

Faculty of Sciences and Technology  
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2023

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

## *Thème*

ETUDE EXPERIMENTALE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A MATERIAU A  
CHANGEMENT DE PHASE (MCP) AVEC DES TUBES SPIRALES

Présenté par :

❖ GOUAL Omar Elfarouk

❖ CHAIB Said

*Soutenu le 25/06/2023 devant le jury composé de :*

Président	Dr. OULD SAID Belkacem	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. FLITTI Abdelmadjid	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. MEDJAHED Bendida	Université de Mostaganem UMAB

**Année Universitaire : 2022 / 2023**

# SOMMAIRE

## *Sommaire*

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Nomenclatures	vi
Résumé	01
Introduction générale	05
<b>Chapitre 01 :</b>	
1. Étude bibliographique	07
<b>Chapitre 02 :</b>	
2.1 Stockage thermique	13
2.1.1 Stockage par chaleur sensible	13
2.1.2 Stockage par chaleur latente	14
2.1.3 Stockage thermochimique	14
2.2. Le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)	15
2.3.1 Le paraffine	16
2.3.2 La cire d'abeille	17
<b>Chapitre 03 :</b>	
3. Procédure expérimentale	19
3.1 Matériel et accessoire de l'installation	19
3.2 Matériau de tuyauterie	21
3.3 Fabrication de la cage	21
3.4 Remplissage de MCP (paraffine et cire d'abeille)	22
3.5 Placement des capteurs	22
<b>Chapitre 04 :</b>	
4. Résultats et discussion	25
4.1 Protocoles de charge et de décharge	25
4.2 Objectifs	26
4.3 Les hypothèses du travail :	27
4.4 Mode de charge	28
4.5 Mode de décharge	31
<b>Conclusion</b>	
Conclusion	39
Référence bibliographie	40

# ***Remerciement***

*Nous remercions le bon Dieu pour le courage qu'il nous a donné pour surmonter toutes les difficultés durant nos années d'études.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur le **Dr. MEDJAHED Bendida** pour ces conseils et son suivi continu durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury **Dr. OULD SAID Belkacem** et le membre de jury **Dr. FLITTI Abdelmadjid** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, nous adressons nos vives reconnaissances à toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.*

## ***Dédicace***

*Ce travail est dédié à toute ma famille ;  
Surtout à mon père, ma mère, mes frères et aussi mes grands-parents  
paternels et maternels.  
Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui sont proches de moi.*

*GOUAL OMAR ELFAROUK*

## ***Dédicace***

*Ce travail est dédié à toute ma famille ;  
Surtout à mon père, ma mère, mes frères et ma femme et mais enfants  
aussi mes grands-parents paternels et maternels.  
Dédicace aussi à mes amis et à tous les gens qui m'ont aidé*

*CHAIB SAID*

## Liste des figures

## Liste des figures

### Chapitre 02:

<b>Figure 2.1 :</b> Graphe présente le principe de fonctionnement d'un MCP	13
<b>Figure 2.2 :</b> Paraffine utilisée.	16
<b>Figure 2.3 :</b> Cire d'abeille utilisée.	17

### Chapitre 03:

<b>Figure 3.1:</b> Plant d'essai	19
<b>Figure 3.2:</b> Matériel et accessoires de l'installation : a) Deux pompes à eau (chaude et froide), b) Débitmètre, c) Résistance thermique, d) Capteurs de températures, e) Réservoir de l'eau chaude et f) Réservoir de l'eau froide.	20
<b>Figure 3.3 :</b> Soudage des tubes en cuivre.	21
<b>Figure 3.4 :</b> a) Tube spirale, b) Cage en plexiglas.	21
<b>Figure 3.5 :</b> Remplissages de MCP : a) Paraffine et b) Cire d'abeille.	22
<b>Figure 3.6 :</b> Sections d'essai rempli de la paraffine.	22
<b>Figure 3.7 :</b> Section d'essai remplie de la cire d'abeille.	23

### Chapitre 04:

<b>Figure 4.1 :</b> Configuration d'injection possible durant les essais (position verticale injection haut.).	26
<b>Figure 4.2 :</b> Configurations d'injection possibles durant les essais.	27
<b>Figure 4.3 :</b> Profils de température du processus de fusion (Paraffine et la cire d'abeille) pour les débits de fluide caloporteur (a) 50 L/h, (b) 100 L/h, (c) 150 L/h, (d) 200 L/h pour $T_{\max}=60^{\circ}\text{C}$ .	30
<b>Figure 4.4 :</b> Profils de température du processus de fusion (Paraffine et la cire d'abeille) pour les débits de fluide caloporteur (a) 50 L/h, (b) 100 L/h, (c) 150 L/h, (d) 200 L/h pour $T_{\max}=70^{\circ}\text{C}$ .	31

## Liste des figures

- Figure 4.5:** Profils de température du processus de solidification (Paraffine et la cire d'abeille) pour les débits de FLUIDE CALOPORTEUR (a) 50 L/h, (b) 100 L/h, (c) 150 L/h, (d) 200 L/h pour  $T_{\max}=60^{\circ}\text{C}$ . 33
- Figure 4.6:** Profils de température du processus de solidification (Paraffine et la cire d'abeille) pour les débits de l'eau (a) 50 L/h, (b) 100 L/h, (c) 150 L/h, (d) 200 L/h pour  $T_{\max}=70^{\circ}\text{C}$ . 34
- Figure 4.7:** Profils des températures d'entrée/sortie de l'eau et la température moyenne du MCP pendant le processus de charge pour une température d'entrée  $T_{\max}=60^{\circ}\text{C}$  et des débits de (a) 50, (b) 100, (c) 150 et (d) 200 L/h. 36
- Figure 4.8:** Profils des températures d'entrée/sortie de l'eau et la température moyenne du MCP pendant le processus de charge pour une température d'entrée  $T_{\max}=70^{\circ}\text{C}$  et des débits de (a) 50, (b) 100, (c) 150 et (d) 200 L/h. 37
- Figure 4.9:** Comparaison les efficacités thermique en fonction de débit volumique pour différentes températures ( $T_{\max}$ ). 38

Liste des tableaux

**Liste des tableaux**

**Chapitre 02:**

**Tableau 2.1 :** propriétés thermiques de paraffine étudiée. 16

**Tableau 2.2 :** propriétés thermiques de cire d'abeille étudiée. 17

***NOMENCLATURE :***

SYMBOLES	UNITES	DESIGNATION
$Q_v$	[l/h]	Débit volumique
T	[°C]	Température
Q	[W]	Flux de chaleur
S	[m <sup>2</sup> ]	Surface d'échange
D	[m]	Diamètre
L Longueur	[m]	Longueur
A sections de passage	[m <sup>2</sup> ]	sections de passage
a	[m]	Longueur de la cage
b	[m]	Largeur de la cage
l	[m]	Hauteur de la cage
v	[m <sup>3</sup> ]	Volume de MCP
m	[Kg]	Masse de MCP
t	[s]	Temps
$C_p$	[J/Kg °C]	Chaleur Spécifique du fluide
$\lambda$	[W/m °C]	Conductivité thermique
$\rho$	[Kg/m <sup>3</sup> ]	Masse Volumique
$\mu$	[Pa .S]	Viscosité Dynamique du fluide

***NDICE***

e	fluide d'entrée
s	fluide sortie
c	chaude
f	froide
i	interne

ex

externe

moy

moyenne

1, 2, 3,4 et 5

Position du capteur de MCP

### *ABREVIATIONS*

HTF

Fluide caloporteur

LHS

Stockage de chaleur latente

PCM

Matériau à changement de phase

SDHW

Eau chaude sanitaire solaire

## **Etude expérimentale d'un échangeur de chaleur à matériau à changement de phase (MCP) avec des tubes spiralés**

### **Résumé :**

Dans cette étude expérimentale, un système de stockage de chaleur latente utilisant une technique d'amélioration du transfert de chaleur a été construit et testé. La nouvelle idée sur laquelle nous travaillons, et au lieu de mettre un ventilateur électrique pour refroidir le liquide chaud à l'intérieur d'un échangeur de chaleur avec des ailettes attachées aux tubes en spirale, nous le remplaçons par une boîte latérale à l'intérieur d'un échangeur de chaleur immergé dans un matériau à changement de phase sans ailettes, sans ventilateur électrique, et ça c'est pour le refroidissement. La paraffine est considérée comme un matériau organique de stockage de chaleur latente et la cire d'abeille sont considérés comme un matériau naturel de stockage de chaleur latente. Une nouvelle géométrie rectangulaire de type coque et tube est introduite en tant qu'unité de stockage thermique, dans laquelle une bobine en spirale en cuivre transportant un fluide caloporteur chaud est noyée dans la paraffine et la cire d'abeille remplies dans une coque rectangulaire. L'étude des performances thermiques de la paraffine et de la cire d'abeille est réalisée dans une série d'expériences de charge et de décharge avec de l'eau comme fluide caloporteur. Les profils de température le long de la direction axiale et verticale de la bobine hélicoïdale ont été enregistrés en mesurant cinq températures pour comprendre le mode de transfert de chaleur dans la paraffine et la cire d'abeille. Effet des débits (50 l/h, 100 l/h, 150 l/h, 200l/h) et des températures d'entrée (60 °C, 70 °C) du fluide caloporteur sur le temps de charge et l'efficacité du stockage thermique de la paraffine et la cire d'abeille sont analysées.

**Mots clés :** Stockage d'énergie thermique, échangeur de chaleur, tubes spiralés, MCP, Température.

## **Experimental study of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral tubes**

### **Abstract :**

In this experimental study, a latent heat storage system using a heat transfer enhancement technique was constructed and tested. The new idea we are working on, and instead of putting an electric fan to cool the hot liquid inside a heat exchanger with fins attached to the spiral tubes, we replace it with a side box inside interior has a heat exchanger immersed in phase change material without fins, without an electric fan, and that's for cooling. Paraffin is considered an organic latent heat storage material and beeswax are considered a natural latent heat storage material. A new rectangular shell-and-tube type geometry is introduced as a thermal storage unit, in which a copper spiral coil carrying hot heat transfer fluid is embedded in paraffin and beeswax filled in a rectangular shell. The study of the thermal performance of paraffin and beeswax is carried out in a series of charging and discharging experiments with water as the heat transfer fluid. Temperature profiles along the axial and vertical direction of the coil coil were recorded by measuring five temperatures to understand the mode of heat transfer in paraffin and beeswax. Effect of flow rates (50 l/h, 100 l/h, 150 l/h, 200 l/h) and inlet temperatures (60°C, 70°C) of the heat transfer fluid on the charging time and the thermal storage efficiency of paraffin and beeswax are analyzed.

**Keywords:** Thermal energy storage, heat exchanger, spiral tubes, PCM, temperature.

## دراسة تجريبية لمبادل حراري لمواد متغيرة الطور (PCM) بأنابيب لولبية

### ملخص:

في هذه الدراسة التجريبية ، تم إنشاء واختبار نظام تخزين حراري كامن باستخدام تقنية تعزيز نقل الحرارة. الفكرة الجديدة التي نعمل عليها ، وبدلاً من وضع مروحة كهربائية لتبريد السائل الساخن داخل مبادل حراري بزعانف متصلة بالأنابيب الحلزونية ، نقوم باستبدالها بصندوق جانبي بداخله مبادل حراري مغمور بمادة تغيير الطور بدون زعانف وبدون مروحة كهربائية وهذا للتبريد. يعتبر البارافين مادة عضوية كامنة لتخزين الحرارة ويعتبر شمع العسل مادة تخزين حرارة كامنة طبيعية. تم إدخال هندسة جديدة من نوع القشرة والأنبوب المستطيلة كوحدة تخزين حرارية ، حيث يتم تضمين ملف لولبي نحاسي يحمل سائل نقل الحرارة الساخن في البارافين وشمع العسل في غلاف مستطيل. يتم إجراء دراسة الأداء الحراري للبارافين وشمع العسل في سلسلة من تجارب الشحن والتفريغ باستخدام الماء كسائل نقل الحرارة. تم تسجيل ملامح درجة الحرارة على طول الاتجاه المحوري والرأسي للملف عن طريق قياس خمس درجات حرارة لفهم طريقة انتقال الحرارة في البارافين وشمع العسل. تأثير معدلات التدفق (50 لتر / ساعة ، 100 لتر / ساعة ، 150 لتر / ساعة ، 200 لتر / ساعة) ودرجات حرارة المدخل (60 درجة مئوية ، 70 درجة مئوية) لسائل نقل الحرارة في وقت الشحن ويتم تحليل كفاءة التخزين الحراري للبارافين وشمع العسل.

**الكلمات المفتاحية:** تخزين الطاقة الحرارية ، المبادل الحراري ، الأنابيب الحلزونية ، PCM ، درجة الحرارة.

## **Introduction générale**

## **Introduction générale**

## Introduction générale

### Introduction générale

Le stockage d'énergie est un enjeu majeur dans le domaine industriel, notamment avec la croissance continue des besoins énergétiques et la recherche de solutions durables. Parmi les nombreuses technologies de stockage d'énergie disponibles, les matériaux à changement de phase (MCP) se distinguent par leur capacité à stocker et libérer de grandes quantités d'énergie lorsqu'ils subissent une transition de phase, telle que la fusion ou la solidification.

Les MCP sont des matériaux qui peuvent stocker et libérer de l'énergie sous forme de chaleur latente, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour effectuer un changement d'état, sans changer de température. Ils offrent ainsi une solution efficace pour stocker de l'énergie thermique, ce qui est particulièrement utile dans le domaine industriel où de grandes quantités d'énergie sont souvent nécessaires pour alimenter les processus de production.

Les MCP sont utilisés dans divers domaines industriels, notamment dans les échangeurs de chaleur. Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs qui permettent de transférer la chaleur d'un fluide à un autre, afin d'optimiser l'efficacité énergétique des systèmes de production. Les MCP peuvent être utilisés dans les échangeurs de chaleur pour améliorer leur performance en stockant et libérant de l'énergie thermique de manière contrôlée.

L'utilisation de MCP dans les échangeurs de chaleur présente plusieurs avantages. Tout d'abord, les MCP ont une capacité de stockage d'énergie élevée par rapport aux matériaux traditionnels utilisés dans les échangeurs de chaleur, ce qui permet de réduire la taille et le poids des équipements. De plus, les MCP permettent de lisser les fluctuations de température, ce qui contribue à une meilleure régulation thermique et à une plus grande efficacité énergétique.

Dans le domaine industriel, les applications des MCP dans les échangeurs de chaleur sont nombreuses. Par exemple, ils peuvent être utilisés dans les systèmes de climatisation pour stocker l'énergie thermique pendant les périodes de faible demande et la libérer lorsque la demande est élevée. De même, dans les processus de production nécessitant des températures élevées, les MCP peuvent être utilisés pour stocker l'énergie thermique pendant les périodes de basse demande et la restituer lorsque cela est nécessaire.

En conclusion, le stockage d'énergie et l'utilisation de matériaux à changement de phase dans les échangeurs de chaleur offrent des solutions innovantes et efficaces pour répondre aux

## **Introduction générale**

besoins énergétiques croissants de l'industrie. Ces technologies permettent d'améliorer l'efficacité énergétique, de réduire les coûts et de promouvoir le développement durable.

Le présent travail porte sur une étude expérimentale d'un échangeur de chaleur à matériau à changement de phase (MCP) avec des tubes spiralés. L'utilisation de Matériaux à changement de Phase (MCP) permet d'atteindre une densité énergétique élevée et de restituer la chaleur à température constante. Cependant, leur faible conductivité thermique impose d'améliorer les transferts thermiques, notamment par l'utilisation d'échangeurs à surface augmentée.

Le contexte et les résultats de cette étude sont présentés ici en détails. Le premier chapitre a été réservé à la présentation de l'étude bibliographique. Une généralité sur le stockage d'énergie et les matériaux à changement de phase (MCP) est présentée dans le deuxième chapitre. Une procédure expérimentale détaillée sur la réalisation d'un banc d'essai est présentée dans le troisième chapitre. Le quatrième chapitre a été réservé sur la présentation des résultats expérimentale et les discussions. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce document.

**Chapitre 01**  
**Etude bibliographique**

## Chapitre 01 : Etude bibliographique

### Etude bibliographique :

Le stockage de l'énergie thermique est un élément clé de la récolte de l'énergie solaire en raison de la nature intermittente de cette source. Les matériaux à changement de phase (MCP) possèdent une grande capacité d'accumulation d'énergie dans leur température de fusion grâce à la chaleur latente. Ces matériaux sont utilisés dans des applications où il est nécessaire de stocker de l'énergie en raison du déphasage temporaire entre l'offre et la demande d'énergie thermique. Ainsi, les applications possibles sont les systèmes solaires ainsi que la récupération de la chaleur résiduelle pour son utilisation ultérieure dans d'autres processus.

Une grande partie des publications se concentre sur l'étude de l'implantation de MCP en cascade dans les stockages latents. Ce chapitre présentera une synthèse de quelques travaux de recherche sur ce domaine.

Robynne E. Murray et al (2014), ont effectué une recherche qui permet d'étudier les processus de transfert de chaleur et le comportement de changement de phase d'un MCP pendant la charge et la décharge consécutives d'un LHESS. Cela permet de mieux comprendre les processus de fusion et de solidification afin d'optimiser la conception des futurs LHESS [1].

Xiangjie Chen et al (2014), ont fait une étude expérimentale sur les caractéristiques de fonctionnement du système de refroidissement par éjecteur à accumulation de froid avec un tube à ailettes à l'intérieur d'un réservoir cylindrique de MCP. Le réservoir de stockage de PCM a été couplé à l'évaporateur pour stocker la capacité de refroidissement excédentaire du système de refroidissement à éjecteur et fournir un effet de refroidissement lorsque l'éjecteur ne fonctionne pas [2].

Chang Liu et al (2014), ont réalisé une étude expérimentale du transfert de chaleur par changement de phase à l'intérieur d'un système cylindrique de stockage de l'énergie thermique latente (LHESS), conçu avec un tuyau en cuivre à ailettes centrales sur toute la longueur du conteneur cylindrique, pendant les opérations de chargement et de déchargement. Des ailettes longitudinales ont été ajoutées au tuyau de cuivre pour améliorer les taux de transfert de chaleur globaux [3].

Meng et al (2017), ont construit une unité de stockage de l'énergie thermique latente (LTES) en tube dans un réservoir utilisant la paraffine comme MCP, qui peut être utilisée dans de nombreuses applications. Afin d'améliorer les performances thermiques de l'unité LTES, le PCM composite est fabriqué en incorporant de la mousse de cuivre dans de la paraffine pure.

## Chapitre 01 : Etude bibliographique

Les performances de l'unité LTES avec le MCP composite pendant les processus de chargement et de déchargement de la chaleur sont étudiées expérimentalement [4].

Youssef et al (2017), ont construit un banc d'essai d'un nouveau système de pompe à chaleur solaire indirecte (IDXSAHP) qui se compose de trois boucles opérationnelles : solaire thermique, pompe à chaleur solaire assistée et profil de charge. Un réservoir d'échangeur de chaleur PCM a été conçu et installé dans la boucle solaire thermique du système pour stocker l'énergie solaire, le cas échéant, et libérer la chaleur lorsque la pompe à chaleur en a besoin. En outre, un échangeur de chaleur pour le refroidissement de l'air a également été installé dans la boucle solaire thermique afin d'absorber la chaleur de l'air ambiant pour la pompe à chaleur [5].

Youssef et al (2018), ont prouvé que L'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) pour le stockage de la chaleur latente a un grand potentiel pour améliorer les performances d'un système solaire thermique. Malgré cela, l'utilisation des MCP dans ce domaine est assez limitée en raison de la faible conductivité thermique des MCP disponibles. Par conséquent, l'amélioration du transfert de chaleur est l'une des stratégies essentielles pour surmonter cet obstacle [6].

Mohamed El Habib Amagour et al (2018), ont présenté un système de stockage de chaleur latente utilisant une technique d'amélioration du transfert de chaleur a été construit et testé. Le potentiel d'utilisation d'un matériau à changement de phase naturel d'origine marocaine pour le stockage de l'énergie a été étudié par analyse expérimentale. La surface de transfert de chaleur améliorée de l'échangeur de chaleur à tubes à ailettes compacts présente des complications géométriques [7].

Debanjan Mukherjee (2018), a passé en revue certaines des propriétés thermo physiques des matériaux à changement de phase et leurs applications pour le stockage thermique. Des cycles thermiques allant jusqu'à 300 sont réalisés pour étudier la réversibilité de la fusion et de la solidification ainsi que la dégradation dans le temps. Les cires de paraffine présentent un changement de phase réversible sans dégradation des propriétés thermo physiques dans le temps [8].

Moe Kabbara et al (2018), ont fait un système de stockage de chaleur latente (LHESS) avec de l'acide dodécanoïque comme matériau de transition de phase et un échangeur de chaleur à serpentin dans le réservoir a été caractérisé expérimentalement pour déterminer les effets de différents paramètres opérationnels sur le transfert de chaleur dans le système [9].

## Chapitre 01 : Etude bibliographique

Rami M. Saeed et al (2019), ont présenté une étude expérimentale d'un réservoir de stockage d'énergie thermique à des fins de transfert de charge. Le nouveau réservoir de stockage de chaleur est un échangeur de chaleur à plaques avec de l'eau comme fluide de travail et un matériau à changement de phase (MCP) comme moyen de stockage de l'énergie [10].

Gang Shen et al (2019), ont réalisé Un système de stockage d'énergie thermique multitubulaire vertical utilisant le matériau à changement de phase (MCP) commercial RT60 a fait l'objet d'une étude expérimentale. La sélection du PCM et les configurations expérimentales cherchent à être adaptées pour servir d'application de stockage d'énergie thermique domestique pour l'application de l'énergie solaire [11].

Mohamed Fadl et al (2019), ont examiné expérimentalement l'effet de différentes valeurs de l'intensité du flux thermique de la paroi sur la fusion du matériau à changement de phase (MCP) RT44HC dans une cellule d'essai rectangulaire [12].

Valeria Palomba et al (2019), ont présenté la caractérisation expérimentale d'un prototype de stockage de chaleur latente fonctionnant dans une plage de 70 à 90 °C et caractérisé par une configuration innovante. Le stockage consiste en un matériau à changement de phase (MCP), à savoir une paraffine commerciale, intégré dans un échangeur de chaleur à plaques asymétriques [13].

M. Rahimi et al (2020), ont mené une enquête expérimentale sur un système de stockage d'énergie thermique à chaleur latente (LHTES). Le système proposé utilise la cire de paraffine RT35 comme matériau à changement de phase (MCP) et l'eau comme fluide caloporteur (FCT) [14].

Anish et al (2020), ont comparé des performances thermiques de deux MCP à base d'alcools de sucre à température moyenne, l'érythritol ( $C_4H_{10}O_4$ ) et le xylitol ( $C_5H_{12}O_5$ ), dans une unité de serpentin vertical à double spirale est présentée [15].

Saulius Pakalka et al (2020), ont fait une étude sur les échangeurs de chaleur qui sont conçus pour des processus industriels avec des taux élevés de récupération et de stockage de la chaleur où la vapeur est utilisée et où le rejet de cette vapeur dans l'atmosphère est cyclique et dure peu de temps. Les matériaux à changement de phase (MCP), qui permettent de stocker une grande quantité d'énergie dans des volumes relativement faibles, pourraient être utilisés dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique [16].

## Chapitre 01 : Etude bibliographique

Egea et al (2020), ont effectué L'intégration d'un réseau de deux capteurs solaires à tubes sous vide avec un système de stockage de l'énergie thermique latente a été réalisée, afin d'étudier les caractéristiques du transfert de chaleur pendant la fonte solaire [17].

Yanhua Diao et al (2021), ont réalisé une étude qui propose une nouvelle unité de stockage de la chaleur latente basée sur un tube plat multicanal et de la mousse de cuivre. Avec l'eau comme fluide caloporteur, la mousse de cuivre est utilisée pour améliorer la performance thermique du matériau à changement de phase (paraffine) [18].

Mohamed Fadl et al (2021), ont évalué les performances thermiques d'un prototype compact de système de stockage d'énergie thermique latente (LHTESS) pendant les étapes de charge/décharge. Le LHTESS se compose d'un échangeur de chaleur multitubulaire à coquille et à orientation horizontale et d'une cire de paraffine RT44HC disponible dans le commerce, dont la température de changement de phase se situe entre 41°C et 43°C en tant que milieu de stockage de l'énergie. La campagne d'essais a permis d'évaluer l'influence de plusieurs conditions de fonctionnement, notamment le débit du fluide caloporteur (HTF) et la température d'entrée, sur la puissance d'entrée et de sortie du LHTESS, le temps de fusion et de solidification et l'énergie stockée et libérée [19].

GopiKannan et al (2021), ont fait une étude expérimentale se concentre sur le refroidissement des modules électroniques en utilisant un échangeur de chaleur à matériau à changement de phase avec différents fluides thermiques tels que le n-hexane, le benzène et l'eau DI respectivement. Elle évalue les performances thermiques des fluides thermiques utilisés et la puissance thermique stockée par le MCP dans différentes conditions de chauffage. Les résultats mettent en évidence l'efficacité du n-hexane en termes de transfert de chaleur et de stockage d'énergie thermique, ainsi que les caractéristiques de solidification du MCP sous l'influence de ce fluide [20].

Dans cette mémoire, un système de stockage de chaleur latente utilisant une technique d'amélioration du transfert de chaleur a été construite et testé. Des tests de stockage et de récupération ont été effectués pour différents débits de FTC. Initialement, le bain-marie était rempli d'eau, toutes les vannes étaient ensuite fermées. À l'aide du réchauffeur électrique thermostatique, l'eau a été préchauffée dans le bain-marie à une température de  $T_{in} = 60\text{ °C}$  et  $70\text{ °C}$ , en considérant que le point de fusion du MCP utilisé est compris entre  $60\text{ °C}$  et  $70\text{ °C}$ .

## **Chapitre 02**

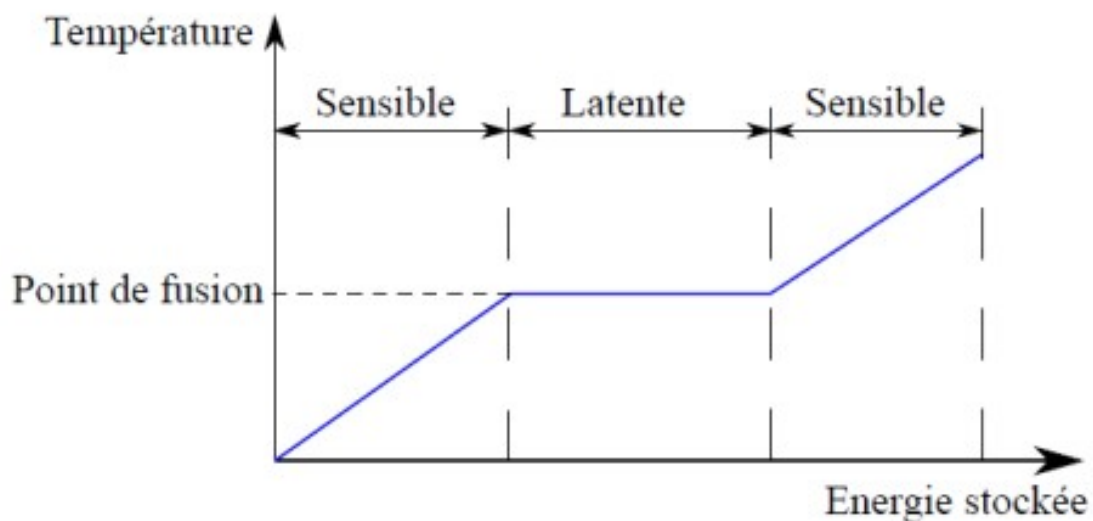
### **Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)**

### 2.1 Stockage thermique

Le stockage d'énergie dans un échangeur de chaleur à l'aide de matériaux à changement de phase (MCP) est une méthode couramment utilisée pour stocker et libérer de l'énergie thermique. Les MCP sont des matériaux qui peuvent absorber ou libérer une grande quantité de chaleur lorsqu'ils passent d'un état solide à un état liquide (changement de phase) et vice versa. Cette propriété leur permet de stocker de l'énergie thermique de manière efficace [21].

Il existe trois catégories de stockage thermique distinctes :

- Stockage par chaleur sensible.
- Stockage par chaleur latente.
- Stockage thermochimique réalisé grâce à la chaleur dégagée lors d'une réaction chimique.



**Figure 2.1** : Graphe présente le principe de fonctionnement d'un MCP [22]

#### 2.1.1 Stockage par chaleur sensible

Le stockage sensible à la chaleur repose sur la variation de l'enthalpie causée par un changement de température d'un matériau inerte à l'état solide, liquide ou gazeux. La capacité calorifique massique ( $C_p$ ) est la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer un matériau (un

## Chapitre 02 Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

corps) de masse  $m$  à pression constante de la température ( $T_1$ ) à la température ( $T_2$ ) et est donnée par la relation suivante :

$$Q_{sensible} = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} mC_p(T)dt \quad (2.1)$$

Si la capacité calorifique massique du matériau est indépendante de la température sur l'intervalle ( $T_1$   $T_2$ ), ou la variation est négligeable sur cet intervalle, l'équation 1 devient :

$$Q_{sensible} = mC_p(T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

La capacité calorifique du corps et l'écart entre sa température initiale et finale déterminent alors la quantité d'énergie stockée. La capacité calorifique est le premier critère de sélection d'un matériau pour le stockage de chaleur sensible. D'autres facteurs tels que la marge de température de l'application, le volume et la masse nécessaire du matériau influencent également le choix d'un matériau pour une application précise [21].

### 2.1.2 Stockage par chaleur latente

L'énergie est stockée sous forme d'un changement d'état physique (solide-liquide) dans le cas d'un stockage par chaleur latente. En effet, une certaine quantité d'énergie est absorbée lorsqu'un matériau change de phase à une température appelée température de fusion ( $T_f$ ) ou un intervalle de température. Le processus inverse libère de l'énergie et le matériau revient à son état physique d'origine. La chaleur latente de fusion ( $L_f$ ) et la chaleur latente de solidification ( $L_s$ ) sont les termes utilisés pour décrire l'énergie absorbée et déstockée.

La chaleur latente est généralement beaucoup plus élevée que la capacité calorifique, ce qui permet de stocker plus de chaleur dans un volume réduit par rapport à un stockage thermique par chaleur sensible. Ce type de stockage diffère du stockage sensible [21].

### 2.1.3 Stockage thermochimique

L'utilisation d'une réaction endothermique réversible est la base du stockage thermochimique. Les deux critères caractérisent les procédés de stockage thermochimique : le processus est-il ouvert ou fermé, et le réacteur est-il intégré ou séparé du système de stockage. En comparaison aux deux autres types de stockage mentionnés précédemment, ce type de stockage est beaucoup plus complexe. Pendant le stockage, les produits doivent être séparés et

## Chapitre 02 Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

pendant le déstockage, les réactions doivent être mises en contact. L'énergie peut être stockée à la température ambiante parce qu'elle est stockée par réaction chimique [21].

### 2.2. Le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Le choix des matériaux à changement de phase pour une utilisation dans des échangeurs de chaleur dépend de plusieurs facteurs. Voici quelques considérations importantes lors de la sélection de ces matériaux :

1. **Température de transition :** Les matériaux à changement de phase (MCP) sont conçus pour absorber et libérer de grandes quantités d'énergie thermique lorsqu'ils passent d'une phase solide à une phase liquide (et vice versa) à une température spécifique. Il est essentiel de choisir un MCP dont la température de transition correspond à la plage de température dans laquelle l'échangeur de chaleur fonctionnera.
2. **Capacité thermique :** La capacité d'un MCP à stocker et à libérer de l'énergie thermique est un aspect crucial. Il est préférable de choisir un matériau ayant une capacité thermique élevée pour une efficacité maximale de l'échangeur de chaleur.
3. **Stabilité thermique :** Les MCP doivent être stables à des températures élevées et ne pas se dégrader ou se décomposer facilement. Assurez-vous que le matériau choisi est capable de résister aux températures de fonctionnement prévues sans altérer ses propriétés.
4. **Conductivité thermique :** Une bonne conductivité thermique est importante pour un transfert de chaleur efficace. Recherchez des MCP ayant une conductivité thermique élevée pour maximiser l'efficacité de l'échangeur de chaleur.
5. **Cycle de vie et durabilité :** Assurez-vous que le matériau choisi a une durée de vie suffisamment longue pour les besoins de votre application. Il doit également être compatible avec les autres matériaux de l'échangeur de chaleur pour éviter toute réaction indésirable ou corrosion.
6. **Disponibilité et coût :** Vérifiez la disponibilité du matériau sur le marché et évaluez son coût pour s'assurer qu'il est économiquement viable pour votre projet.

## Chapitre 02 Stockage thermique et le choix de Matériaux à Changement de Phase (MCP)

La recherche vise à étudier le comportement thermique de deux matériaux à changement de phase MCP (paraffine et cire d'abeille) lors de la fusion. Le MCP est contenu entre la cage en plexiglas et le tube spirale.

### 2.3.1 Le paraffine :

La paraffine est un hydrocarbure saturé, solide, blanc et inodore, produit à partir du pétrole brut par distillation sous vide. Elle est utilisée dans diverses industries, telles que la cosmétique, la pharmacie, l'alimentation et la production de bougies, en raison de ses propriétés chimiques stables et non réactives. Elle peut également servir de combustible et de matériau d'étanchéité [ 23].

**Tableau 2.1** : propriétés thermiques de paraffine étudiée [23].

Température de fusion (°C)	$L_h$ (kJ/kg)	$C_p$ (KJ/Kg.°C)	$\lambda$ (W/m.°C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
45-51	189	2	0.2	744



**Figure 2.2** : Paraffine utilisée.

### 2.3.2 La cire d'abeille :

La cire d'abeille est une substance solide et naturelle produite par les abeilles à miel pour construire les rayons des ruches et stocker le miel et le pollen. Elle est couramment utilisée dans les produits cosmétiques, les bougies, les produits de soins pour les meubles et dans l'industrie alimentaire pour sa propriété hydratante, protectrice et antiseptique. La cire d'abeille est une alternative écologique aux produits chimiques de synthèse, mais sa rareté et sa demande croissante peuvent la rendre coûteuse et difficile à trouver [24].

**Tableau 2.2** : propriétés thermiques de cire d'abeille étudiée [24].

Température de fusion (°C)	$L_h$ (kJ/kg)	$C_p$ (KJ/Kg.°C)	$\lambda$ (W/m.°C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
62.95	242.8191	0.476	0.41	970



**Figure 2.3** : Cire d'abeille utilisée.

**Chapitre 3:  
Procédure expérimentale**

## Chapitre 3 : Procédure expérimentale

### 3. Procédure expérimentale

Ce chapitre traite de la mise en place d'un banc d'essai expérimental dédié à l'étude de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) dans un tube spiral en cuivre. Les différentes expériences ont été menées au sein du laboratoire de génie mécanique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université de Mostaganem.

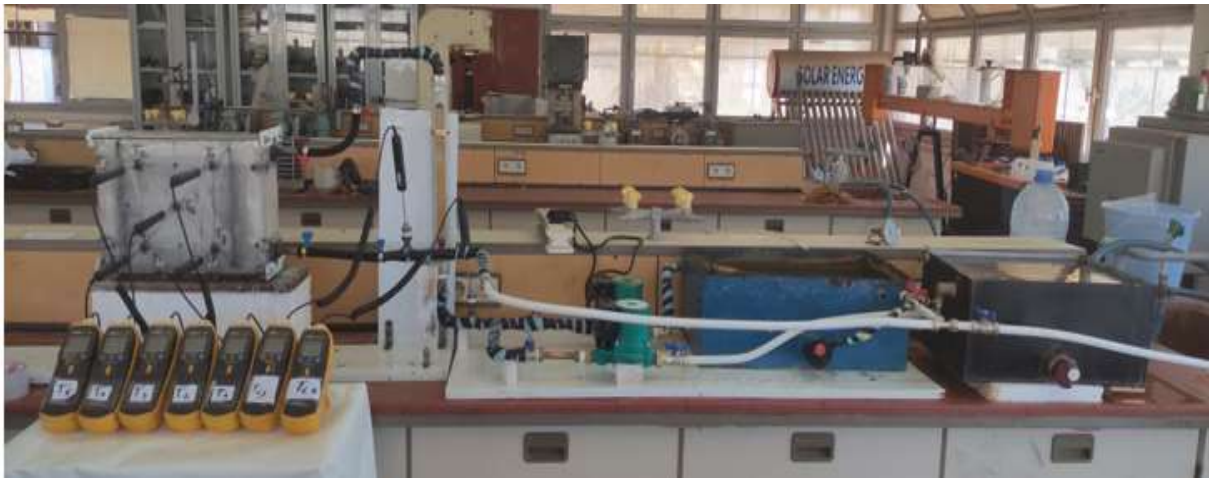


Figure 3.1: Plant d'essai

#### 3.1 Matériel et accessoire de l'installation :

- Deux pompes à eau : l'une assure la circulation de l'eau chaude et l'autre assure de l'eau froide.
- Cinq capteurs de température : mesurer la température au niveau de MCP.
- Débitmètre : mesurer le débit de l'eau circulant au sein de circuits de la tuyauterie.
- Résistance thermique : chauffé l'eau.
- Deux capteurs de température : contrôler la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la section d'essais.
- Deux réservoirs : l'un pour l'eau chaude et l'autre pour l'eau froide.

### Chapitre 3 : Procédure expérimentale



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figure 3.2:** Matériel et accessoires de l'installation : a) Deux pompes à eau (chaude et froide), b) Débitmètre, c) Résistance thermique, d) Capteurs de températures, e) Réservoir de l'eau chaude et f) Réservoir de l'eau froide.

## Chapitre 3 : Procédure expérimentale

### 3.2 Matériau de tuyauterie :

**Le cuivre** : en raison de ses caractéristiques cruciales de conductivité thermique, de sa facilité d'utilisation et de sa résistance mécanique élevée, le cuivre est un élément très employé dans ce type d'appareils. Il est important de souligner que le type de fluide nécessaire à la thermorégulation est l'une des variables ayant le plus d'influence sur les échangeurs de chaleur.



Figure 3.3 Soudage des tubes en cuivre.

### 3.3 Fabrication de la cage :

Nous avons construit une cage en plexiglas de 23,5 cm de hauteur, 31 cm de longueur et 6,3 cm de largeur avec 1 cm d'épaisseur, puis nous y avons mis le tube spiral en cuivre de 500 cm de longueur (diamètre extérieur 9,5 mm et diamètre intérieur 8,5 mm).



(a)



(b)

Figure 3.4 : a) Tube spirale, b) Cage en plexiglas.

## Chapitre 3 : Procédure expérimentale

### 3.4 Remplissage de MCP (paraffine et cire d'abeille) :

Nous avons brisé le MCP en morceaux et l'avons mis dans plat que peut résister à la chaleur, puis nous avons versé le MCP dans la cage en plexiglas après l'avoir fondue comme indiqué ci-dessous.



Figure 3.5 : Remplissages de MCP : a) Paraffine, b) Cire d'abeille.

### 3.5 Placement des capteurs :

Nous avons fait cinq trous dans la cage en plexiglas transparent, puis nous avons inséré la tête du capteur de 3 cm jusqu'à ce qu'elle soit égale aux autres.

a) **Premier cas** : nous avons fait l'étude de la section d'essai remplie de la paraffine.



Figure 3.6 : Sections d'essai rempli de la paraffine.

### Chapitre 3 : Procédure expérimentale

b) **Deuxième cas** : nous avons fait l'étude de la section d'essai remplie de la cire d'abeille.



**Figure 3.7** : Section d'essai remplie de la cire d'abeille.

## Conclusion générale

### Conclusion générale :

Ce travail présente une étude expérimentale du transfert de chaleur à changement de phase à l'intérieur d'un système de stockage de chaleur latente à tube spiralé. La configuration compacte de l'échangeur de chaleur a été choisie en raison de la zone de transfert de chaleur externe améliorée. Une installation est construite pour effectuer des tests de charge et de décharge de chaleur pour différents débits d'eau avec des températures d'entrée de 60 et 70 ° C pour la fusion et des tests à température ambiante pour la solidification.

Des conclusions spécifiques ont été tirées et peuvent être résumées comme suit :

- (1) La paraffine et la cire d'abeille ont la capacité de stocker et de transférer de l'énergie thermique à l'incubateur pour nourrissons.
- (2) La performance de rétention de chaleur de la cire d'abeille est meilleure que celle de la paraffine.
- (3) Pour les étages de récupération de chaleur, le fort débit réduit la température maximale de sortie atteinte et le temps de maintien de la température au-dessus de 45°C. Ce sont des facteurs importants à prendre en compte pour la production.
- (4) Le débit élevé accélère le processus de changement de phase et réduit l'efficacité moyenne du système. L'efficacité du stockage de la chaleur latente est meilleure lors de la solidification que lors de la fusion.

Dans les travaux futurs, un modèle numérique ou une simulation numérique utilisant le logiciel ANSYS sera développé et validé par les résultats des tests. Cela permettra d'étudier l'influence de la configuration et de la taille du système sur l'efficacité des systèmes de stockage de chaleur latente. L'optimisation de la conception du dispositif de stockage sera faite pour obtenir des performances améliorées.

## Références bibliographiques

### Références bibliographiques :

- [1] Robynne et al, « Experimental study of the phase change and energy characteristics inside a cylindrical latent heat energy storage system », *Renewable Energy*; (2014) : 62, p 571-581.
- [2] Xiangjie Chen, et al, « Experimental investigation on PCM cold storage integrated with ejector cooling system », *Applied Thermal Engineering* ; (2014) : 63,p 419-427.
- [3] Chang Liu, et al, « Experimental study of the phase change heat transfer inside a horizontal cylindrical latent heat energy storage system », *International Journal of Thermal Sciences* ; (2014) : 82, p 100-110.
- [4] Meng, P. Zhang, et al, « Experimental and numerical investigation of a tube-in-tank latent thermal energy storage unit using composite PCM », *Applied Energy* ; (2017) : 190, p 524–539.
- [5] Youssef, Y.T. Ge, S.A. Tassou, « Effects of latent heat storage and controls on stability and performance of a solar assisted heat pump system for domestic hot water production », *Solar Energy* ; (2017) : 150,p 394–407.
- [6] Youssef, Y.T. Ge, et al, « CFD modeling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes », *Energy Conversion and Management* ; (2018) : 157,p 498–510.
- [7] Mohamed El Habib Amagour et al, « Experimental investigation and comparative performance analysis of a compact finned-tube heat exchanger uniformly filled with a phase change material for thermal energy storage », *Energy Conversion and Management*; (2018) : 165, p 137–151.
- [8] Debanjan Mukherjee, « A Review Study on the Thermo Physical Properties and Storage Applications of Phase Change Materials », *WSN* ; (2018) : 98, p 185-198.
- [9] Moe Kabbara, et al, « A parametric experimental investigation of the heat transfer in a coil-in-tank latent heat energy storage system », *International Journal of Thermal Sciences* ; (2018) : 130, p 395–405.
- [10] Rami M. Saeed, et al, « Plate type heat exchanger for thermal energy storage and load shifting using phase change material », *Energy Conversion and Management* ; (2019) : 181, p 120–132.

## Références bibliographiques

- [11] Gang Shen, et al, « Experimental investigation of heat transfer characteristics in a vertical multi-tube latent heat thermal energy storage system », *Energy Procedia* ; (2019) : 130,p 332-339.
- [12] Mohamed Fadl, et al, « An experimental investigations of the melting of RT44HC inside a horizontal rectangular test cell subject to uniform wall heat flux », *International Journal of Heat and Mass Transfer* ; (2019) : 140, p 731–742.
- [13] Valeria Palomba, et al, « Thermal performance of a latent thermal energy storage for exploitation of renewable and waste heat: An experimental investigation based on an asymmetric plate heat exchanger », *Energy Conversion and management*; 200 (2019) : 200, p 112121.
- [14] Rahimia, S. Saedi Ardahaie, et al, « Energy and exergy analysis of an experimentally examined latent heat thermal energy storage system », *Renewable Energy*; (2020): 147, p 1845-1860.
- [15] Anish, V. Mariappan, et al, « Performance comparison of the thermal behavior of xylitol and erythritol in a double spiral coil latent heat storage system », *Thermal Science and Engineering Progress* ; (2020) : 15, p 100441.
- [16] Saulius Pakalka, et al, « Experimental comparison of the operation of PCM-based copper heat exchangers with different configurations », <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>; (2020), p 115138.
- [17] Egea, J.P. Solano, et al, « Solar-driven melting dynamics in a shell and tube thermal energy store: An experimental analysis », *Renewable Energy* ; (2020) : 154,p 1044-1052.
- [18] Yanhua Diao, et al, « Experimental analysis of a latent heat storage unit with multichannel flat tube and copper foam », *Applied Thermal Engineering*; (2021): 186, p 116503.
- [19] Mohamed Fadl, et al, « Thermal performance analysis of compact thermal energy storage unit-An experimental study », *International Journal of Heat and Mass Transfer* ; (2021) : 173, p 121262.
- [20] Gopi Kannan, et al, « Experimental investigation on thermosyphon aid phase change material heat exchanger for electronic cooling applications », *Journal of Energy Storage* ;(2021) : 39, p 102649.

## Références bibliographiques

[21] Mohamed Moussa El Idi, « Stockage d'énergie thermique par changement de phase solide/liquide dans les milieux poreux », Thèse de doctorat spécialité science de l'ingénieur ;(2021) : p 1-164.

[22] A. Abhat, « Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials », Solar Energy ; (1983) : 30, p 313–332.

[23] Salwa BOUADILA et al. Experimental study of latent heat storage in a vacuum solar collector. Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 101 - 2011 ISSN 1775-335X - ISBN 2-910239-75-6, Ed. SFGP, Paris, France.

[24] Sekar Sinaringati et al. The utilization of paraffin and beeswax as heat energy storage in infant incubator. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. 11 pp : 800-804.