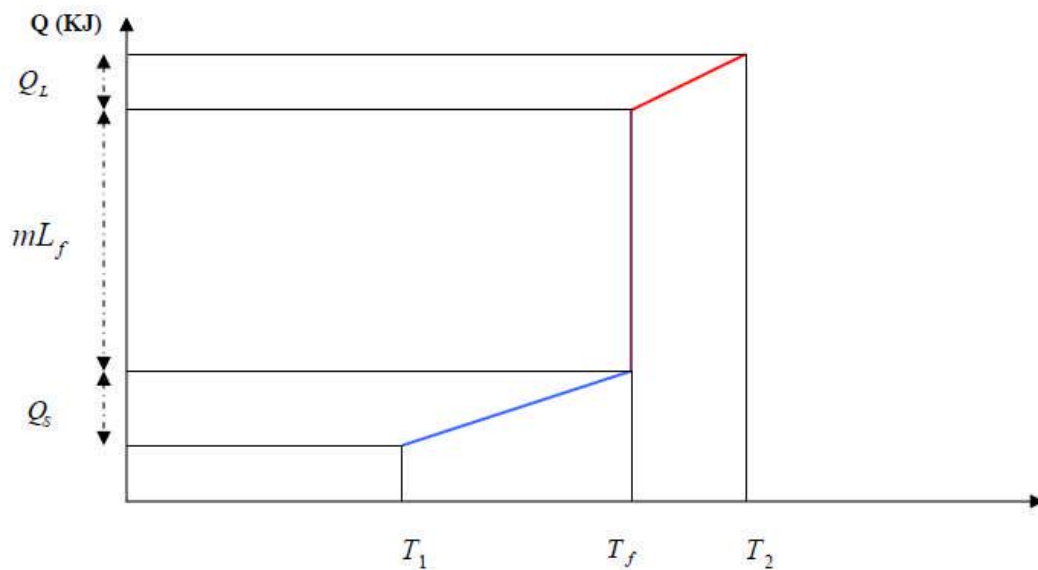


Figure 2.5 : Evolution de  $Q$  en fonction de  $T$  pour un corps pur.

En résumé, les avantages de la chaleur latente sont donc:

- des densités importantes de stockage,
- une température de changement de phase (solidification et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.

### a / 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.

**b/ Les 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 en 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.

**2.2.3. Stockage Thermochimique:**

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles.

Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente. Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs [59]

$$Q = a_r \cdot m \Delta h_r \quad (2-4)$$

**2.3. Les matériaux à changement de phase :****2.3.1. Définition :**

Les matériaux à être utilisés pour le changement de phase pour un stockage d'énergie thermique doivent avoir une grande chaleur latente et une conductivité thermique élevée. Ils doivent avoir une température de fusion comprise entre pratique de l'exploitation, faire fondre en bonne adaptation avec sous-refroidissement minimum et être chimiquement stable, de faible coût, non toxique et non corrosif. Les matériaux qui ont été étudiés au cours des 40 dernières années sont des sels hydratés, des cires de paraffine, les acides gras et les eutectiques de composés organiques et non organiques. [60]

**2.3.2. Types des matériaux à changement de phase (MCP) :**

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux : les inorganiques, les organiques et les eutectiques.

**a/ Les MCP inorganiques :**

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre  $-100\text{ °C}$  et  $+1000\text{ °C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ °C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ °C}$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ °C}$  et  $130\text{ °C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à  $150\text{ °C}$ ). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables.

**b/ Les MCP Organiques :**

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

inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables.

**c/Les MCP eutectiques :**

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

*Tableau 2.1 Propriétés thermo physiques de certains MCP. [61]*

<b>Matériaux</b>		<b>Température de fusion (°C)</b>	<b>Enthalpie de fusion (Kj/Kg)</b>
<b>PCMs Organiques</b>	Eau	0	333,6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique_laurique	21	143
<b>PCMs Inorganiques</b>	KF.4H2o	18.5	231
	Mn(No3)2.6H2o	25,8	125.9
	Na2SO4.10H2O	32	251
<b>PCMs Eutectiques</b>	66,6% CaCL2.6H2O+33,3% Mgcl2o.6H2o	25	127
	48% CaCL2+4,3% NaCL+47,3% H2o	26,8	188
	47% Ca(NO3)2.4H2O+53% Mg(NO3)2 6H2o	30	136

2.3.3. Classification des matériaux à changement de phase(PCM) :

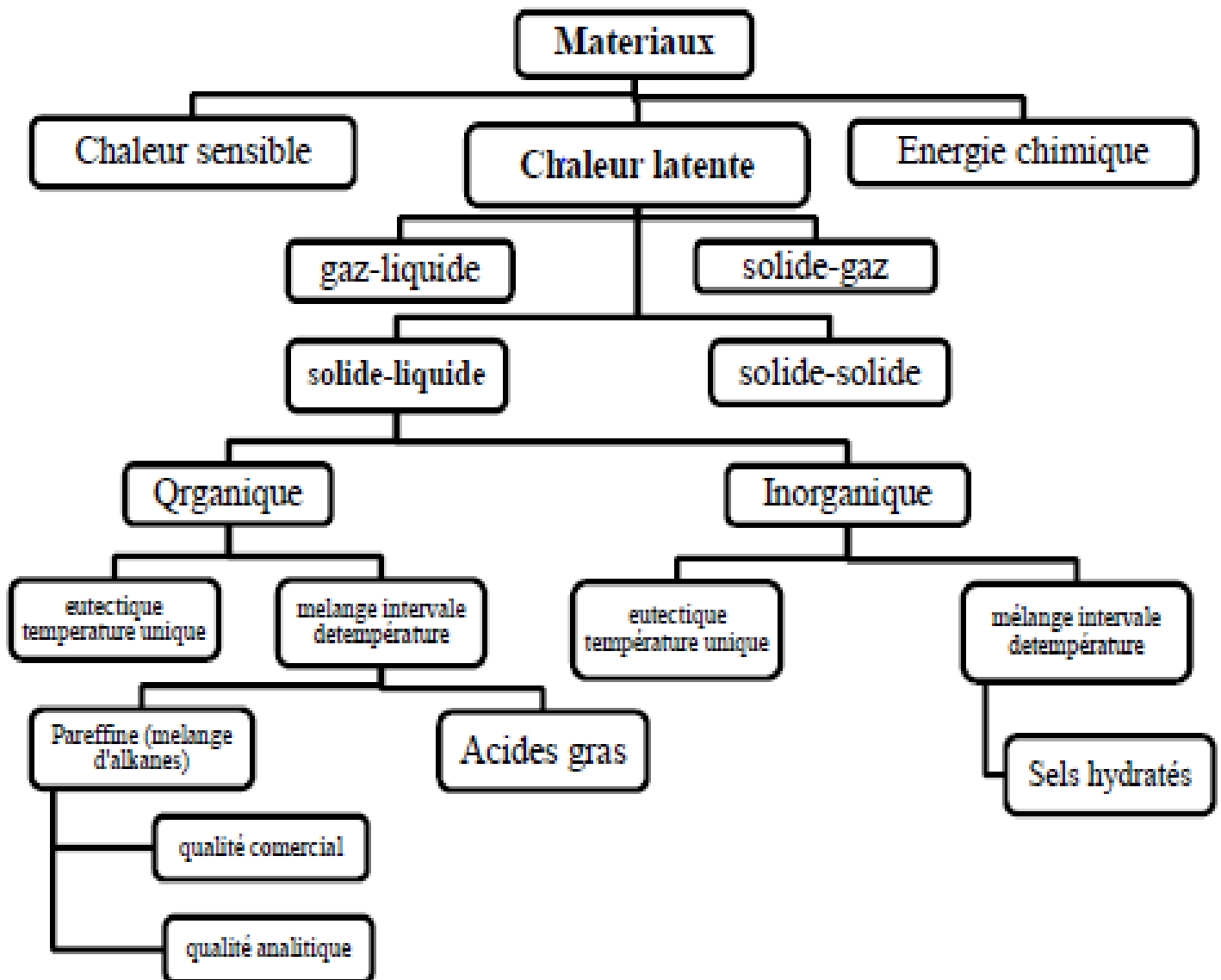


Figure 2.6 : classification des PCM.

Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiées comme PCM du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion. Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur. En effet, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermiques idéal.

Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriés adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des PCM, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le PCM un agent épaississant ou un gélifiant approprié. On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories:

- 1. Les composés organiques: paraffines, corps non-paraffiniques, polyalcools.
- 2. Les composés inorganiques: hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- 3. Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentant des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée sont détaillés dans ce qui suit.

### **a/ les composés organiques :**

Les PCM organiques sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes de formule générale  $C_nH_{2n+2}$ . Ils sont soit extraits à partir du pétrole brut, soit synthétisés par un procédé chimique où intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure (Procédé Fischer-Tropsch). Les paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbures 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. Cependant les paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion.

Pour des applications de stockage thermique les n-paraffines sont les plus utilisées à cause de leur capacité de stockage plus importante. Les paraffines intéressantes pour



le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de « cires paraffiniques ». Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Mises à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation elles montrent cependant certaines propriétés indésirables tels que : Faible conductivité thermique, sont incompatibles avec les récipients en plastique et sont modérément inflammables. Tous ces effets indésirables peuvent être éliminés en partie en modifiant légèrement la cire et l'unité de stockage. Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphite expansé (Sari, 2004 [63] ; Marin et al. 2005 [64] ; Zhang et Fang, 2006) [65]. Mehling et coll. (2000) [66] ont signalé que le matériau composite PCM-graphite a une conductivité thermique 100 fois plus élevée que la paraffine pure. Certaines paraffines sélectionnées sont indiquées avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

#### avantages et inconvénients des paraffines

- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2,1 kJ/kg.K. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.
- La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certains plastiques ou le cuivre). Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En effet, les cires

paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).

- Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non – toxiques et 100% recyclables.
- Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire. Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm.
- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m<sup>3</sup>, et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m<sup>3</sup>. La dilatation volumique est donc environ 15 % pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre les cires paraffiniques pures sont très coûteuses. Les deux principaux inconvénients sont les suivants:
- Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18 – 0,25 W/m K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage /déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.
- Les cires paraffiniques sont facilement inflammables. Il n'y a pas de ségrégation de phase.

### ➤ Conditionnement des paraffines :

Bien que les paraffines aient les propriétés requises d'un MCP leur faible conductivité pénalise la cinétique de charge/ décharge de l'énergie thermique. Pour résoudre ce problème plusieurs types de conditionnement ont été proposés:

- ✚ Les nodules.
- ✚ Les cylindres avec ailettes ou non.
- ✚ La micro-encapsulation.

Une autre méthode consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone (X. Py, R. Olives, S. Maurin ,2001) [67].

➤ **Les composés organiques non-paraffiniques :**

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Lane (1983, 1989), Abhat (1983 et Buddhi et coll. (1994) 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. Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques (Öztürk, 1997) [68]. La formule chimique générale des acides gras est  $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$  et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase . Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon (Abhat, 1983) [62]. Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs. Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- Forte chaleur de fusion,
- Inflammabilité,
- Faible conductivité thermique,
- Faible point d'éclair,
- Niveau variable de toxicité.

- Instabilité à haute température.

### b/ les sels hydratés :

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale  $AB_nH_2O$ . Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

- La température de fusion élevée
- Une haute enthalpie de fusion
- Une conductivité thermique élevée

En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement et d'être corrosifs (Abhat, 1983[62] ; Sharma et al. 2009[69]). Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase pour l'utilisation des hydrates de sels comme PCM sont l'addition d'un épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin. Dans la première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un polymère gel. En outre, un agent de nucléation est ajouté pour éviter les phénomènes de surfusion (Lane, 1983)[70]. La transformation solide – liquide des hydrates de sels est en réalité une déshydratation du sel, bien que ce processus ressemble thermodynamiquement à la fusion/cristallisation. Au point de fusion les cristaux d'hydrates se transforment en un sel anhydre ou en un sel faiblement hydraté et de l'eau. Un problème avec la plupart des sels hydratés est celle de la fusion incongruente causé par le fait que l'eau libérée ne suffit pas à dissoudre toute la phase solide présente. En raison de la différence de densité, le sel anhydre se dépose au fond du récipient donnant lieu à une séparation des phases. Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase dans l'utilisation des hydrates de sels comme PCM sont l'épaississement et la gélification. Dans la première méthode, un agent épaississant est ajouté pour

augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un gel polymère. (Lane, 1983)[70].

La plupart des sels hydratés ont aussi de pauvres propriétés de nucléation, impliquant la surfusion de la phase liquide avant la cristallisation. Une solution à ce problème consiste à ajouter un agent de nucléation, qui fournit le nucléon (germe) qui permet d'amorcer la cristallisation. Une autre possibilité consiste à conserver certains cristaux, dans une zone froide du milieu, pour servir de noyaux pour l'amorçage de la cristallisation. Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont selon Jotshietal.[71]:

- La surfusion (ou sous -refroidissement) :

On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.

- La ségrégation de phase :

Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants. Comme agents épaississants on utilise de la cellulose, de la fécule, de la sciure, du gel de silice, de la silice, etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces [72].

- La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique. Ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche.

- Leur caractère corrosif, ce qui les rend incompatibles avec de nombreux matériaux de construction utilisés dans les bâtiments. Ce dernier problème a reçu un début de solution en encapsulant les MCP dans des capsules métalliques ou de matière plastique. On distingue la macro-encapsulation et la micro encapsulation.

**2.3.4. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage :****a- La surfusion :**

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement.

**b- La 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.

**c- La 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.

**2.3.5. Le choix d'un MCP :** Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [73]:

**a. Considérations thermiques :**

Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application. La valeur de la chaleur latente de fusion ( $>130$  kJ / kg pour être compétitif). Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides. Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

**b. Propriétés 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.

**c. Considérations cinétiques :**

Des cinétiques de charge et de décharge rapides. Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

**d. Considérations 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.

**e. Considérations chimiques:**

Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température. Un bon taux de cristallisation. et ininflammabilité et non-toxicité.

**f. Considérations économiques :**

Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

**2.3.6. Applications des MCP :****a / Le transport de produits alimentaires :**

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver.

[74]

**b / Le stockage de l'énergie thermique :**

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phases liquide et solide), etc. Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C.[74]

**c/ Applications médicales :**

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang Fig. 2.6 et organes. Récipients usagé pour ce travail des buts semblable à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussin et chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [74].





Figure 2.7: Récipients contenant sang et des organes qui contiennent MCP.

### d/Le refroidissement électronique

Le conditionnement et la gestion thermique des équipements électroniques sont devenus des questions fondamentales compte tenu des niveaux de puissance accrus et de la miniaturisation des dispositifs. Le nombre des recherches récentes, qui concernent l'utilisation de MCP dans les systèmes électroniques, est en constante augmentation dû à la nature passive de ces techniques. En effet, l'utilisation d'une technique passive de refroidissement a l'avantage d'une maintenance minimale et d'une grande fiabilité. Il n'y a pas de parties mobiles ou d'éléments à remplacer dans les systèmes proposés. L'utilisation des MCP dans la gestion thermique des équipements intervient actuellement à trois niveaux :

- La réalisation d'interfaces permettant de minimiser la résistance thermique entre un composant agissant comme une source de chaleur et le dispositif d'évacuation de la chaleur,
- La réalisation de stockages thermiques permettant d'absorber les transitoires, Des applications spécifiques (éléments thermoélectriques, climatisation de volumes contenant des dispositifs à température contrôlée...)

Dans la première application, les MCP sont utilisés comme substituts aux graisses thermiques.

Ils sont utilisés tels quels ou sur un support généralement en aluminium ou avec de la fibre de verre pour former un matériau composite. Lorsque le matériau est

chauffé il passe à l'état liquide (typiquement à 51-60 °C) et deux phénomènes importants se passent :

- Les surfaces baignées par le matériau sont « mouillées » par le MCP éliminant la résistance de contact
- L'épaisseur du MCP peut décroître en proportion de la pression appliquée et atteindre une valeur minimale. Puisque la résistance thermique est proportionnelle à l'épaisseur du matériau et inversement proportionnelle à la conductivité thermique, il est important d'avoir une épaisseur minimale de matériau qui remplisse complètement les aspérités de l'interface et d'avoir un matériau ayant la plus forte conductivité thermique possible.

La deuxième application concerne essentiellement les industries de l'informatique et des télécommunications dans lesquelles il est crucial de ne pas interrompre l'alimentation en énergie électrique. En cas de rupture de l'alimentation, un dispositif vient se substituer au secteur. La transition se passe généralement avec production d'un pic d'intensité de courant lors de la connexion et/ou du démarrage du dispositif de substitution (groupe électrogène, batterie d'accumulateurs, pile à combustible,...). La puissance dissipée lors de ce pic est alors absorbée par le MCP qui se resolidifiera progressivement lors du retour au régime normal. Cette gestion de la puissance se fait soit au niveau du système soit au niveau du composant lui-même. Ce problème de pics thermiques se retrouve sur les transistors de puissances

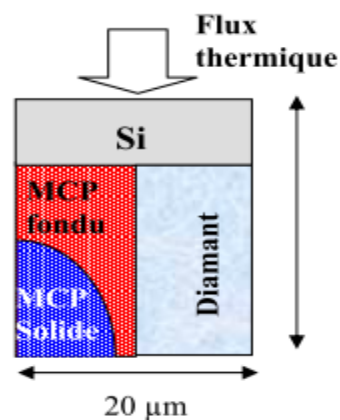
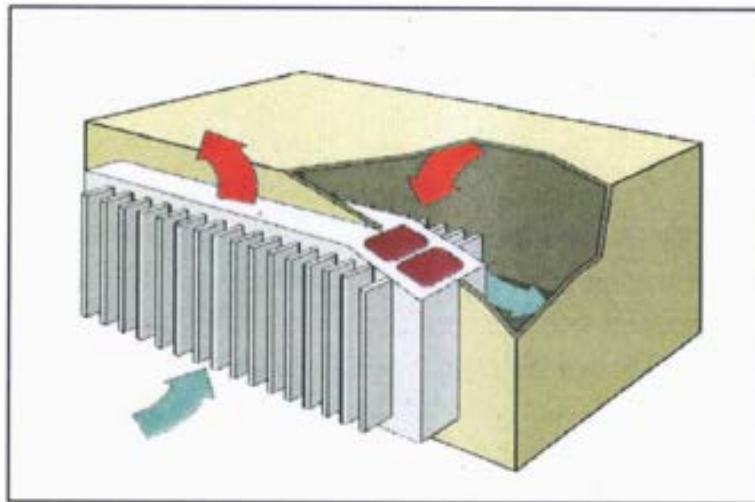


Figure 2.8: Schéma de principe de la gestion thermique d'une puce électronique avec un MCP.

Servant de commutateurs. Par exemple dans certains transistors de puissance en carbure de silicium le MCP est placé directement en contact avec le matériau du composant (figure 2.8) [75].

Dans les applications spécifiques, on peut citer la climatisation de cabines téléphoniques ou la climatisation de pièces, de conteneurs ou de boîtiers contenant du matériel électronique. Par exemple certains systèmes à MCP stockent la chaleur de l'équipement pendant le jour et la transfèrent au toit pendant la nuit. Ils maintiennent la pièce ou le conteneur à une température légèrement supérieure à la température nocturne extérieure. Parce qu'un tel système ne possède aucunes pièces mobiles et n'a pas besoin de source d'énergie, il est plus fiable, puisqu'il n'introduit aucun air extérieur et contrairement à un système classique, il n'introduit aucune poussière à l'intérieur. Enfin, gardant l'équipement à une température légèrement supérieure à la température extérieure il permet de contrôler l'humidité dans des limites acceptables. De tels systèmes sont maintenant étendus aux boîtiers électroniques limitant ainsi les apports extérieurs d'énergie électrique. Sur la figure (2.9) un échangeur permettant de gérer la température d'un boîtier est présenté. Le MCP est dans les canaux situés à l'intérieur de l'échangeur.



*Figure 2.9: Echangeur de chaleur à MCP*

Dans un autre domaine, des essais de couplage de MCP avec la source froide d'un thermo élément ont montré une amélioration significative des performances d'un système de réfrigération [76].

### **2.4. Conclusion :**

L'utilisation des matériaux de changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique 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 a changement de phase ont été étudiés et différentes solutions ont été présentées, donnant à l'utilisateur l'occasion d'être sûr que les systèmes conçus soient réussis. Néanmoins, la recherche est nécessaire toujours pour trouver de nouveaux matériaux plus efficaces et meilleurs marché, et pour donner meilleures solutions aux problèmes techniques tels que la surfusion, la ségrégation et la compatibilité de matériaux a changement de phase.

# **CHAPITRE 3**

## **Résultats et interprétations**

### INTRODUCTION :

Le but de ce chapitre est de faire une étude expérimentale pour examiner le comportement des matériaux à changement de phase (MCP) en particulier la paraffine comme moyen de stockage de la chaleur.

Pour ce faire, l'effet de plusieurs paramètres sont à examiner :

En premier lieu le débit d'eau chaude  $q_c$  est examiné pour la phase de la charge, le débit d'eau froide  $q_f$  pour la phase de la décharge. Trois débits sont étudiés : 1.5 l/mn, 3 l/mn et 4.5 l/mn.

L'influence de la masse de la paraffine mise en jeu est aussi examinée. Deux quantités de paraffine ont été examinées : une masse de 500g et une autre de 120g pour montrer l'effet de la masse sur la cinétique de la fusion et de la solidification.

Un nouveau paramètre non existant dans les travaux antérieurs est examinée, c'est l'ajout des sels fondus avec de la paraffine pour améliorer la conductivité thermique de cette paraffine. Deux pourcentages de sel fondu dans la paraffine sont étudiés : 10%, 20% du poids propre de paraffine.

Au cours des expériences deux phases importantes sont étudiées : la première phase c'est la phase de charge où on doit chauffer la paraffine jusqu'à sa fusion complète.

Ce chauffage est effectué pour trois températures d'entrée d'eau chaude différentes : 60 °C, 70°C et 75°C.

La deuxième phase est la phase de décharge où on doit couper l'alimentation en eau chaude et la remplacer par l'eau froide à une température ordinaire l'eau (18 °C ou 19°C).

3.1 Description Du Dispositif Expérimental :

Le dispositif expérimental est composé de l'enceinte où se trouve le MCP et une installation adéquate qui nous permet d'alimenté cette enceinte par de l'eau chaude et de l'eau froide. Elle nous permet aussi de mesuré les différents débits et les différentes températures. Le Shéma de l'installation expérimental est donnée par la figure 3.1

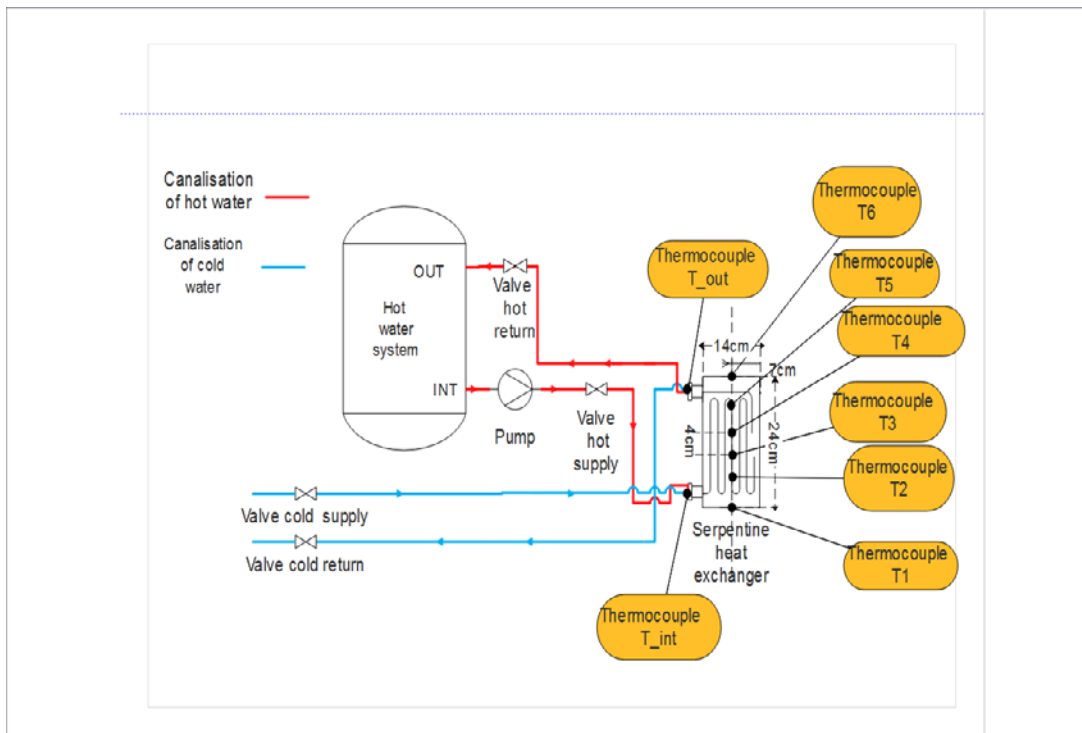


Figure 3.1 : Shéma de l'installation expérimental

**3.1.1 Description l'enceinte où se trouve le MCP:**

L'enceinte où se trouve le MCP est composé essentiellement d'un échangeur de chaleur à serpentín ( voir la figure 3.2.)



*Figure 3.2 : Serpentin du chauffe-eau utilisée*

Ce dernier est isolé thermiquement avec la lein de verre d'épaisseur 3cm. Les étapes de cette isolation thermiques sont montrés par les figures 3.3 à 3.5



*Figure 3.3 : Serpentin du chauffe-eau utilisé*



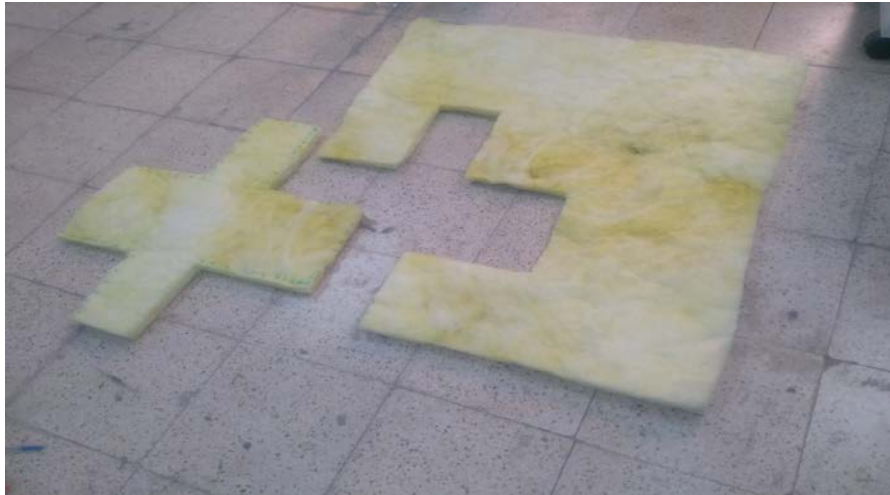


Figure 3.4 : la laine de verre utilisée comme calorifuge



Figure 3.5 : Calorifugeage du serpentin avec la laine de verre

Le lieu où se trouve la paraffine (le fond du chauffe-eau) est couvert d'une mince couche conductrice d'aluminium qui porte ce paraffine (voire figure 3.6)



*Figure 3.6 :Serpentin calorifugé avec une plaque d'aluminium à l'intérieur*

Comme il y-a deux circuit d'eau, un pour l'eau chaude (la charge) et l'autre pour l'eau froide (la décharge), et comme ces deux circuits travaillent en intermittance, l'entrée (notament la sortie) de chacun de ces deux circuit sont raccordé avec un by-passe pour avoir une seule entrée (notament une seule sortie) qui sera reliée au serpentin.



*Figure 3.7 : Raccord by-passe pour l'entrée et la sortie du serpentin*

Six thermocouples sont placés dans le fond du serpentin (lieu où se trouve la paraffine) et se trouvant au milieu avec un espace de 4cm entre deux thermocouples consécutifs. Deux autres thermocouples ont été inséré respectivement dans l'entrée et la sortie du serpentin pour mesurer la température d'eau chaude (ou froide) à l'entrée et à la sortie. Ces différentes emplacements de thermocouples sont illustré par la figure 3.8. Il faut noté que le MCP ne peut pas absorbé plus de chaleur lorsque la difference de température d'eau d'entée est de sortie sont presque identiques.

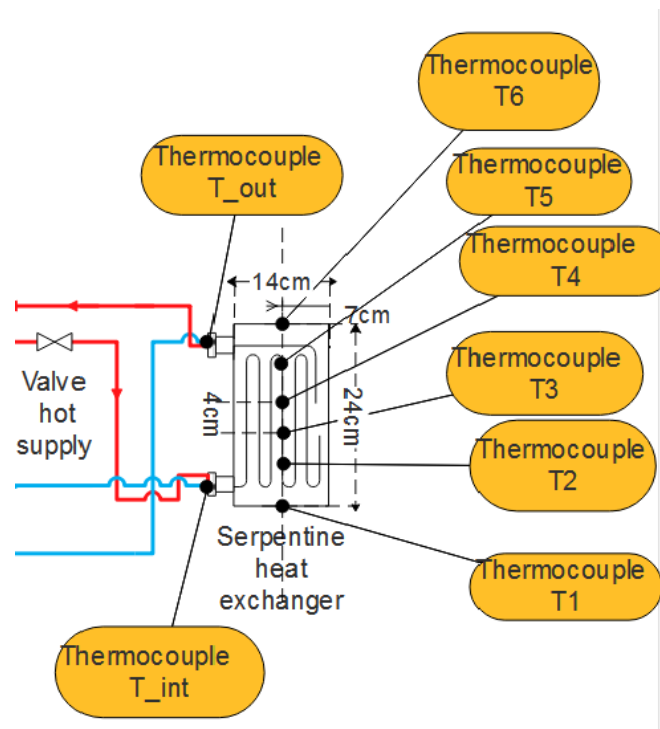


Figure 3.8 : Emplacement des thermocouples dans le serpentin

### 3.1.2 Description de l'installation du banc d'essai :

L'installation du banc d'essai est montrée par la figure 3.9. Cette installation contient de l'eau chaude et de l'eau froide. L'eau froide est alimentée par un circuit extérieur ouvert. Tandis que l'eau chaude stockée dans un réservoir de 06 litres de capacité est chauffée par une résistance électrique à puissance variable. Cette eau alimente le circuit grâce à une pompe accélératrice.



Figure 3.9: Le module du banc d'essai

### 3.1.2.1 Eléments du banc d'essai :

Le banc d'essai se compose de deux circuits d'alimentation en eau et une partie d'acquisition.

#### 3.1.2.1-a Les deux sources d'alimentation en eau :

- **La source chaude :**

Le réservoir d'eau chaude (figure 3.10) contient de l'eau à chauffer grâce à une résistance électrique (figure 3.11). La température de l'eau chaude est réglable par une interface de commande appelée contrôleur de température de l'eau (figure 3.12) (water temperature controller). Le débit de sortie de l'eau chaude est commandé par une pompe de circulation (figure 3.13). Ce débit est réglé à l'aide d'une vanne manuelle.



Figure 3.10 : Réservoir d'eau chaude



Figure 3.11 : Résistance électrique de chauffage



Figure 3.12 : ontrôleur de température





Figure 3.13 : Pompe de circulation du fluide

Les paramètres de l'eau chaude sont affichés dans l'interface d'affichage de la partie chaude. Ces paramètres (débit, température et niveau d'eau dans le réservoir) sont mesurés par les instruments et des capteurs de mesure suivants - intégrés dans le banc d'essai- : capteur de débit, capteur de température, capteur de niveau

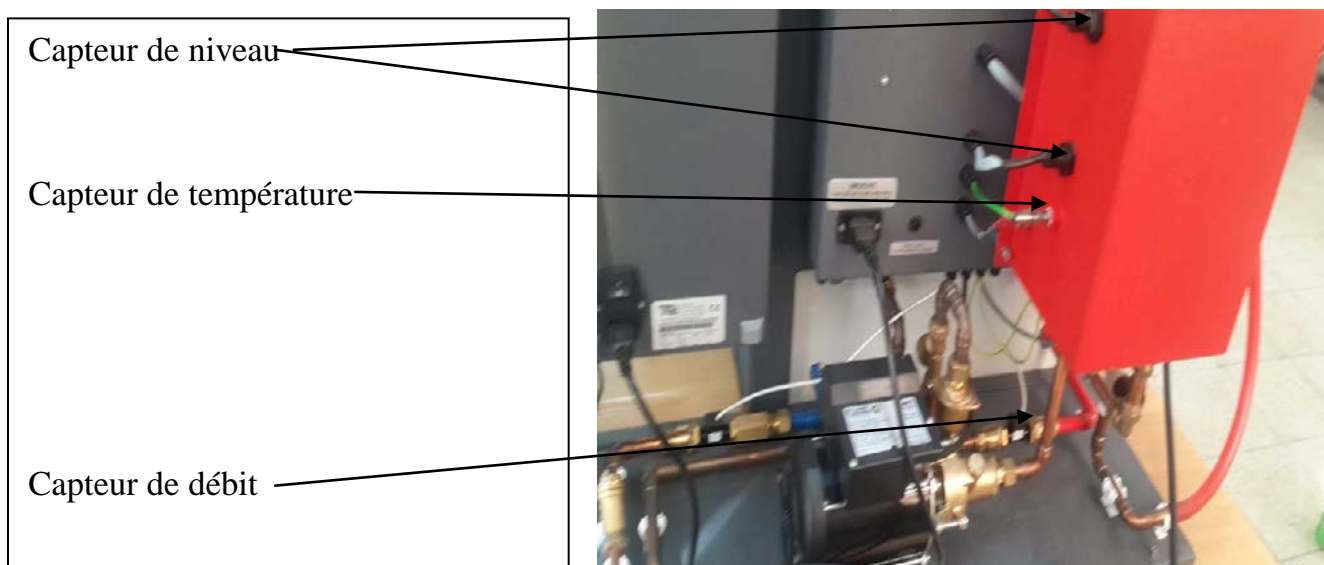


Figure 3.14 : Différents capteurs de mesure

- **La source froide :**

L'eau froide est alimentée en circuit ouvert directement par le robinet du circuit d'alimentation urbain grâce à une vanne manuelle.

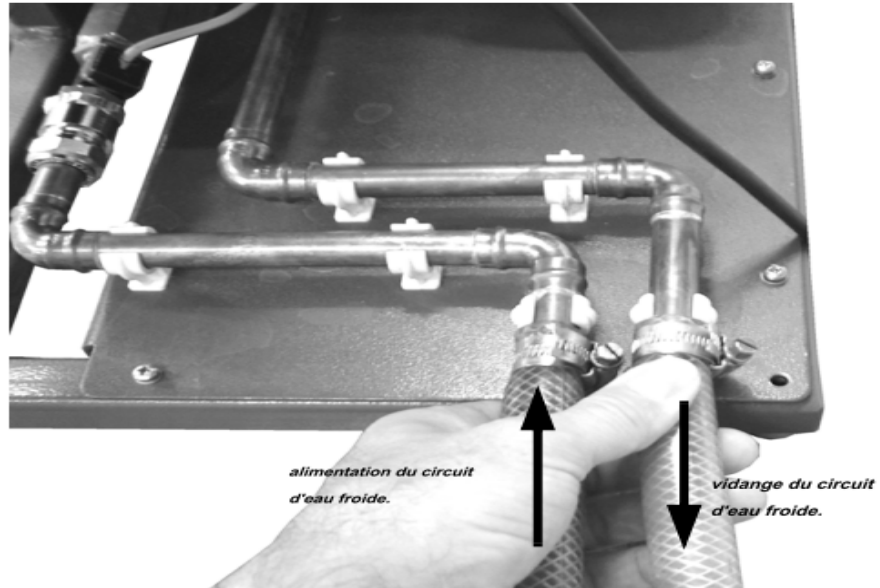


Figure 3.15 : Connecter l'alimentation en eau froide et égouttez

**3.1.2.1-b Système d'acquisition des données :**

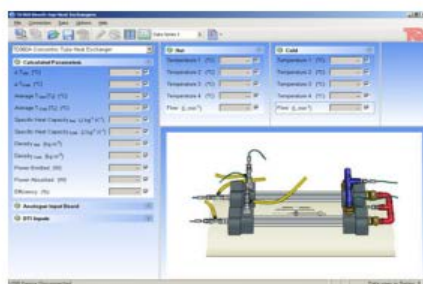


Figure 3.16 : Le matériel et les logiciels VDAS

VDAS de *TecQuipment* est un système d'acquisition de données. Il est constitué en deux parties, matériel et logiciel. Il comprend les éléments suivantes:

- ✚ Connexion automatique des données des expériences.
- ✚ Calcul automatique des données.
- ✚ Faire gagner du temps.
- ✚ Réduction des erreurs.
- ✚ Création des graphiques et des tableaux des données.
- ✚ Exporter les données pour le traitement dans des autres logiciels (Origin, excel, etc...)

### 3.1.2.1-c Connexion à VDAS :

Le logiciel développé par TecQuipment, VDAS® [77] (système universel d'acquisition de données), a été conçu pour fonctionner en parfaite harmonie avec les produits TecQuipment.

Le système numérique est facile à configurer et à utiliser avec de simples connexions USB. Il fournit des fonctions de saisie, de calcul, de création de graphiques et d'exportation de données en temps réel. Dans certains cas, des tracés en temps réel de signaux analogiques et le traitement de signaux avancé sont également possibles.

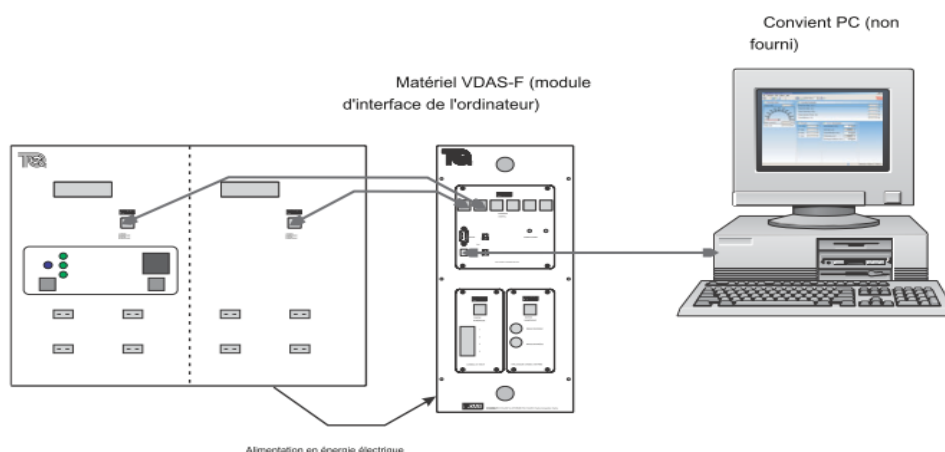


Figure 3.17 : Connexion le banc d'essai avec logiciel (VDAS)



### 3.2 Propriétés de la paraffine utilisée dans cette expérience :

#### 3.2.1 Description :

La paraffine utilisée est une paraffine raffinée de couleur blanche, sans goût, ni odeur. Elle a de bonnes caractéristiques isolantes, elle est conforme aux réglementations relatives aux matériaux destinés à être mis au contact des denrées alimentaires [78] : BGA XXVème recommandation ; FDA : CFR 172886 et 1783710. Matière première conforme à la Pharmacopée Européenne en vigueur (monographie 1034 : Paraffine solide)

#### 3.1.2 Caractéristiques :

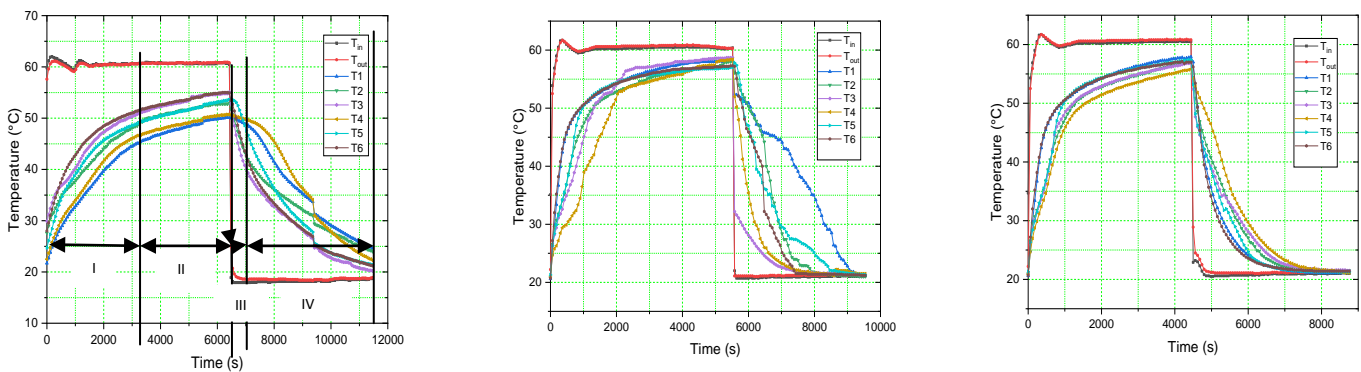
Tableau 3.1 : Caractéristiques de la paraffine de 50/52 à 68/70 [78]

Grades	50 52	52/54	52/54	56/58	58/60	62/64	68/70
Point de fusion (°C)	50-52	51-54	54-56	56-58	58-60	62-64	68-70
Pénétration à 25°C (1/10mm)							9-20
Viscosité cinématique à 100°C (mm <sup>2</sup> /s)	2-6	2-6	2-6	2-6	3-6	3-6	3-8
Teneur en huile (%)	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.5	≤0.8	≤0.8
Couleur saybolt	≥+26	≥+26	≥+26	≥+26	≥+26	≥+26	≥+26

**3.3 Evolution de la température du MCP pendant les processus de charge et décharge :**

Dans cette première partie d'étude, on étudie le processus de charge et décharge on montre l'évolution de la température du MCP et pour les trois débits étudiée (1.5 l/mn, 3 l/mn et 4.5 l/mn).

La figure 3.18-a donne les courbes pour le processus de charge et décharge pour les six thermocouples implanté dans le MCP (de T1 à T6) ainsi que la température d'entrée de HTF pour une température de HTF=60°C. De même, les figures 3.18-b et 3.18-c respectivement pour les autres températures d'entrée du HTF=70°C et HTF=75°C. On peut distinguer quatre zones :



a- Débit  $Q_v=1.5$  l/mn

b- Débit  $Q_v=3$  l/mn

c- Débit  $Q_v=4.5$  l/mn

Figure 3.18 : Evolution de la température de MCP pour une température du HTF=60°C et pour les trois débits étudiée

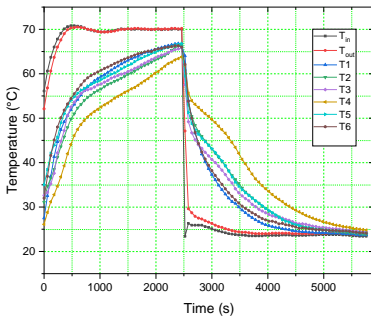
La première zone c'est la zone de chauffage du MCP elle commence dès le commencement du chauffage du MCP et se termine a partir du commencement de l'état de fusion du MCP qui correspond a une température de 52°C .cette phase s'achève pour une duré égale à 4020s pour T6 et T3 ,5220 s pour T5 et T2 et 6360 s (fin de la phase de charge du MCP) pour T1 et T4.

La deuxième zone c'est la zone de fusion du MCP et qui correspond à la fin de la première zone jusqu'à la fin de la phase de charge du MCP.

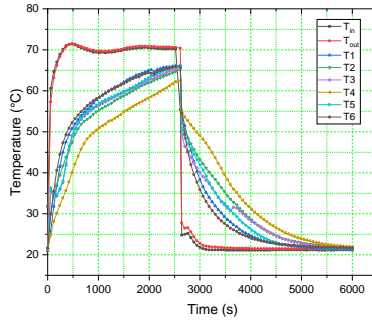
La troisième zone correspond au début de la phase de décharge c'est-à-dire la phase de solidification du MCP (de 6360 s à 6510s).

La quatrième zone correspond à la phase du refroidissement du MCP solide et qui correspond à un temps a lent de 65510 jusqu'a 11523s.

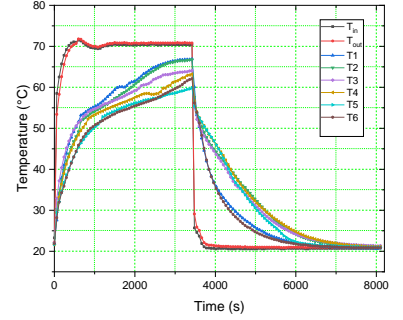
On constate une évolution similaire de différents températures du MCP (figures 3.19-a, 3.19-b et 3.19-c) pour une température d'entrée du HTF= 70°C et les figures 3.20-a, 3.20-b et 3.20-c pour HTF= 75°C à l'exception de la réduction du temps de charge et de décharge. Ces différences seront discutées par la suite.



a- Débit  $Q_v=1.5$  l/mn

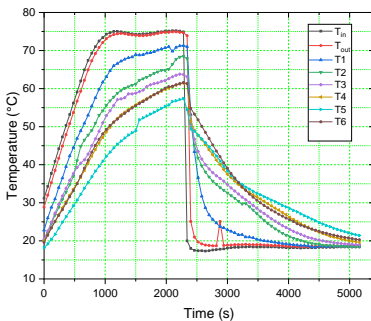


b- Débit  $Q_v=3$  l/mn

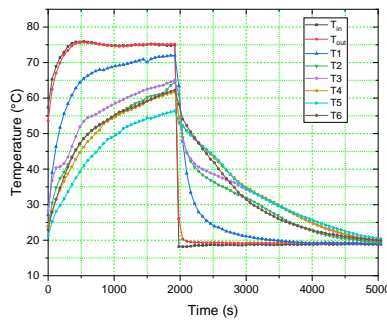


c- Débit  $Q_v=4.5$  l/mn

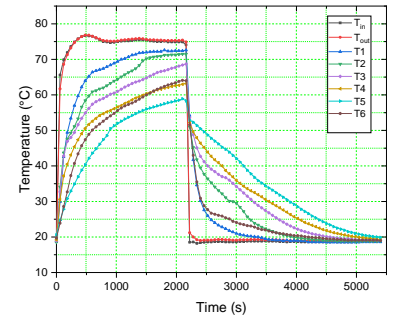
Figure 3.19 : Evolution de la température de MCP pour une température du HTF=70°C et pour les trois débits étudiée



a- Débit  $Q_v=1.5$  l/mn



b- Débit  $Q_v=3$  l/mn



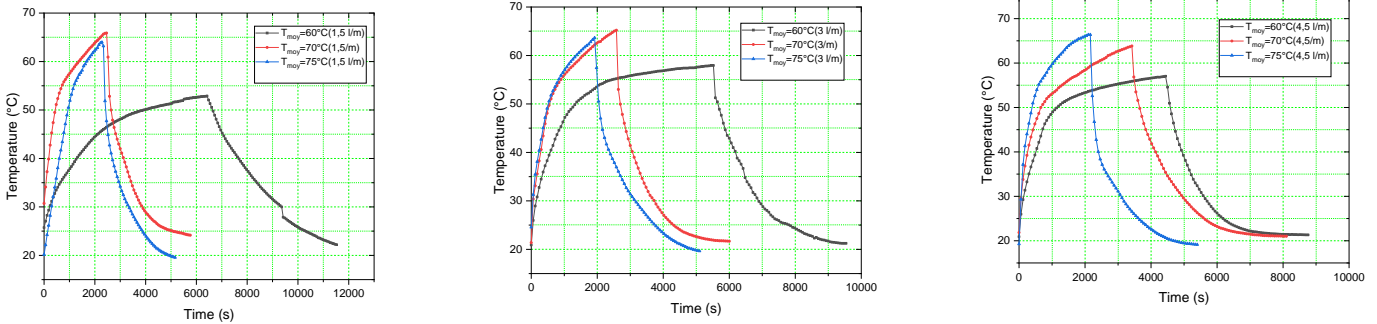
c- Débit  $Q_v=4.5$  l/mn

Figure 3.20 : Evolution de la température de MCP pour une température du HTF=75°C et pour les trois débits étudiée

### 3.4 Influence de la température d'entrée du HTF :

Pour montré l'influence de la température d'entrée du HTF , on trace le profil de l'évolution de la température moyenne issue des six valeurs mesurés dans le MCP (T1 à T6).

Les figures 3.19-a, 3.19-b et 3.19-c donnent la comparaison de la température moyenne du MCP pour  $HTF=60^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$  respectivement pour  $Q_v=1.5\text{l/mn}$ ,  $Q_v=3\text{l/mn}$  et  $Q_v=4.5\text{l/mn}$ .



a- Débit  $Q_v=1.5\text{ l/mn}$

b- Débit  $Q_v=3\text{ l/mn}$

c- Débit  $Q_v=4.5\text{ l/mn}$

Figure 3.21 : Influence de la température d'entrée du HTF

Pour  $Q_v=1.5\text{l/mn}$  (figure 3.21-a) , le temps de charge est de 6420s pour  $THF=60^{\circ}\text{C}$  ,2400s pour  $THF=70^{\circ}\text{C}$  et 2280s pour  $THF=75^{\circ}\text{C}$  .Le temps de charge est donc réduit de 64% en passant de  $THF=75^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$  et de 63% en passant de  $THF=70^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ . Le passage de  $THF=75^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C}$  n'a contribué que de 5% de réduction du temps de charge. Concernant le temps de décharge, il est de 5100s pour  $THF=60^{\circ}\text{C}$  ,3360s pour  $THF=70^{\circ}\text{C}$  et 2880s pour  $THF=75^{\circ}\text{C}$ . Le temps de décharge est réduit de 44% en passant de  $THF=75^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$  et de 34% en passant de  $THF=70^{\circ}\text{C}$  à  $60^{\circ}\text{C}$ . Le tableau 1 donne les temps de charge et décharge et le gain correspondant en pourcentage pour différents débits.

Pour  $Q_v=3\text{l/mn}$  (figure 3.21-b), les courbes de charge sont presque semblable pour les températures du HTF=  $70^{\circ}\text{C}$  et  $75^{\circ}\text{C}$ . La différence est sentie dès que la phase de fusion est enclenchée. La décharge est similaire au cas du premier débit à des temps différents. La différence est resté significative pour le temps de charge et décharge en passant de  $THF=60^{\circ}\text{C}$  à  $THF=75^{\circ}\text{C}$ .

Pour  $Q_v=4.5\text{l/mn}$  (figure 3.21-c), une différence consistante est sentie pour la phase de charge et de décharge pour les trois températures du THF.

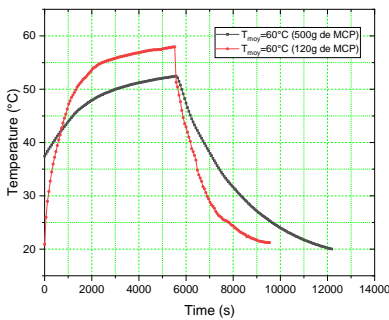
Tableau 3.2  
Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents débits.

	Qv=1.5l/mn	Temps de charge [s]	Temps de décharge [s]	Qv=3l/mn	Temps de charge [s]	Temps de décharge [s]	Qv=4.5l/mn	Temps de Charge [s]	Temps de Décharge [s]
THF=[60°C]		6420	5100		5520	9544		4436	8750
THF=[70°C]		2400	3360		2581	6000		3410	8112
THF=[75°C]		2280	2880		1922	5095		2134	5403
Gain [%] 75°C à 60°C		64	44		65	47		52	38
Gain [%] 70°C à 60°C		63	34		53	37		23	7
Gain [%] 75°C à 70°C		5	14		26	15		37	33

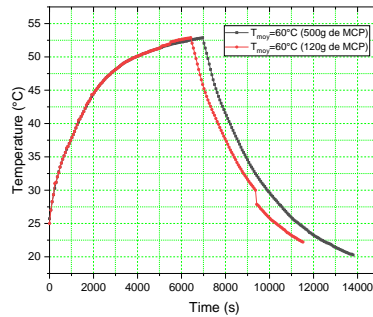
Ces graphes nous permettent de conclure que la température d'entrée du HTF a une influence importante pour l'accélération de la phase de charge du PCM et au retardement de la phase de décharge. Cette influence est assez importante en passant de HTF=60°C vers HTF=70°C ou 75°C où le taux de charge ou décharge est important. Par contre le taux de charge ou décharge est peu important en passant de HTF=70°C à 75°C. Ces courbes montrent aussi malgré que le temps de charge reste le plus court pour une THF=75°C quelque soit le débit du THF

3.5 Influence de la masse du MCP :

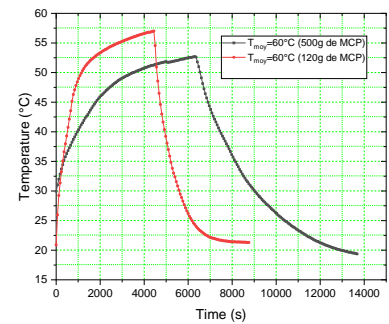
Pour examiner l'influence de la masse du PCM mise en jeux on a pris deux masses M1 500g et M2=120g. on a comparé les profils de températures moyennes prises à partir



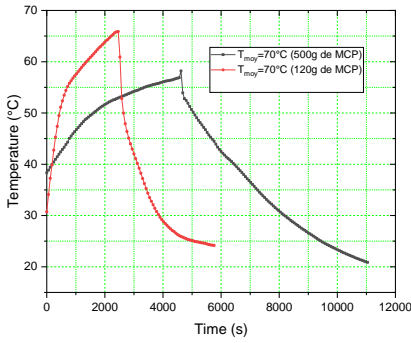
a- Débit Qv=1.5 l/mn



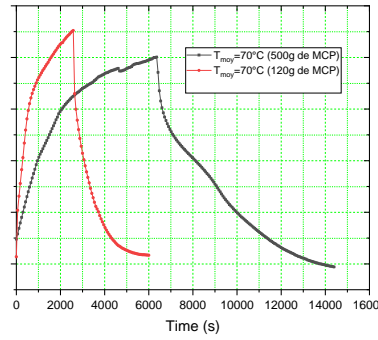
b- Débit Qv=3 l/mn



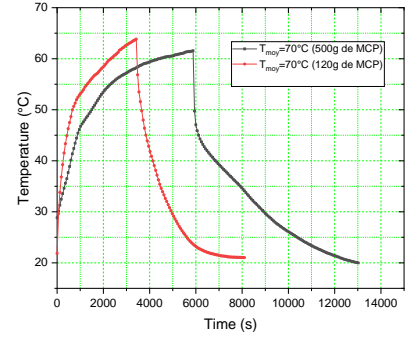
c- Débit Qv=4.5 l/mn



d- Débit  $Q_v=1.5$  l/mn



e- Débit  $Q_v=3$  l/mn



f- Débit  $Q_v=4.5$  l/mn

Figure 3.22 : Influence de la masse du MCP

(T1 à T6) pour THF=60°C et THF=70°C et cela pour les trois débits étudiés. Les courbes de la figure 3.20 donnent la comparaison entre les deux masses étudiée. Pour THF=60°C, et pour  $Q_v=1.5$  l/mn (figure 3.22-a) on constate que les deux courbes sont identiques pour la phase de charge, une différence est constatée pour la phase de décharge. L'augmentation de débit et de THF (figure 3.22-b à 3.22-f) conduit à la création de la différence de comportement entre les deux masses de la paraffine étudiée (120g et 500g). On peut conclure que l'augmentation de la masse conduit à accroître le temps de charge et de décharge se qui explique le stockage d'une énergie importante pour la masse de 500g relative à la masse de 120g.

Tableau 3.3

Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents débits.

	$Q_v=1.5$ l/mn		$Q_v=3$ l/mn		$Q_v=4.5$ l/mn	
	Temps de Charge [s]	Temps de décharge [s]	Temps de charge [s]	Temps de décharge [s]	Temps de charge [s]	Temps de décharge [s]
THF=[60°C] et M=120g	5520	5580	5520	9544	4436	8750
THF=[60°C] et M=500g	2400	3360	2581	6000	3410	8112
THF=[70°C] et M=120g	2280	2880	1922	5095	2134	5403
THF=[70°C] et M=500g						
Gain [%] 60°C	64	44	65	47	52	38
Gain [%] 70°C	63	34	53	37	23	7

### 3.6 Influence de la masse du sel rajouté au MCP :

Dans cette partie de travail, on étudie l'effet de l'ajout d'une certaine quantité de sel avec la paraffine ayant une masse de 120 g : ajout de sel à 10% et 20% de 120g de la paraffine.

#### 3.6.1 Ajout de 10% de sel :

La figure 3.23 représente l'évolution de la température pour de la paraffine avec ajout de 10% de sel pour des températures moyennes de THF = 60°C , 70°C et 75 °C et un débit  $Q_v=4.5$  l/mn. Pour THF = 70°C et 75°C une légère différence est constaté entre les deux courbes correspondante a ces températures. Ces courbes ayant une pente importante (pendant la phase de charge et de décharge), se qui explique l'accélération du processus de charge et de décharge. Pour THF=60°C on constate que la paraffine met un peut de temps on plus pour la charge et la décharge comparativement aux autres températures précédentes. On constate aussi pour cette température que la paraffine commence a se saturé (courbe presque une droite parallèle à l'axe de temps) à partir du point de fusion et donc la paraffine n'a pas la capacité d'emmagasiné plus d'énergie. Inversement à cela, pour THF =70°C et 75°C on constate que la même quantité de paraffine a la possibilité d'emmagasiné encore plus d'énergie.

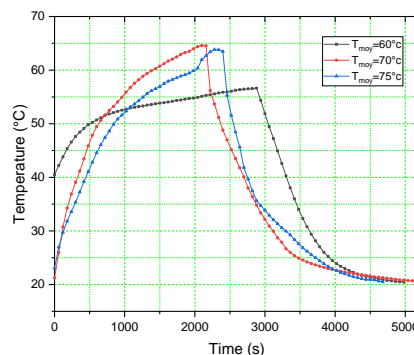


Figure 3.23 : Ajout de 10% de sel

#### 3.6.2 Ajout de 20% de sel :

La figure 3.24 représente l'évolution de la température pour de la paraffine avec ajout de 20% de sel pour des températures moyennes de THF = 60°C, 70°C et 75 °C et un débit  $Q_v=4.5$  l/mn. Pour ce cas la, et pour la phase de charge on constate une différence entre les trois courbe a partir d'une température égale à 45°C. Cette différence devient importante à partir de la température de fusion de la paraffine (52°C).

Pour la phase de décharge, le phénomène s'inverse où on constate une importante différence au début de la phase de décharge, et ces courbes se coincident à sa fin.

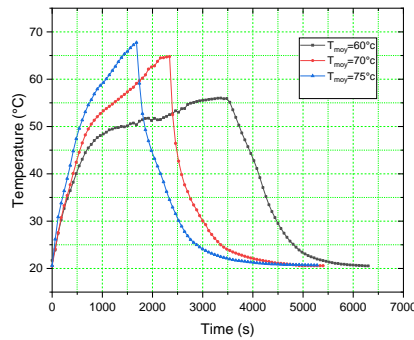
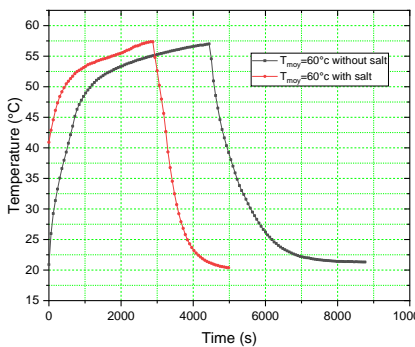


Figure 3.24 : Ajout de 20% de sel

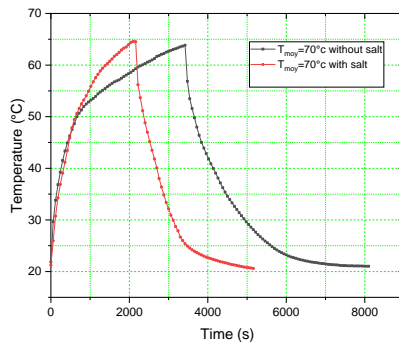
3.7 Comparaison des résultats sans et avec l'ajout du sel à la paraffine :

3.7.1 Comparaison pour un ajout de 10% de sel :

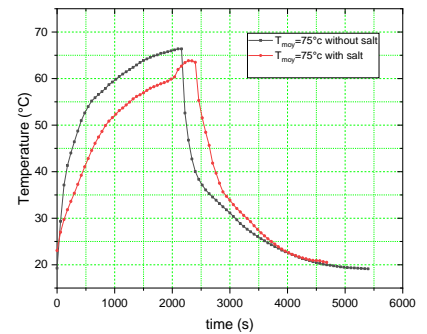
Les figures 3.25 a b et c donnent la comparaison pour un ajout de 10% de sel pour une masse de



a- THF=60°C



b- THF=70°C



c- THF=75°C

Figure 3.25 : Comparaison pour un ajout de 10% de sel

120g de paraffine et pour THF= 60°C (3.25-a), THF= 60°C (3.25-a), THF= 70°C (3.25-b) et THF= 75°C (3.25-c). Ces courbes montre clairement la différence –pour une même température – entre les courbes sans et avec ajout du sel pendant la phase de



charge et de décharge. L'ajout du sel augmente la conductivité thermique du mélange paraffine-sel se qui conduit à l'accélération de la phase de la charge on favorise le transfert de chaleur par conduction puisque la paraffine est toujours dans la phase solide ; et on favorise le transfert de chaleur par convection dans la phase de décharge puisque la paraffine est toujours dans la phase liquide. Le tableau 3.3 résume le gain du tems de charge et de décharge en pourcentage pour l'ajout du sel à 10% à la paraffine.

Tableau 3.4

Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents température et  $Q_v=4.5l/mn$

$Q_v=4.5l/mn$	Temps de Charge [s]	Temps de Décharge [s]
THF=[60°C]	4380	8760
THF=[60°C]	2880	5000
THF=[70°C]	3420	8040
THF=[70°C]	2160	5160
THF=[75°C]	2340	5400
THF=[75°C]	2160	4620
Gain [%] à 60°C	34	43
Gain [%] à 70°C	37	35
Gain [%] à 75°C	7	14

**3.7.2 Comparaison pour un ajout de 20% de sel :**

Les figures 3.26 a, b et c donnent la comparaison pour un ajout de 20% de sel pour une masse de 120g de paraffine et pour THF= 60°C (3.26-a), THF= 70°C (3.26-b) et THF= 75°C (3.26-c). Ces courbes montre clairement la différence –pour une même température – entre les courbes sans et avec ajout du sel pendant la phase de charge et de décharge. L'ajout du sel augmente la conductivité thermique du mélange paraffine-sel se qui conduit à l'accélération de la phase de la charge on favorise le transfert de chaleur par conduction puisque la paraffine est toujours dans la phase solide ; et on favorise le transfert de chaleur par convection dans la phase de décharge puisque la paraffine est toujours dans la phase liquide.

Le tableau 3.5 résume le gain du tems de charge et de décharge en pourcentage pour l'ajout du sel à 20% à la paraffine.

Tableau 3.5

Temps de charge et décharge et gain correspondant pour différents température et  $Q_v=4.5l/mn$

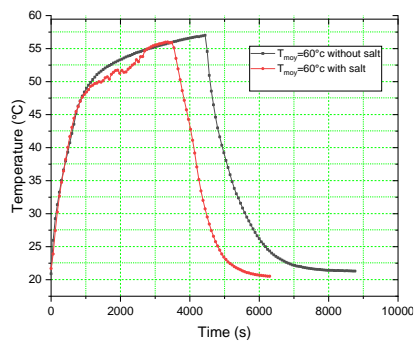
$Q_v=4.5l/mn$	Temps de Charge [s]	Temps de Décharge [s]
THF=[60°C] sans sel	4440	8760
THF=[60°C] avec sel	3420	6240
THF=[70°C] sans sel	3420	8100
THF=[70°C] avec sel	1680	5280
THF=[75°C] sans sel	2160	5400
THF=[75°C] avec sel	1680	5280
Gain [%] à 60°C	23	29
Gain [%] à 70°C	51	35
Gain [%] à 75°C	22	2

On constate que la différence entre les résultats sans et avec sel dosé à 20% est importante pour la phase de décharge tandis que elle est presque négligeable pour la phase de charge :

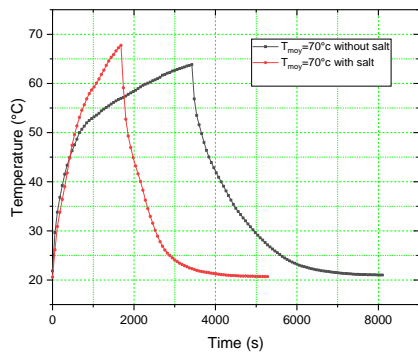
- pour THF =60°C cela est expliqué comme suit : le dosage à 20% de sel est un dosage excessif ou cette quantité de sel ne peut pas être dissoute totalement dans la paraffine est donc une partie a l'état solide reste on excès d' où, d'une part la partie du sel dissoute dans la paraffine contribue à l'amélioration de la conductivité thermique de la paraffine et d'autre part la partie solide resté on excès représente une résistance thermique on plus se qui rend l'effet de l'ajout du sel a ce dosage (20%) inutile.

-Pour THF=70°C, la température du sel on excès augmente et de ce fait la température de la paraffine augmente et la différence entre les deux courbes (sans et avec sel) commence à apparaitre au allons tour d'une température égale à 50°C qui représente le début de la fusion de la paraffine. Au dessus de cette température la paraffine devient liquide et le phénomène de la convection domine le transfert de chaleur et la concentration du sel conduit à l'accélération de la phase de la charge.

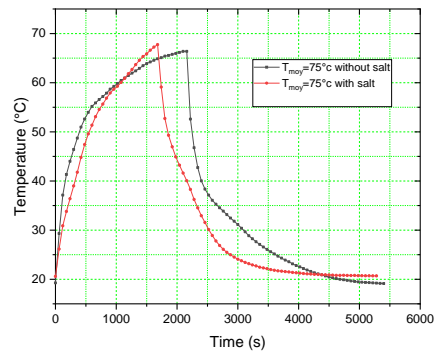
- Pour THF=75°C la température de la paraffine augmente encore et le transfert de chaleur est favorisé entre la peau de la paraffine et l'air ambiant entourant cette paraffine. C'est pour cela le processus de charge est accéléré pour le cas de la paraffine sans sel jusqu'à une température de 60°C. Au delà de cette température, le processus de charge cette fois ci est accéléré pour le cas de la paraffine dosé au sel.



a- THF=60°C



b- THF=70°C



c- THF=75°C

Figure 3.26 : Comparaison pour un ajout de 20% de sel

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

Le but de ce travail été de faire une étude expérimentale pour examiné le comportement des matériaux à changement de phase (MCP) en particulier la paraffine comme moyen de stockage de la chaleur.

Pour ce faire, l'effet de plusieurs paramètres ont été examiné. En premier lieu, on examine la température d'entrée THF et le débit d'eau chaude. Les résultats montrent que le débit d'eau chaude n'as pas une grande influence sur le comportement du MCP, par contre la température d'entrée influe énormément. En effet, un gain maximal en temps de charge et de décharge sont respectivement de 65% et 47% sont constaté pour passage d'une THF=60°C à 75°C.

En deuxième lieu, les résultats montrent que la masse de la paraffine mise en jeux a un effet important sur le comportement de charge et décharge du MCP. En effet, l'augmentation de la masse conduit à accroitre le temps de charge et de décharge se qui explique le stockage d'une énergie importante pour la masse de 500g relative à la masse de 120g.

Concernant l'ajout des sels fondus avec la paraffine, deux dosages ont été étudiés : un dosage à 10% et un deuxième à 120%.

Pour le dosage à 10%, l'ajout du sel augmente la conductivité thermique du mélange paraffine-sel se qui conduit à l'accélération de la phase de la charge on favorisant le transfert de chaleur par conduction puisque la paraffine est toujours dans la phase solide ; et on favorisant le transfert de chaleur par convection dans la phase de décharge puisque la paraffine est toujours dans la phase liquide. Un gain maximal en temps de charge de 37% est enregistré pour THF=70°C et un temps de décharge de 43% est enregistré pour THF=60°C.

Pour le dosage à 20%, On constate que la différence entre les résultats sans et avec sel dosé à 20% est importante pour la phase de décharge tandis qu'elle est presque négligeable pour la phase de charge. Cela est du au fait que le dosage à 20% de sel est un dosage excessif où cette quantité de sel ne peut pas être dissoute totalement dans la paraffine est donc une partie a l'état solide reste on excès : d'une part, la partie du sel dissoute dans la paraffine contribue à l'amélioration de la conductivité thermique de la

## Conclusion générale

---

paraffine et d'autre part, la partie solide resté on excès représente une résistance thermique on plus. Cela rend l'effet de l'ajout du sel à ce dosage (20%) presque inutile.

**Références**

**De**

**Bibliographiques**

## Références de bibliographiques

---

- [1] A.M. Khudair, M.M. Farid, *A review on energy conservation in building « Applications with thermal energy storage by latent heat using Phase Change Materials», Energy Conservation and Management, Vol. 45, 263-275.*
- [2] Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC.*
- [3] Telkes, M. (1975). *Thermal storage for solar heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Charlottesville, Virginia, USA.*
- [4] Telkes & Al (1978) Telkes, M. (1978). *Trombe wall with phase change storage material. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> national passive solar conference. Philadelphia, PA, USA.*
- [5] Zouhir YOUNSI, Annabelle JOULIN, Laurent ZALEWSKI, Stéphane LASSUE, et Daniel ROUSSE « ANALYSE NUMÉRIQUE DE LA FUSION DE MATÉRIAUX À CHANGEMENT DE PHASE DANS UNE ENCEINTE RECTANGULAIRE CHAUFFÉE PAR UNE PAROI LATÉRALE », *Faculté des Sciences Appliquées de l'Université d'Artois, Canada, 2009, Lille.G. Hed et R. Bellander. «Mathematical modeling of PCM air heat exchanger». Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 82–89, (2006).*
- [6] X. Shi, S.A. Memon, W.C. Tang, H.Z. Cui, F. Xing, *Experimental assessment of position of macro encapsulated phase change material in concrete walls on indoor temperatures and humidity levels, Energy and Buildings. 71 (2014) 80-87*

## Références de bibliographiques

---

- [7] *Experimental Investigation of Thermal Performance in a Vehicle Cabin Test Setup With Pcm in the Roof:*  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/197/1/012073/pdf>
- [8] *Suat Canbazog˘lua, Abdulmuttalip S, ahinaslana, Ahmet Ekmekyaparb, Y ˘. Go˘khan Aksoya, Fatih Akarsua « Enhancement of solar thermal energy storage performance using sodium thiosulfate pentahydrate of a conventional solar water-heating system », a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, I no˘nu˘ University, 2004.*
- [9] *K. A. R. Ismail, O.C. Quispe, J. R. Henrõquez« A numerical and experimental study on a parallel plate ice bank». Applied Thermal Engineering, Vol. 19, pp. 163-193, (1999)*
- [10] *G. Hed et R. Bellander. «Mathematical modeling of PCM air heat exchanger». Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 82–89, (2006).*
- [11] *Y. Zhang, A. Faghri «Semi-analytical solution of thermal energy storage system with conjugate laminar forced convection». Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, N° 4, pp. 717724, (1996).*
- [12] *Trp. An «experimental and numerical investigation of heat transfer during technical grade paraffin melting and solidification in a shell-and-tube latent thermal energy storage unit». Solar Energy, Vol. 79, pp. 648–660, (2005).*
- [13] *H. Ait Adine, H. El Qarnia. « Numerical analysis of the thermal behaviour of a shell-and - tube heat storage unit using phase change materials». Applied Mathematical Modelling,*



## Références de bibliographiques

---

*Vol. 33, pp. 2132–2144, (2009).*

- [14] Cho K., S. H. Choi, «*Thermal characteristics of paraffin in a spherical capsule during freezing and melting processes*», *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 43, pp. 3183-3196, 2000.
- [15] J.T. Kouskso, F. Strub, J. CastaingLasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats, «*Second law analysis of latent thermal storage for solar system* », *Laboratoire de Thermique et énergétique et Procédés*, Avenue de l'Université, 2007.
- [16] Abdeldjellil Benmansour, «*Etude numérique du stockage de l'énergie thermique en lit multicouches* », *Laboratoire de Mécanique Appliquée, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran BP 1505 El - M'Naouer Oran, Algérie, Grenoble, 27-31 août 2007.*
- [17] Wei li, yun-haowang, cheng-chengkong «*experimental study on melting solidification and thermal conductivity enhancement of phase change material inside a sphere*» *international communications in heat and mass transfer, china 2015.*
- [18] Antonio Ramos Archibold, José Gonzalez-Aguilar, Muhammad M. Rhman, d. Yogi Goswi, Manuel Romero, Elias K. Stefano's «*the melting process of storage Materials with relatively high phase change temperature in partially filled apherical shells*, *Applied Energy*» 116, 243-252, USA (2014)
- [19] Laura Solomon, Ali F. Elmozughi, Alparslan Oztekin, Sudhakar Netti «*Effect of internal void placement on the heat transfer performance –Encapsulated phase change material for energy storage* » *Lehigh University, Bethlehem, PA 18015,*

## Références de bibliographiques

---

USA,438-447,(2015).

- [20] L. Bourdeau and A. Jaffrin, 'Actual Performance of A Latent Heat Diode Wall', *Proceedings of Izmir International Symposium II on Solar Energy Fundamentals and Applications, Izmir, 1979.*
- [21] L. Bourdeau, A. Jaffrin et A. Moisan, 'Captage et Stockage d'Energie Solaire dans l'Habitat par le Moyen de Mur Diode à Chaleur Latente', *Revue de Physique Appliquée, Vol. 15, N°3, pp. 559 – 568, 1980.*
- [22] L. Bourdeau, 'Utilisation d'un Matériau à Changement de Phase dans un Mur Trombe sans Thermocirculation', *Revue de Physique Appliquée, Vol. 17, pp. 633 – 642, 1982.*
- [23] J.D. Balcomb and R.D. McFarland, 'Passive Testing in Los Alamos', *Los Alamos National Laboratory. Report LA-UR-7B-1178, 1978.*
- [24] J.D. Balcomb, C.E. Kosiewicz, G.S. Lazarus, R.D. McFarland and W.O. Wray, 'Passive solar design handbook', *Los Alamos National Lab. ISBN 0-89553-106-2, 1983.*
- [25] T. Knowles, 'Proportioning Composites for Efficient Thermal Storage Walls', *Solar Energy, Vol. 31, N°3, pp. 319 – 326, 1983.*
- [26] M. Ahmad, 'Nouveaux composants actifs pour la Gestion Énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments', *Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2004.*
- [27] C. Voelker, O. Kornadt and M. Ostry, 'Temperature Reduction Due to the Application of Phase Change Materials', *Energy and Buildings, Vol. 40.*

## Références de bibliographiques

---

- [28] S. Kakaç et W. Li, *Unsteady turbulent forced convection in a parallel-plate channel with timewise variation of inlettemperature*, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 447-456, (1994)
- [29] JHadiouche, et K. Mansouri, *Application of integral transform technique to the transient laminar flow heat transfer in the ducts*. *Int. J. of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 10–22, (2010)
- [30] D. M. Brown, W. Li et S. Kakaç, *Numerical and experimental analysis of unsteady heat transfer with periodic variation of inlet temperature in circular ducts*. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 883-899, (1993)
- [31] S. Kakaç et Y. Yener, *Exact solution of transient forced convection energy equation for timewise variation of inlettemperature*. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 2205-2214, (1973)
- [32] R. M. Cotta et M. N. Özisik, *Laminar forced convection inside ducts with periodic variation of inlettemperature*. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, N° 10, pp. 1495-1501, (1986)
- [33] R. M. Cotta, M. D. Mikhailov et M. N. Özisik, *Transient conjugated forced convection in ducts with periodically varying inlettemperature*. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, N° 10, pp. 2073-2082, (1987)
- [34] S. Kim et M. N. Özisik, *Conjugated laminar forced convection in ducts with periodic variation of inlettemperature*. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 11, N° 4, pp. 311-320, (1990)

## Références de bibliographiques

---

- [35] S. Kakaç, W. Li et R. M. Cotta, *Unsteady laminar forced convection in a duct with periodic variation of inlettemperature.Int. J. Heat Transfer, Vol. 112, pp. 913-920, (1990)*
- [36] R. O. C. Guèdes et R. M. Cotta, *Periodic laminar forced convection within ducts including wall heat conductioneffects.Int. J. Engng. Sci, Vol. 29, N° 5, pp. 535-547, (1991)*
- [37] R. O. C. Guedes and M. N. Özisik, *Hybrid approach for solving unsteady laminar forced convection inside ducts with periodically varying inlettemperature.Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 15, N° 2, 116-121, (1994)*
- [38] J. S. Travelho et W. F. N. Santos, *Solution of transient conjugated forced convection in the thermal entrance region of a ducts with periodic varying inlettemperature.Trans. ASME, J. heat transfer, Vol. 113, pp. 558-562, (1991)*
- [39] K. Mansouri et B. Fourcher, *Réponse à un signal thermique sinusoïdal dans le cas d'un écoulement sur un plan directeur.Int. Comm. Heat and Mass Transfer, Vol. 22, N° 5, pp. 305- 315, (1995)*
- [40] K. Mansouri, *Etude théorique et expérimentale du transfert de chaleur en régime périodique pour un écoulement forcé à plan directeur. Thèse de Doctorat. Science pour l'ingénieur université de Nantes, Nantes, France,(1995)*
- [41] B. Fourcher et K. Mansouri, *An approximate analytical solution to the Graetz problem with periodic inlet temperature.Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 18, pp. 229-235.*

## Références de bibliographiques

---

- [42] B. Fourcher et K. Mansouri, *Theoretical study of periodic turbulent forced convection inside a parallel-platechannel*. *Int. J. Engng. Sci*, Vol. 36, N° 4, pp. 411-420, (1998)
- [43] S. Cheroto, M. D. Mikhailov, S. Kakaç et R. M. Cotta, *Periodic laminar forced convection: solution via symbolic computation and integraltransforms*. *Int. J. Therm. Sci*, Vol. 38, pp. 613-621, (1999)
- [44] Hadiouche et K. Mansouri, *On the solution of periodic internal laminarflow*. *Int. Symposium on Advances in Computational Heat Transfer (ICHMT)*, pp. 248-260, Maroc (2008)
- [45] K. Mansouri, A. Hadiouche et M. Bechiri, *Application of variational formulation to the periodic conjugated laminar forced convection with inducts*. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 18 (2), pp. 91–106,(2011)
- [46] M. ArikL, C. A. Santos et S. Kakaç, *Turbulent forced convection with sinusoidal variation of inlet temperature between twoparallel-plates* *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, N° 8, pp. 1121-1132, (1996)
- [47] G. E. Cossali, *Analytical solution of Graetz problem in pipe flow with periodic inlet temperaturevariation*. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 3396–3401, (2009)
- [48] F. W. Schmidt et J. Szego, *Transient response of a solid sensible heat thermal storage units single fluid*, *J. Heat Transfer*, Vol. 98, pp. 471-477,(1976)
- [49] F. W. Schmidt, R. R. Somers, J. Szego et D. H. Laananen,

## Références de bibliographiques

---

- Design Optimization of a Single Fluid, Solid Sensible Heat Storage Unit. J. Heat Transfer, Vol. 99 (2), pp. 174-179, (1977)*
- [50] *J. Szego et F. W. Schmidt, Transient Behavior of a Solid Sensible Heat Thermal Storage Exchanger. J. Heat Transfer, Vol. 100 (1), pp. 148-154 (1978)*
- [51] *J. P. Bardou, B. Fourcher et B. Cassagne, Stockage périodique par chaleur sensible- aspects fondamentaux liés à la cinétique des transferts. Int. J. Heat Mass, Transfer. Vol. 22, pp. 229-236, (1979)*
- [52] *J.M. Khodadadi, S.F. Hosseinzadeh, Nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCM) with great potential for improved thermal energy storage, Int. Commun. Heat Mass Transfer 34 (2007) 534–543.*
- [53] *Atul Sharma et al, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 2009, pp.318-345.*
- [54] *Valan Arasu et Arun S. Mujumdar, Numerical study on melting of paraffin wax with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a square enclosure. Int. Comm. in Heat and Mass Transfer, Vol. 39, pp. 8–16 (2012)*
- [55] *Bel en Zalba et al, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and Applications, Applied Thermal Engineering, 23, 2003, pp. 251–283.*
- [56] *Souad BABAY et al, REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS, Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Vol. 1 N° 4/2009.*
- [57] *Amina Akrouche, Etude du stockage et déstockage*

## Références de bibliographiques

---

- d'énergie dans un matériau à changement de phase, mémoire du magister, Université M'Hamed BOUGARA – Boumerdes-, 2011, 108.*
- [58] Cheik SECK « *analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat* » *intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois.*
- [59] Mohammed M. Farid et al, *A review on phase change energy storage: materials and applications, Energy Conversion and Management, 45, 2004, pp 1597–1615.*
- [60] Serge Blaise EKOMY ANGO « *Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase* » *l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.*
- [61] Abhat (1983) . *Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. Solar Energy, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332.*
- [62] Sari, A. (2004). *Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid– liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. Energy Conversion and Management 45: 2033-2042.*
- [63] MARIN, J.M., ZALBA, B., CABEZA, L.F., MEHLING, H., 2005. *Improvement of a Thermal Energy Storage Using Plates with Paraffin-Graphite Composite. International Journal of Heat and Mass Transfer 48: 2561-2570.*

## Références de bibliographiques

---

- [64] Zhang et fang 2006
- [65] MEHLING, H., HIEBLER, S., ZIEGLER, F., 2000. *Latent Heat Storage Using a PCM- Graphite Composite Material. Proceedings of TERRASTOCK-2000,8th International Conference on Thermal Energy Storage, 28th August – 1stSeptember, 2000, Stuttgart, Germany, 1: 375-380.*
- [66] X. Py, R. Olives, S. Maurin, *Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 44, pp.27272737, 2001.*
- [67] ÖZTÜRK, H.H., 1997. *The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish)*
- [68] SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R., BUDDHI, D., 2009. *Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materails and Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 318-345.*
- [69] Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC.*
- [70] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, *Solar thermal energy storage in phase change materials, in proc. 1992 ASES Annual Conf, USA, 1992.*
- [71] Lane (1986). Lane, G.A. (1989). *Phase Change Thermal Storage Materials. In: Hand Book of Thermal Design.In:*



## Références de bibliographiques

---

Guyer, C., ed. McGraw Hill Book Co.

- [72] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, A. Athienitis and C. Liu «Energy storage building materials with organic PCM's, 28thIntersociety Energy Conversion Engineering Conf,Georgia, Alta, Vol. 2, pp. 143-148, August 8-13, 1993
- [73] A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [74] Eduard Oró Prim « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », Universitat de Lleida, 2013.
- [75] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Melhing, Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251 – 283, 2003.
- [76] S.A. Omer, S.B. Riffat, Xiaoli Ma, Experimental investigation of a thermoelectric refrigeration system employing a phase change material integrated with thermal diode (thermosyphons), Applied Thermal Engineering, Vol.21, pp.1265-1271, 200
- [77] <https://www.tequipment.com/fr/vdas>
- [78] [https://www.humeau.com/media/blfa\\_files/TC\\_Paraffine-Alimentaire\\_FR\\_190810.pdf](https://www.humeau.com/media/blfa_files/TC_Paraffine-Alimentaire_FR_190810.pdf)