

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان - كلية التكنولوجيا

Université Aboubekr Belkaïd - Tlemcen - Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Energétique

Présenté Par :

**FERRADJ Ikram**

et

**DALI YUCEF Younes**

**Sujet**

**Etude expérimentale du stockage thermique en  
utilisent un MCP : conteneurs cylindriques.**

Soutenu publiquement, le 27/06/2022, devant le jury composé de :

M .GUELLIL.H

M BEGAG.A

Mme SARI HASSOUN.H

M KORTLA.N

MCA

MAB

MAA

Professeur

UAB. Tlemcen

UAB. Tlemcen

UAB. Tlemcen

UAB. Tlemcen

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

## *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont à nos promoteurs, Mme **H. SARI HASSOUN** et Monsieur **A.N. KORTI** pour leur aide, leurs critiques constructives, leurs explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de leurs orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier **K. MISSOUM** pour l'aide qu'elle nous a apportée.

Nous remercions également les membres de jury, **H. GUELLIL**, et **A. BEGAG** qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Merci

## Dédicaces

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :*

- ✓ *A mes chers parents M. et Bensalah .S , tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et leur précieuse aide morale et financière dont ils ont fait preuve pour que je réussisse, que Dieu les protège et les entoure de sa bénédiction.*
- ✓ *A ma sœur Afaf et à mes frères Hamza et Mohamed , Pour leurs encouragements inestimables.*
- ✓ *A mes chers amies R.Hanaa , Hadjer et B.Hanane, et toutes personnes ayant participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.*

**FERRADJ Ikram**



## *Dédicaces*

*Je dédier ce modeste travail :*

- ✓ *A mes chers parents Itimed et Fethallah pour tous leurs sacrifices, leurs amours, et leurs prières tout au long de mes études,*
- ✓ *A ma chère grand-mère pour sa tendresse, et son soutien,*
- ✓ *A mes chères sœurs pour leurs encouragements, et A toute ma famille pour leurs soutiens tout au long de mon parcours universitaire,*
- ✓ *A mes chers amis Aymen, Abdeljalil, Issam pour leurs appuis et leur soutien moral*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infallible*

**DALI YOUCES Younes**

## **Résumé**

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente représente l'un des moyens les plus prometteurs pour l'économie d'énergie. Les matériaux à changement de phases MCP utilisés ont suscité un intérêt croissant dans la recherche en énergétique. Le travail présent est consacré à une étude expérimentale de transfert de chaleur dans un système de stockage et de déstockage par l'utilisation de la paraffine comme MCP. L'étude porte sur la fusion de la paraffine contenue dans des capsules cylindriques placées dans un stockeur en bois de forme rectangulaire. L'étude permet d'enregistrer l'évolution temporelle de la température en utilisant un enregistreur 06 voies avec son logiciel acquisition. Une série d'expériences ont été réalisées pour voir les effets de la puissance, du débit d'air et du nombre des capsules sur le comportement thermique du système et le temps de stockage. Ces résultats permettent d'optimiser le fonctionnement du stockeur thermique.

**Mots clés :** Stockage Thermique, MCP, Paraffine, transfert de chaleur, Chaleur Latente, chaleur sensible.

**Abstract**

The storage of thermal energy by latent heat represents one of the most promising means for energy saving. The MCP phase change materials used have aroused growing interest in energy research. The present work is devoted to an experimental study of heat transfer in a storage and retrieval system using paraffin as PCM. The study focuses on the fusion of paraffin contained in cylindrical capsules placed in a rectangular wooden storer. The study makes it possible to record the temporal evolution of the temperature using a 06-channel recorder with its acquisition software. A series of experiments were carried out to see the effects of power, airflow and number of capsules on the thermal behavior of the system and the storage time. These results make it possible to optimize the operation of the thermal store.

**Keywords:** Thermal Storage, MC P, at Latent, sensible heat.

## الملخص

يمثل تخزين الطاقة الحرارية بالحرارة الكامنة أحد أكثر الوسائل الواعدة لتوفير الطاقة. أثارت مواد تغيير طور PCM المستخدمة اهتمامًا متزايدًا بأبحاث الطاقة. هذا العمل مخصص لدراسة تجريبية لانتقال الحرارة في نظام تخزين واسترجاع باستخدام البارافين ك PCM. تركز الدراسة على اندماج البارافين الموجود في كبسولات أسطوانية موضوعة في مخزن خشبي مستطيل الشكل. تتيح الدراسة إمكانية تسجيل التطور الزمني لدرجة الحرارة باستخدام مسجل 06 قناة مع برنامج الاستحواذ الخاص به. تم إجراء سلسلة من التجارب لمعرفة تأثير الطاقة وتدفق الهواء وعدد الكبسولات على السلوك الحراري للنظام ووقت التخزين. تتيح هذه النتائج تحسين تشغيل المخزن الحراري.

**Table des matières****Résumé****Liste des figures****Liste des tableaux****Nomenclature****Introduction générale..... 2****Chapitre I. Recherche bibliographique****I.1 Introduction ..... 6****Chapitre II. Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement des phases**    **Introduction .....22**    **Stockage de l'énergie .....22****Contexte.....22**    **Classification des systemes de stockage d'énergie thermique .....23**    **Différentes techniques de stockage thermique ..... 25**        **Stockage Thermochimique..... 25**        **stockage thermique latent (STL) .....26**        **Stockage Thermique Sensible, STS .....28**    **Comparaison des systèmes de stockage .....30**    **Critères de choix et de la conception d'un système de stockage ..... 31**



---

II.7.1 Principe de fonctionnement de MCP...	35
II.7.2. Choix d'un MCP .....	36
II.7.3 Conditionnement des paraffines .....	37
Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage .....	38
Surfusion	38
Dilatation .....	39
Surchauffe .....	39
Applications des MCP pour le stockage de l'énergie thermiques.....	39
Applications médicales .....	39
Applications des MCP dans le bâtiment.....	40
MCP dans les rideaux .....	41
II. 0Technologies des échangeurs.....	41
Echangeurs « tubes et calandre .....	43
Echangeurs avec MCP encapsulé.....	43
Echangeurs à plaques .....	44
Echangeurs avec MCP en cascade .....	44
II.11 Conclusion .....	45
<b>Chapitre III .Procédure expérimentale</b>	
III. 1Introduction.....	47
Banc d'essai .....	47

Description de l'installation .....	49
Matériels utilisés .....	52
Remplissage des capsules .....	57
Choix de la température d'entrée de l'air .....	60
Présentation du logiciel utilisé .....	61
 <b>Chapitre IV : Résultats et interprétations</b>	
Introduction .....	63
Effet de la puissance de la résistance .....	63
Effet du débit de l'air.....	67
Effet du nombre des rangées.....	70
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>73</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>75</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Fig. I.1:</b> Schéma de l'unité de stockage de chaleur latente utilisant deux PCM (LHSU2).....	7
<b>Fig I.2:</b> Comparaison entre l'évolution temporelle de la température du MCP1 et MCP2 .....	7
<b>Fig I.3:</b> Schéma de principe du montage expérimental.....	8
<b>Fig. I.4 :</b> Modèle du calcul de la capsule sphérique.....	8
<b>Fig. I.5 :</b> Schéma de unité de stockage .....	9
<b>Fig. I.6 :</b> Effets de la température d'entrée du HFT sur le temps de fusion.....	9
<b>Fig. I.7 :</b> Effets de la vitesse d'entrée du HFT sur le temps de fusion .....	10
<b>Fig. I.8 :</b> Géométrie du problème .....	10
<b>Fig. I.9 :</b> Énergie stockée dans le system .....	11
<b>Fig. I.10 :</b> Vue en coupe du montage des tubes rempli par MCP .....	11
<b>Fig. I.11 :</b> Schéma de l'expérience.....	12
<b>Fig. I.12 :</b> Vue schématique de l'installation expérimentale .....	13
<b>Fig. I.13 :</b> Système de stockage .....	13
<b>Fig. I.14 :</b> Evolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 1 au cours de stockage .....	14
<b>Fig. I.15 :</b> Schéma du réservoir de stockage thermique Et l'évolution de la fraction liquide.....	15
<b>Fig. I.16 :</b> Unité de stockage d'énergie solaire par chaleur latente de fusion.....	16
<b>Fig. 1.17 :</b> Variation temporelle du taux de transfert de chaleur q .....	16
<b>Fig. I.18:</b> Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion.....	17

**Fig. I.19** : Effet de la vitesse d'entrée du fluide Caloporteur HTF sur le temps de fusion..... 18

**Fig. I.20** : Effet du diamètre (Rayon) de tube sur le temps de fusion..... 18

**Fig. I.21**: Domaine étudier..... 19

**Fig. I.22** : Schéma du montage expérimental ..... 20

## **Chapitre II**

**Fig.II.1**: Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique..... 24

**Fig.II.2**:Principales techniques de stockage de l'énergie thermique..... 25

**Fig.II.3**: Schéma de principe du stockage thermochimique ..... 26

**Fig.II.4** : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état..... 27

**Fig.II.5** :Critères de choix d'une technologie de stockage ..... 33

**Fig.II.6** :Différents types de MCP existants ..... 34

**Fig.II.7**:Principe de fonctionnement des MCP ..... 36

**Fig.II.8**: Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP ..... 40

**Fig.II.9**:Modèlede mur contenant une plaque de plâtre-MCP ..... 40

**Fig.II.10**: Rideaux à MCP ..... 41

**Fig.II.11** :Visualisation de la fusion d'une paraffine .....42

**Fig.II.12** : Exemple de système de stockage de type tubes et calandre .....43

**Fig. II.13** :Microcapsule de paraffine .....44

**Fig II.14** : Système « en cascade » utilisé par Michels et Pitz-Paal..... 45

## **Chapitre III**

**Fig. III.1** : Banc expérimental.....47

**Fig. III.2** : Vue côté du banc d'essai.....48

**Fig. III.3** : Zone de stockage.....48

<b>Fig.III.4</b> : Réalisation expérimentale du stockage thermique .....	49
<b>Fig. III.5</b> : Capsules utilisées.....	50
<b>Fig. III.6</b> : Paraffine (Tétracosane).....	51
<b>Fig. III.7</b> : Ventilateur.....	52
<b>Fig. III.8</b> : Résistance chauffante.....	52
<b>Fig. III.9</b> : Variateur.....	53
<b>Fig. III.10</b> : Interrupteur variateur .....	53
<b>Fig. III.11</b> : Anémomètre .....	54
<b>Fig. III.12</b> : Multimètre .....	54
<b>Fig. III.13</b> : Enregistreur de température .....	55
<b>Fig. III.14</b> : Emplacement des thermocouples .....	56
<b>Fig. III.15</b> : Poids de 7 capsules vides .....	57
<b>Fig. III.16</b> : Chauffage de la paraffine à l'aide d'une résistance variable .....	57
<b>Fig. III.17</b> : Paraffine liquide.....	58
<b>Fig. III.18</b> : Remplissage de la paraffine dans les capsules.....	58
<b>Fig. III.19</b> : Poids des capsules remplies de la paraffine .....	59
<b>Fig. III.20</b> : Fixation des capsules .....	59
<b>Fig. III.21</b> : Emplacement des capsules dans la chambre de stockage.....	60
<b>Fig. III.22</b> : Déformation des capsules .....	60
<b>Fig. III.23</b> : Logical SquirrelView.....	61

**Chapitre IV**

**Fig. IV.1 :** Evolution temporelle de la température de la paraffine ( $T_{max}$ ) à un débit de l'air de 0.018 kg/s pour trois différentes puissances ..... 63

**Fig.IV.2 :** Evolution temporelle de la paraffine ( $T_{min}$ ) à un débit de l'air de 0.018 kg/s pour trois différentes puissances ..... 64

**Fig.IV.3 :** Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différentes puissances et un débit de 0.018 kg/s ..... 65

**Fig.IV.4 :** Evolution du temps de stockage en fonction de puissance ..... 65

**Fig.IV.5 :** Evolution temporelle de la température de paraffine ( $T_{max}$ ) à une puissance de 520W pour différents débits ..... 66

**Fig.IV.6 :** Evolution temporelle de la paraffine ( $T_{min}$ ) à une puissance de 520 W pour différents débit ..... 67

**Fig.IV.7 :** Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différents débits et une puissance de 520W ..... 68

**Fig.IV.8 :** Evolution du temps de stockage en fonction des trois débits ..... 68

**Fig.IV.9 :** Evolution temporelle de la température de la paraffine  $T_{max}$  des 3 cas de rangées ..... 69

**Fig.IV.10 :** Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différents cas de rangée ..... 70

**Fig.IV.11 :** Evolution du temps de stockage en fonction du nombre de rangé ..... 70

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C.....	29
<b>Tableau II.2</b> : Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique.....	31
<b>Tableau II.3</b> : Propriétés thermophysiques de certains MCP .....	35
<b>Tableau III.1</b> : Propriétés thermo-physiques de la paraffine.....	51
<b>Tableau III.2</b> : Propriétés thermo-physiques de l'air .....	51

### **Nomenclatures**

$C_p$	Capacité calorifique massique	[J/kg.K]
$m$	masse	[kg]
$T$	Température	[k]
$H$	Enthalpie	[J]
$L_f$	Chaleur latente (fusion)	[J/kg]
$C_{p_s}$	Capacité de masse thermique du corps à l'état solide	[J/kg.K]
$C_{p_l}$	Capacité de masse thermique du corps à l'état liquide	[J/kg.K]
$\Delta H_r$	Enthalpie de la réaction	[J/mol]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W/m.K]
$T$	Temps	[s]
$Q$	Densité de flux de chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	Densité du matériau	[kg/m <sup>3</sup> ]
$P$	Puissance	[W]

### **Abréviations**

MCP	Matériaux à Changement de Phase
PCM	Phase Change Material
TES	Thermal Energy Storage
HTF	Heat Transfer Fluid



**Introduction générale**

## **Introduction générale**

Le stockage thermique est une solution de flexibilité pour la transition énergétique. La chaleur en tant que vecteur énergétique se stocke facilement, ce qui ouvre la porte à de nombreuses applications comme l'apport de flexibilité aux réseaux de chaleur, l'efficacité des procédés industriels et le lissage de la production d'énergie. L'évolution prévisible des systèmes énergétiques vers plus d'efficacité globale entrainera le recours croissant au stockage thermique.

Le stockage est un moyen privilégié pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans l'industrie, il peut contribuer efficacement à améliorer la capacité de l'énergie stocké.

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

Plus récemment un intérêt particulier a été porté à l'étude et développement d'accumulateur d'énergie par chaleur latente en vue de gérer la demande et consommation. En effet l'énergie sous forme thermique se caractérisé 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 chaleur est le moyen le plus évident pour atténuer ces inadéquations, mais son application industrielle nécessite des compromis sur des critères souvent antagonistes tel que :

- La densité énergétique.
- La puissance thermique instantanée stockée ou délivrée.
- La simplicité du procédé.
- L'efficacité énergétique.

Les systèmes de stockage présentent beaucoup d'intérêt pour gérer efficacement la source d'énergie primaire.

Il est bien sur 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 stockage 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 de travail 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 industriel.

Notre travail à pour but d'étudier expérimentalement le phénomène de stockage et de stockage de l'énergie thermique en utilisant un matériau à changement de phase MCP (paraffine) rempli dans des capsules cylindrique en plastique et placer dans une enceinte rectangulaire.

Nous présentons l'ensemble de notre travail comme suite :

- Une introduction générale présente le but du travail en montrant l'intérêt de stockage thermique.
- Le premier chapitre est rayonné par une recherche bibliographique présentant les travaux expérimentaux et numériques effectués dans le domaine des systèmes de stockage thermique effectués pour diverses configurations et pour déférentes modèles de stockage.
- Le deuxième chapitre présente des généralités sur le stockage d'énergie, ainsi que le stockage d'énergie thermique et des matériaux à changement de phase.
- Le troisième chapitre porte sur le dispositif expérimental et le logiciel utilisé pour étudier l'évolution de la température de fusion de la paraffine dans les capsules.
- On rassemble dans le chapitre quatre les différents résultats obtenus et leurs interprétations.
- Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus.

**Chapitre I**  
**Recherche bibliographique**

### **I.1 Introduction :**

Le stockage de l'énergie est considéré comme un enjeu majeur du 21ème siècle, Donc ce besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique

Les premiers problèmes de transfert de chaleur avec changement de phase ont été étudiés par Clapeyron en 1831 et par Stefan en 1891. Ils étudièrent la formation de la glace. Depuis, le nom de Stefan est donné aux problèmes de transfert de chaleur où intervient une frontière mobile. Ce thème est devenu par la suite extrêmement important en raison des nombreuses applications industrielles. Par ailleurs il a suscité une abondante littérature traitant du stockage par chaleur latente dans différentes configurations

Le nombre d'ouvrages publiés liés à ce domaine d'études a connu une croissance exponentielle depuis le millénaire. Dans cette étude bibliographique, nous présentons les travaux de recherche par des expériences et simulation depuis 2009 sur le stockage d'énergie thermique par chaleur latente dans plusieurs géométries de coque (sphérique, cylindrique, plat, etc.) par suit:

Hamid.A et Al [1] ont présenté une étude numérique d'une unité de stockage de chaleur latente (LHSU) constituée d'une coque et d'un tube. L'espace de la coque est rempli de deux matériaux à changement de phase (MCP), P116 et n-octadécane, avec différentes températures de fusion (50°C et 27°C, respectivement). Un modèle mathématique basé sur les équations d'énergie de conservation a été développé et validé avec des données expérimentales. Les résultats montrent l'orsequ'un débit massique atteint une valeur modérée, , le LHSU2 est plus efficace pour une température d'entrée plus basse (55°C), uniquement. Pour des températures d'entrée de FTC plus élevées, le LHSU2 est plus efficace pour un stockage partiel

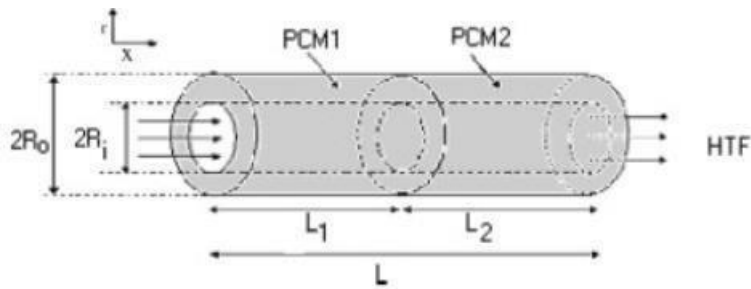


Fig I.1 : Schéma de l'unité de stockage de chaleur latente utilisant deux MCP (LHSU2)

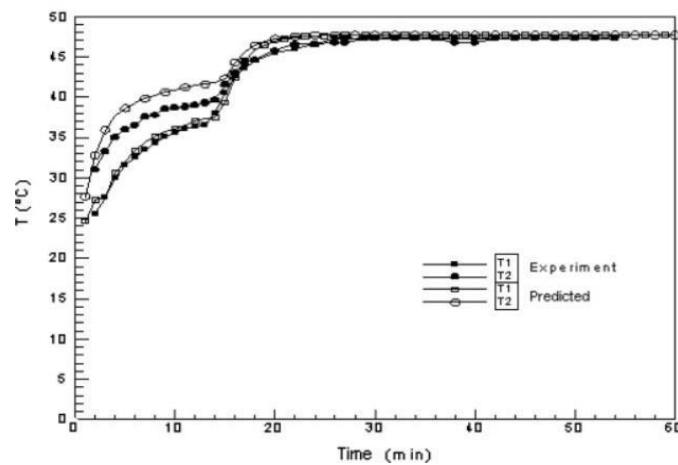


Fig I.2: Comparaison entre l'évolution temporelle de la température du MCP1 et MCP2

D. Zhou et Al [2] ont fait une étude expérimentale sur les caractéristiques de transfert de chaleur des MCP embarqués dans des mousses métalliques cellulaires et graphite expansé, respectivement. Dans cette étude, la cire de paraffine RT 27 et le chlorure hexahydraté sont utilisés comme milieu de stockage de chaleur. Les résultats indiquent que l'ajout de matériaux poreux, soit des mousses métalliques à cellules ouvertes ou le graphite expansé, peut améliorer le taux de transfert de chaleur des MCP. Surtout pour les mousses métalliques, les résultats montrent qu'ils peuvent doubler le taux global de transfert de chaleur pendant les processus de fusion.

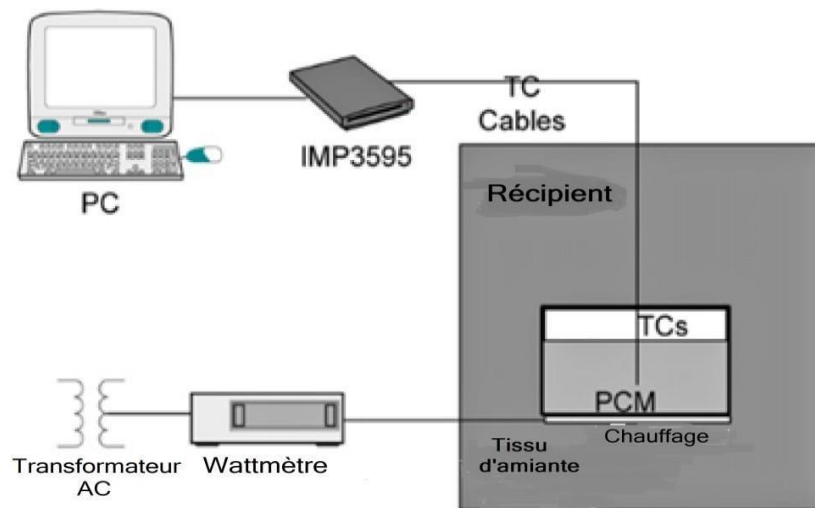


Fig I.3 : Schéma de principe du montage expérimental.

Housseynatou.B [3] a effectué d'une étude expérimentale dans la quelle deux sections contiguës ou une est remplie de paraffine (52 -54°C) et l'autre d'eau. Le but c'est de conclure l'effet du MCP étudiés sur la performance d'un chauffe-eau solaire a changement de phase pour produire l'eau chaud sanitaire. Les résultats montrent a partir d'un flux de 600 w/m<sup>2</sup>, épaisseur de 2 cm de la paraffine a pu obtenir une température de 48°C vers 17h et 40°C le lendemain à 6h. Pour cette épaisseur le rendement est 60% et les pertes sont aux environs de 4.4 w/k.

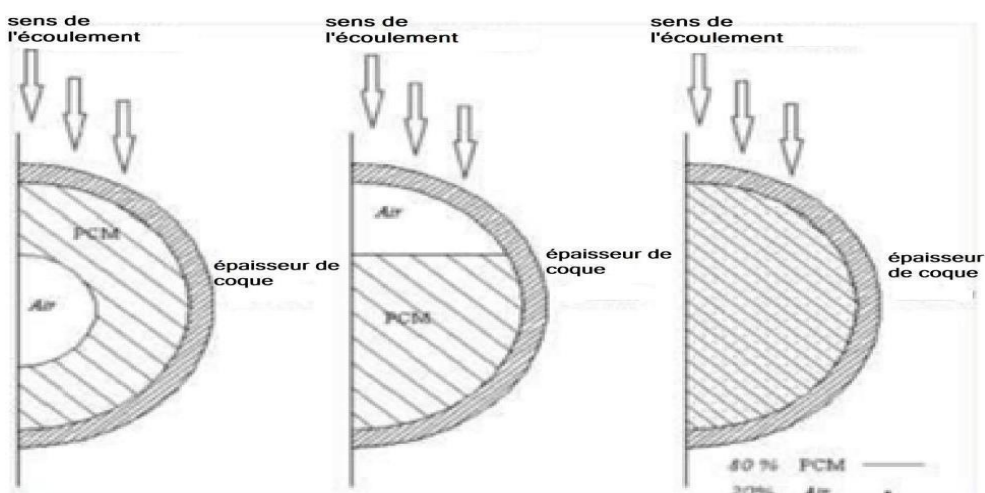


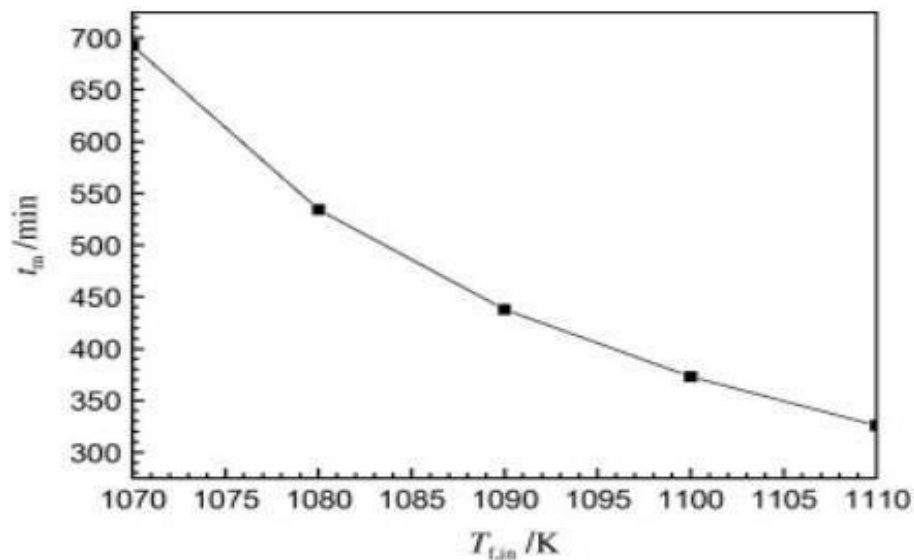
Fig I.4 :Modèle du calcul de la capsule sphérique



Tao.Y et Al [4] ont attribué leurs travaux en basent sur une méthode enthalpique d'un modèle mathématique et physique appliquée sur une unité de stockage avec un faisceau de tubes enveloppé dans un matériau à changement de phase. L'eau est sélectionnée comme un HTF. La coquille est remplie de MCP (n-octadécane). Les resultants indiquent que Lorsque la température d'entrée initiale augmente de 30 °C à 90 °C. Le temps de fusion diminue de 42,75 min à 20,58 min et pour un débit massique d'entrée initial passant de  $2,0 \times 10^{-4}$  kg/s à  $8,0 \times 10^{-4}$  kg/s entraînera une diminution du temps de fusion de 37.42 min à 23.75 min



**Fig I.5 :** Schéma de l'unité de stockage



**Fig. I.6 :** Effets de la température d'entrée du HFT sur le temps de fusion

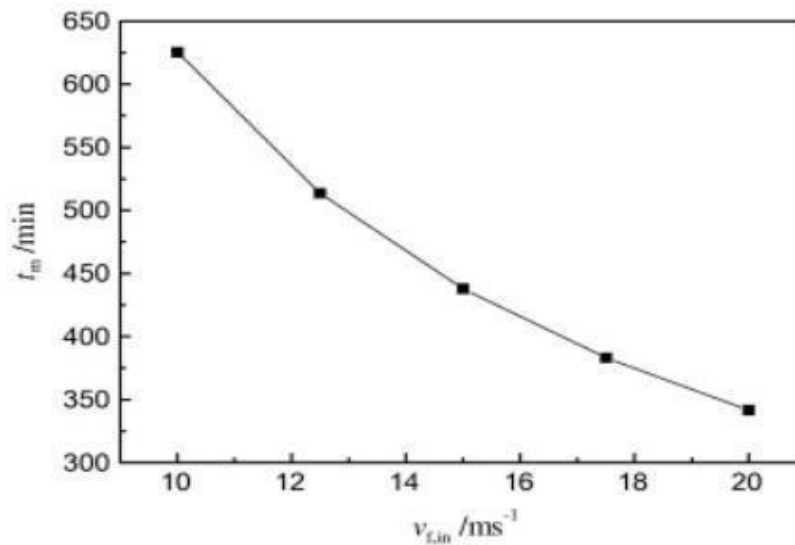


Fig. I.7 : Effets de la vitesse d'entrée du HFT sur le temps de fusion

Walid.f et Al [5] ont fait une modélisation sur la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage (sensible et latente) afin de décrire le comportement thermique du système. L'étude porte sur un canal poreux soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, et limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constante alors que l'autre est supposée adiabatique. Les résultats indiquent une différence entre l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82 % lorsque la température d'entrée de 25 à 40°C

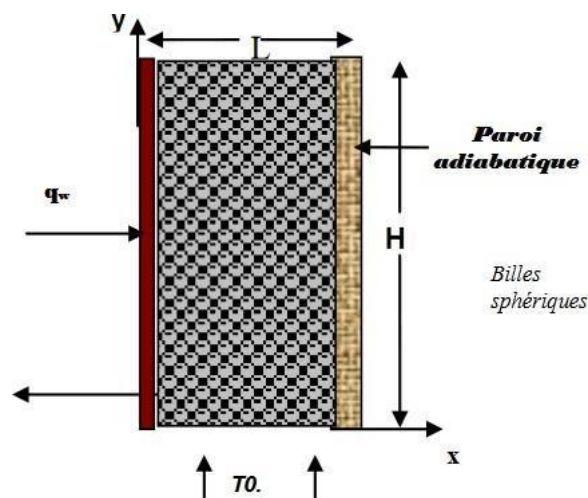
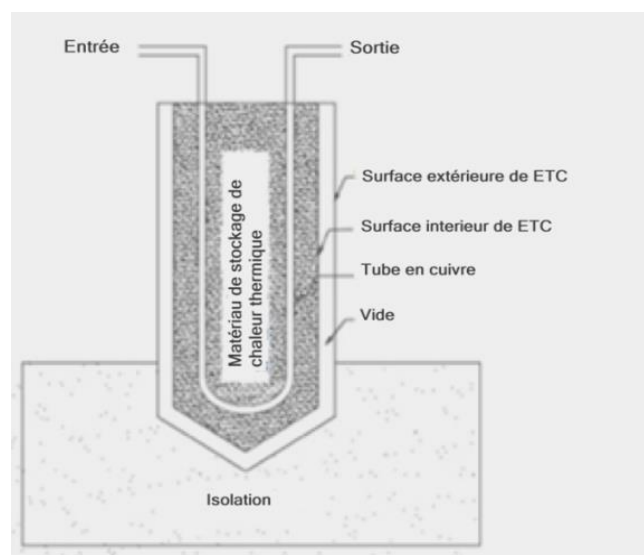


Fig I.8 : Géométrie du problème

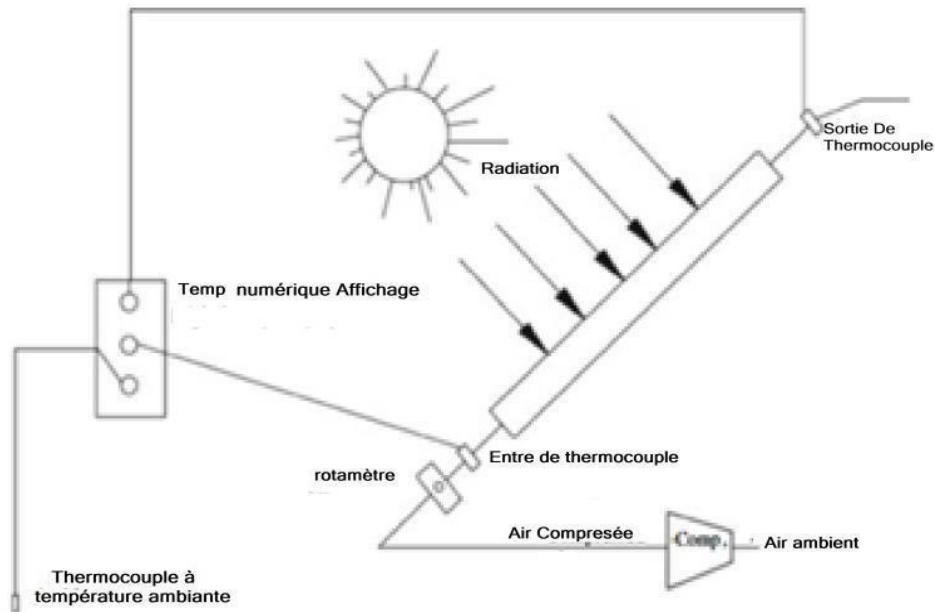
Température d'entrée (°C)	Énergie stockée dans les billes de verre (MJ)	Énergie stockée dans les capsules de MCP (MJ)
25	96	139
30	96	150
35	96	162
40	96	175

**Fig I.9 :**Énergie stockée dans le système.

Tyagi.V et Al [6] ont réalisé une expérience pour déterminer les performances d'un aérotherme solaire avec et sans matériau à changement de phase (MCP) entre la paraffine et l'huile rythmer. Pour cela 12 tubes en cuivre, 4 remplis de MCP, 4 remplis de l'huile rythmée et les 4 autres sans MCP ont été disposés en série dans trois dispositions différentes, pour étudier les performances comparatives de ce système expérimental. Les résultats obtenus révèlent que la température de sortie dans le cas où le stockage d'énergie thermique (TES) est supérieur à celle de sans TES, en outre, la température de sortie avec MCP est légèrement supérieure à celle d'rythmer huile. En plus dans le cas sans MCP il n'y a pas de gain d'énergie le soir mais avec un MCP il y a un gain de chaleur pour environ 4 h le soir ce qui donne le soutènement pour le chaud l'air pendant environ quatre heures de plus, ce qui est l'avantage principal de ces systèmes avec MCP.



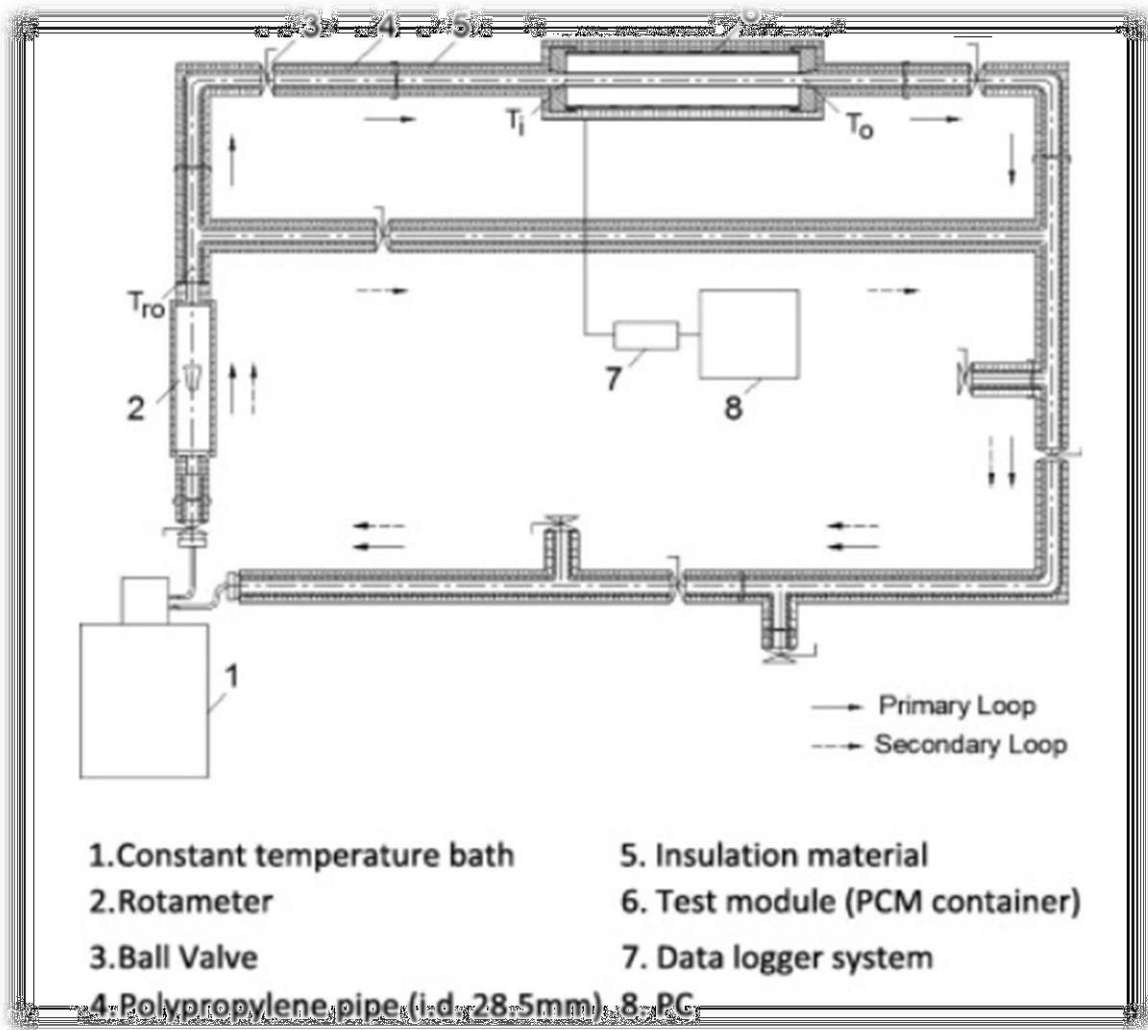
**Fig I.10 :**Vue en coupe du montage des tubes rempli par MCP



**Fig. I.11** : schéma de l'expérience

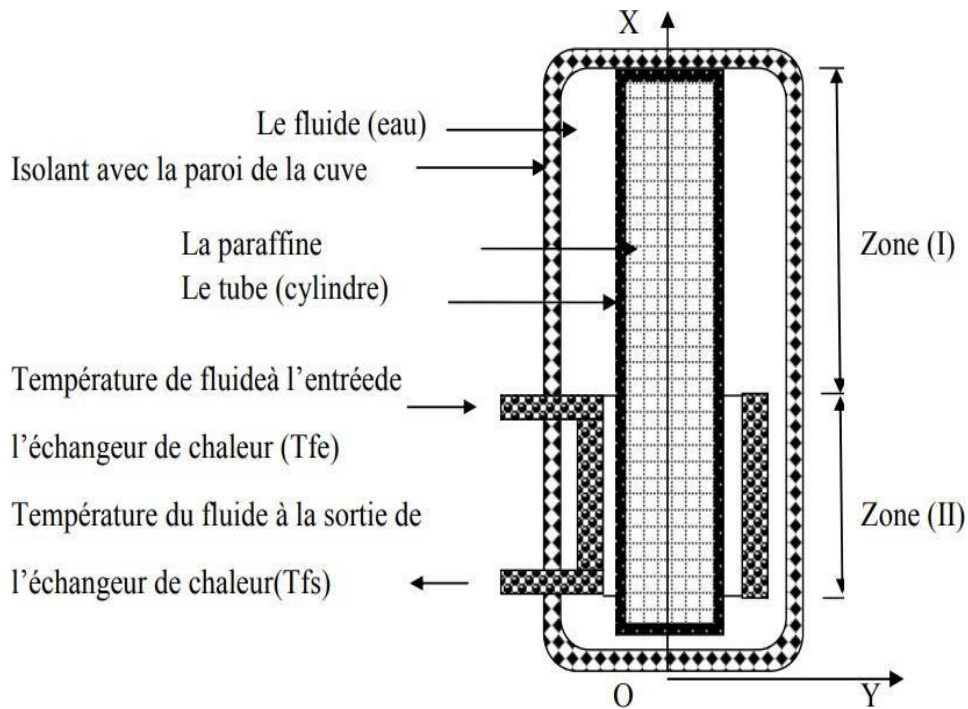
Yazici.Y et Al [7] ont traité une analyse expérimentale de la chaleur latente et le système de stockage d'énergie thermique de type calandre horizontale. La paraffine est utilisée comme matériau à changement de phase tandis que l'eau distillée est utilisée comme fluide caloporteur. Des expériences sont menées pour étudier non seulement le comportement au stockage (fusion ou chargement) mais aussi celui au retrait (solidification ou déchargement) du MCP. L'effet de la température d'entrée sur le temps de fusion (pour le chargement) et de solidification (pour le déchargement) est déterminé. L'accent est mis sur la compréhension de la physique du processus basé sur la variation temporelle du champ de température à l'intérieur du MCP.

Les résultats montrent que la convection naturelle était initialement efficace sur le transfert de chaleur, qui a ensuite été supprimé par conduction. Comme prévu, l'augmentation (pour le processus de charge) ou la diminution (pour le processus de décharge) de la température d'entrée du HTF améliore le processus de changement de phase à l'intérieur du MCP (fusion ou solidification). Le comportement asymétrique observé peut conduire à de nouvelles conceptions innovantes.



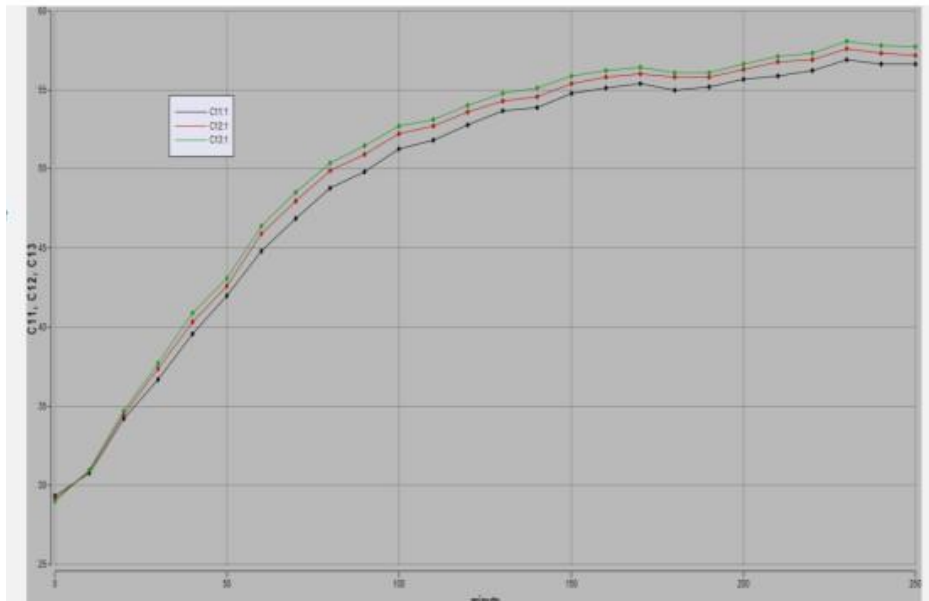
**FigI.12 :** Vue schématique de l'installation expérimentale

Salma.Z [8]a fait une analyse expérimentale de transfert thermique dans un système de stockage d'une géométrie cylindrique avec une intégration de MCP (paraffine 36.7), immergé dans une cuve de stockage cylindrique avec un échangeur de chaleur type serpent, l'eau est utilisée comme fluide caloporteur. Les résultats montrent que l'augmentation du débit massique entraine une augmentation de la capacité d'Énergie thermique stockée dans la paraffine.



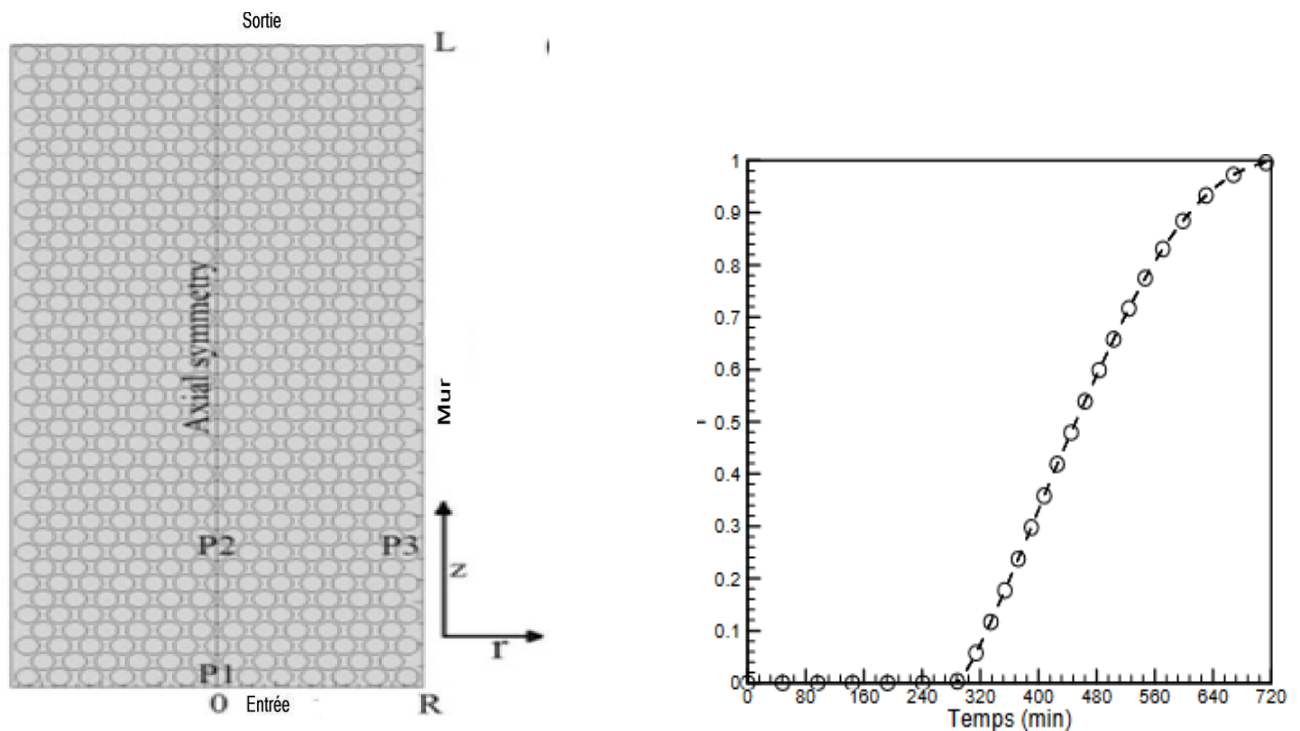
**FigI.13** : Système de stockage

M.Groune [9] a fait une analyse expérimentale d'un élément de stockage thermique d'une géométrie cylindrique avec une intégration du paraffine ( $56/58^{\circ}\text{c}$ ) entre un cylindre de 40 cm de hauteur et de 4 cm de diamètre et une cuve de stockage cylindrique avec un échangeur de chaleur serpentin. L'étude est d'effectuer plusieurs cycles de stockage et déstockage de chaleur et de recueillir les variations de température en fonction du temps pour interpréter les phénomènes qui s'y déroulent. Les résultats montrent l'importance du débit massique sur la capacité d'énergie thermique stockée dans le MCP puis le rôle de la paraffine dans un système mixte et son rôle d'isolation.



**Fig. I.14** : l'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps suivant l'épaisseur dans la zone 1 au cours de stockage

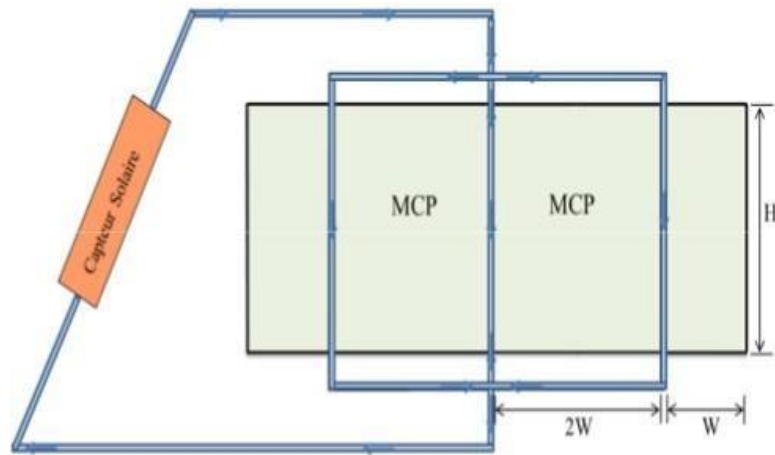
Selvan.B et Al [10] dans leurs thèse, ils ont développé un modèle bidimensionnel biphasé pour étudier le comportement dynamique d'un système de stockage d'énergie thermique à lit fixe, qui est composé de capsules sphériques de matériau à changement de phase encapsulé (MCP-nitrate de sodium) et synthétique à haute température. L'huile (Therminol 66) comme fluide caloporteur. Ils constatent que l'augmentation de la taille de la capsule, du débit de fluide ou la diminution du nombre de Stefan entraîne une augmentation de la région de la thermocline qui diminue finalement le temps de décharge effectif et l'utilisation totale.



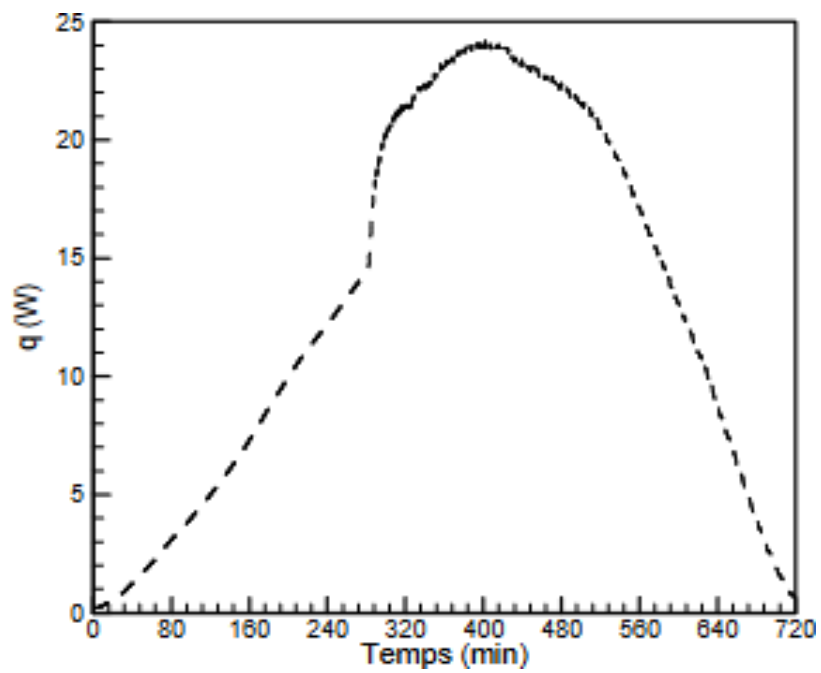
**Fig. I.15 :** Schéma du réservoir de stockage thermique et l'évolution de la fraction liquide

El qarinia.H et Al [11] ont développé une simulation numérique pour l'optimisation du stockage thermique solaire avec la fusion du paraffine (wax P1106) l'étude est de relié une enceinte adiabatique remplie du MCP avec une conduite dans lequel circule l'eau provenant du capteur solaire cette étude a pu donner des bons résultats optimaux pour décrire l'effet de la masse du MCP, du débit, de nombre de canaux rectangulaires et du rapport de forme de l'enceinte.





**Fig. I.16 :** Unité de stockage d'énergie solaire par chaleur latente de fusion

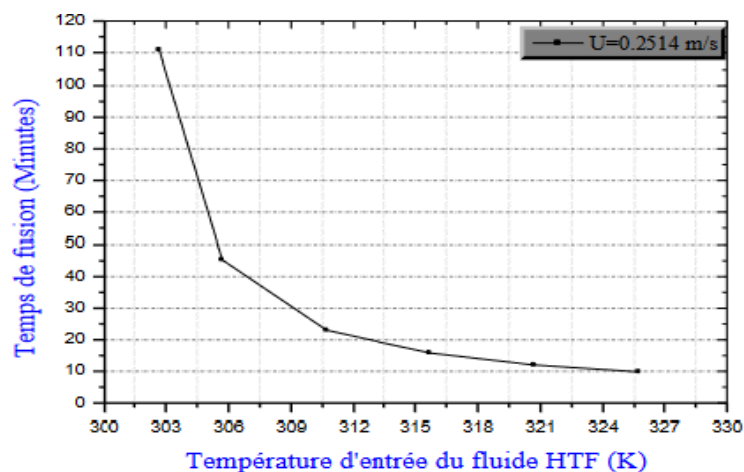


**Fig. 1.17 :** Variation temporelle du taux de transfert de chaleur  $q$ .

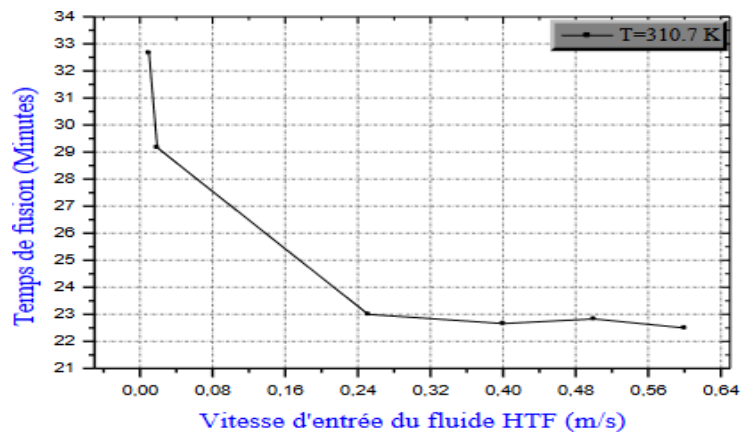
Laura.S et All [12] ont fait une études expérimentales d'une géométrique de capsule sphérique. Pour réalise un travail qui concerne l'effet de l'air interne sur les performances du transfert thermique ainsi sur le stockage thermique par changement de phase. Ils ont conclu que dans le cas d'un vide initialement localiser au centre de la capsule il y a le plus haut taux de transfert de la chaleur alors le plus court temps de fusion,

Fouzi.B [13] a réalisé une étude quantitative pour viser les performances d'une unite de stockage thermique par chaleur latente (Le matériau de stockage par chaleur latente utilisé est le n-octadécane). Il a pu réaliser après ces études que:

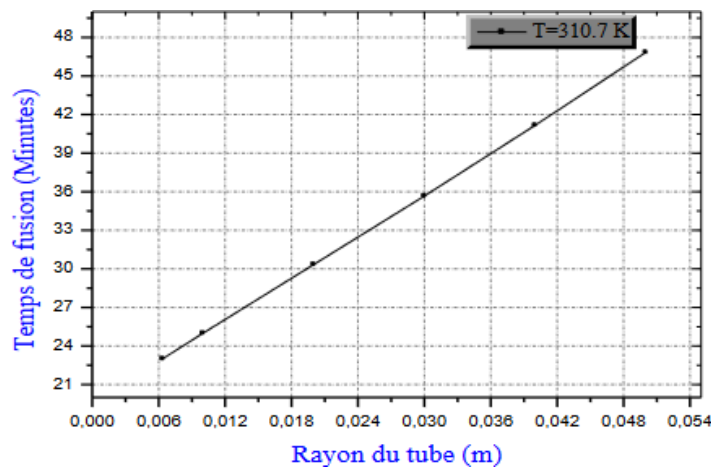
- Une température d'entré passer de 302.7 K jusqu'a 325.7 K, à réduit le temps de fusion jusqu'à 92%,
- Une vitesse d'entré, passer de 0.01 m/s à 0.6 m/s, à réduit le temps de fusion jusqu'à 32%,
- Enfin L'augmentation du rayon du tube a permis d'avoir un temps de fusion long par rapport aux précédents. Avec l'augmentation du rayon interne de tube de 0.00635 m à 0.05 m, le temps de fusion augmente à 49 %.



**Fig. I.18:** Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur HTF sur le temps de fusion



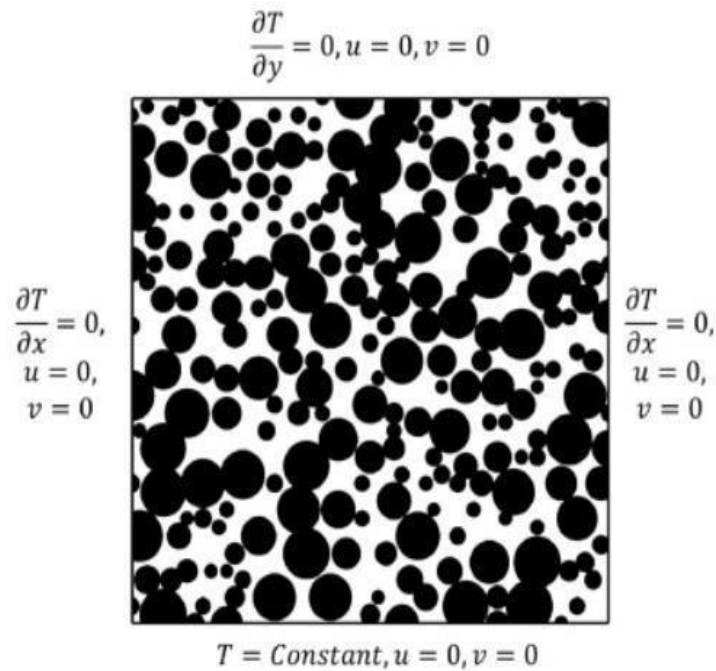
**Fig. I.19** : Effet de la vitesse d'entrée du fluide Caloporteur HTF sur le temps de fusion



**Fig. I.20** : Effet du rayon de tube sur le temps de fusion

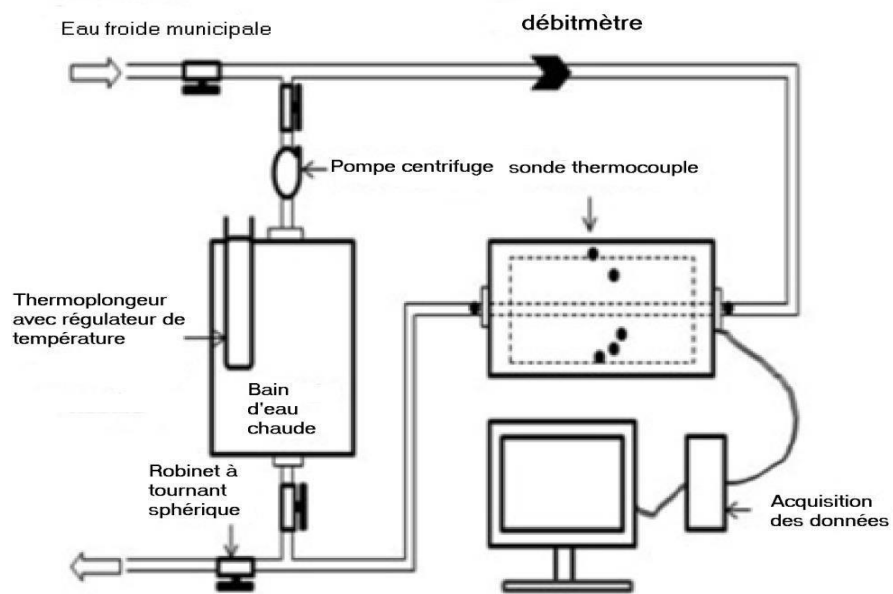
Arjun. P et Al [14] Ont développé un modèle numérique pour simuler la fusion d'un matériau à changement de phase (PCM) dans un système de stockage d'énergie composite PCM-mousse métallique, ce présent travaille résout la géométrie de la mousse métallique. Aussi pour capturer plus précisément les effets des paramètres géométriques tels que la taille des pores et la distribution des pores ainsi que le transfert de chaleur localisé à l'interface PCM de la mousse métallique. . Le modèle est validé avec des résultats expérimentaux donnés dans la littérature. Les résultats indiquent que l'effet de la convection est plus élevé pour une porosité

plus élevée et une taille de pore plus grande.



**Fig I.21:**Domaine étudié.

Rohit. K et Al [15] ont réalisé une étude expérimentale pour analyser le taux de transfert de chaleur du matériau à changement de phase à l'intérieur d'un anneau. Un tuyau en cuivre (chargé au centre) s'étend sur la longueur d'un conteneur cylindrique pendant les modes de décharge et de charge. Le taux de transfert de chaleur global est amélioré pendant le processus de changement de phase en ajoutant des ailettes longitudinales avec le tuyau en cuivre. Ces ailettes longitudinales étaient inclinées à un angle de  $120^\circ$ . La cire de paraffine est utilisée comme matériau à changement de phase. L'objectif principal de l'expérience est d'analyser le taux de transfert de chaleur lors de la solidification et de la fusion du MCP. De plus, l'effet du débit massique et de la température d'entrée du fluide caloporteur a été analysé. La conduction s'est avérée être le principal mécanisme de transfert de chaleur au cours des premières étapes de la charge. Une fois que le PCM est liquéfié à l'intérieur du système, la convection naturelle est dominée. Pendant la solidification du PCM, le transfert de chaleur par conduction est dominé. De plus, il a été observé que la durée de fusion est fortement affectée par la température d'entrée du HTF tandis que le débit affecte légèrement la durée de fusion.



**Fig I.22** : Schéma du montage expérimental

## **Chapitre II**

### **Généralités sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

## **II.1 Introduction :**

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique.

### **Stockage de l'énergie:**

Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

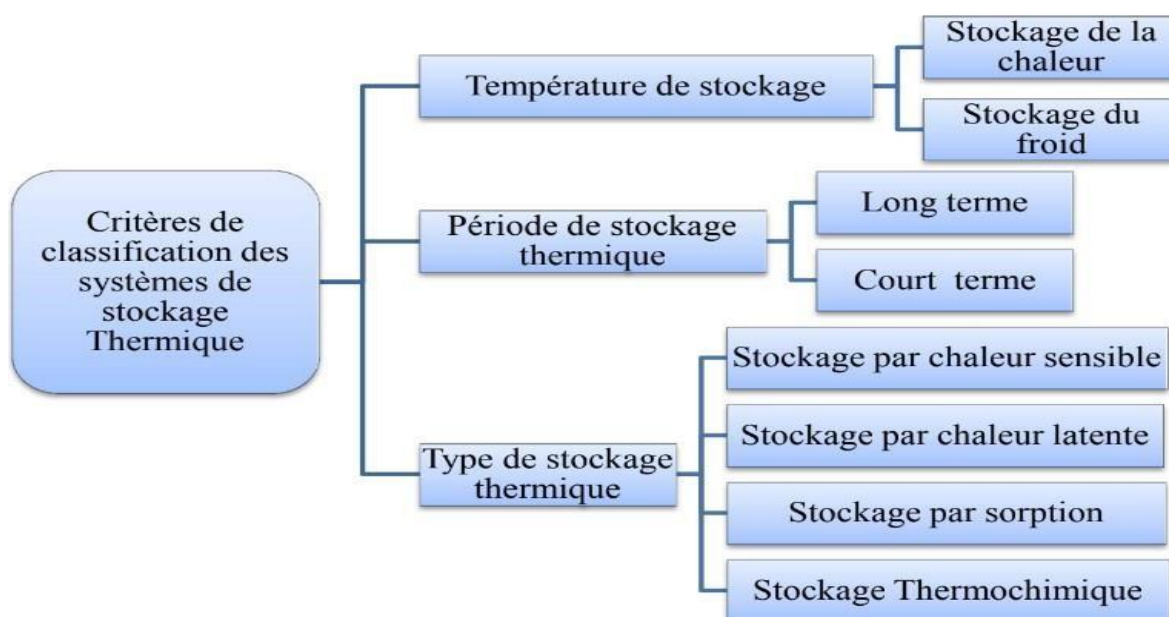
Les méthodes de stockage dépendent du type d'énergie. Les sources d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), sous forme de réservoirs à l'état naturel, remplissent naturellement la fonction de stocks. Une fois extraites, elles peuvent facilement être isolées, hébergées et transportées d'un point de vue technique. Le stockage s'avère plus complexe pour les énergies intermittentes : leur production est relayée par des vecteurs énergétiques tels que l'électricité, la chaleur ou l'hydrogène, nécessitant des systèmes spécifiques de stockage.

### **Contexte:**

Le contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir à l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le double avantage d'être gratuite et propre. Toutefois, l'inconvénient de cette source d'énergie est son intermittence. L'une des solutions envisagées pour faire face à ce problème est le stockage de l'énergie. Cette énergie peut être stockée sous forme de chaleur dans des réservoirs thermiques. Ces derniers diffèrent par la géométrie de l'échangeur et par la nature du matériau servant à stocker l'énergie [16,17].

## II.4 Classification des systèmes de stockage d'énergie thermique :

Les technologies de stockage de l'énergie thermique peuvent être classifiées dans diverses catégories selon différents critères figure (II.1). Si le critère est la plage de température, les systèmes de stockage sont divisés en « stockage de la chaleur » et « stockage du froid ». Dans le cas où le critère est la durée de stockage deux classes sont considérées, « le stockage à long terme » et « le stockage à court terme ». D'autre part, si le critère est l'état du matériau de stockage, il existe quatre principaux types : « stockage par chaleur sensible », « stockage par chaleur latente », « stockage par chaleur thermochimique » et « stockage par sorption ». Les systèmes de stockage de l'énergie thermique peuvent aussi être classés en deux autres catégories: actifs ou passifs. Le terme de stockage actif est utilisé dans le cas où le matériau de stockage circule dans le système. À l'opposé, dans le cas d'un système de stockage d'énergie thermique passif (aussi appelé régénérateur), le matériau de stockage ne circule pas dans le procédé. L'énergie thermique est transportée via un fluide caloporteur et est transférée vers le matériau de stockage à l'aide d'un échangeur. La structure de l'échangeur de chaleur est installée au sein du matériau de stockage [18].



**FigII.1:**Classification des systèmes de stockage de l'énergie thermique [18].



## CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. A la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance. Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que peut être thermo-chimique sensible et chaleur latente<sup>1</sup> ou en combinaison de ces derniers.

### Différentes techniques de stockage thermique :

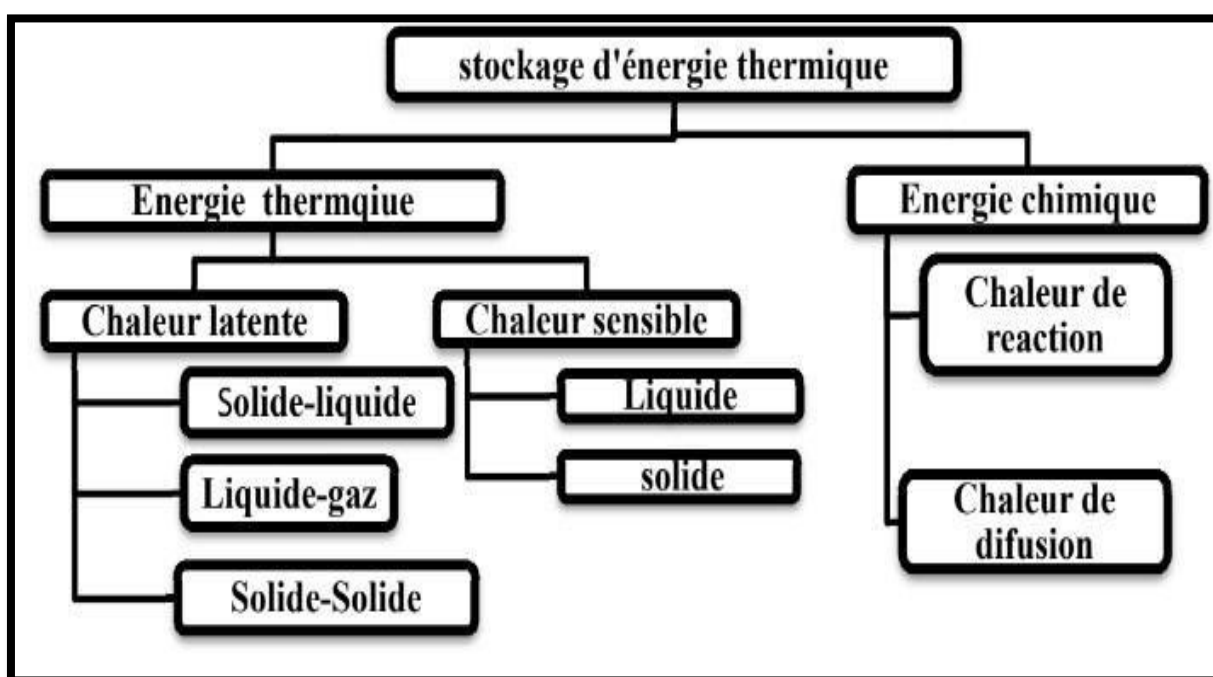


Fig II.2: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique. [19]

### Stockage Thermo-chimique:

L'énergie thermo-chimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermo-chimique 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 élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction

## CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

chimique réversible. Le stockage d'énergie thermo-chimique 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 [20].

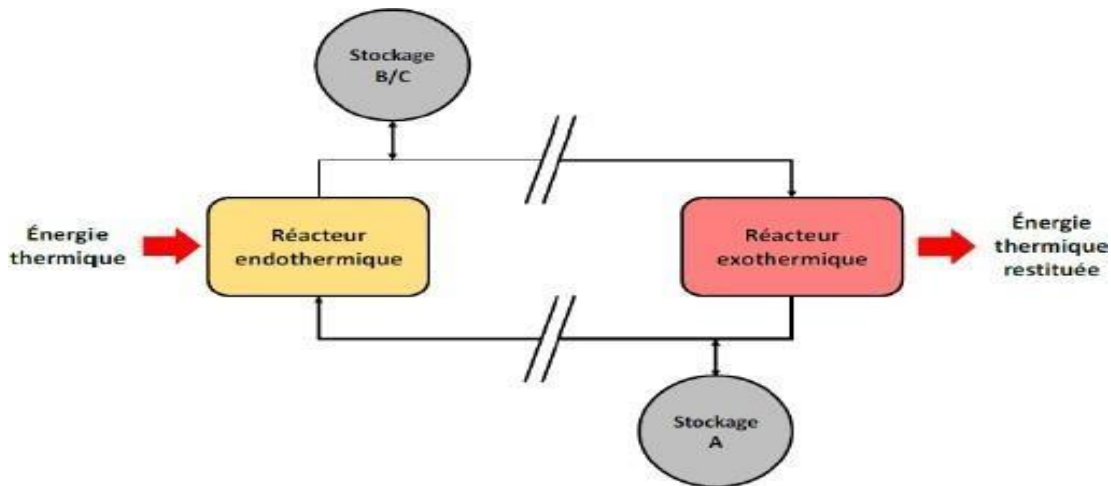


Fig II.3: Schéma de principe du stockage thermo-chimique.

### Stockage thermique latent (STL):

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. Elle intervient aussi dans les changements allotropiques. La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspondant à la température de la transition de phase. Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit:

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f \quad \text{[II.1]}$$

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

## CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Généralement, il faut porter le matériau de sa température initiale  $T_i$  à sa température de fusion  $T_f$  et l'on écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times c_p \times (T_f - T_i) + m \times \Delta h_f \quad [\text{II.2}]$$

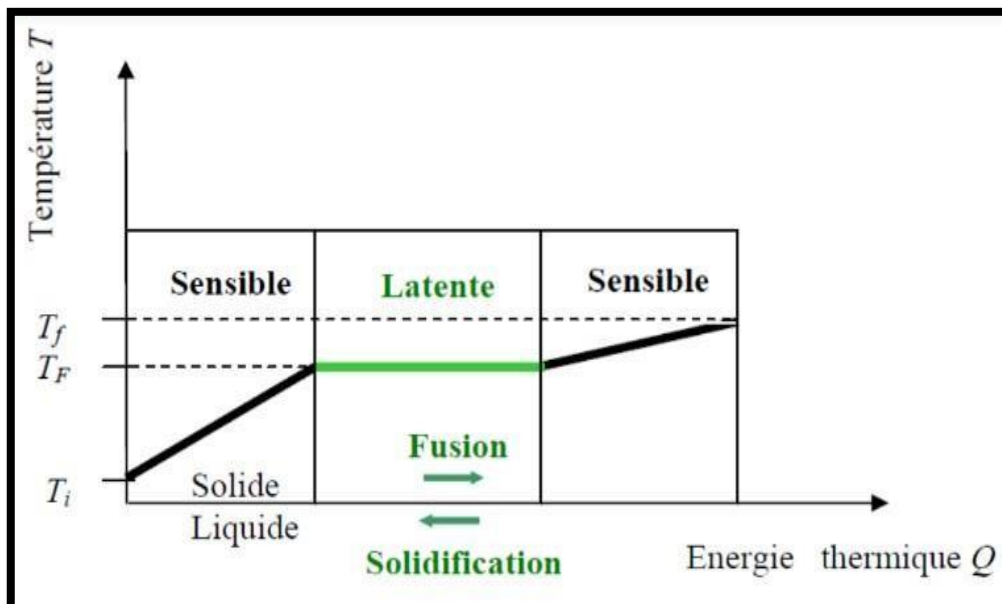
Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue. Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante. Si  $T_f$  est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température  $T_1$  à la température  $T_2$ , avec  $T_1 \leq T_f \leq T_2$  alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m \times c_{ps}(T) dt + m \times L_f + \int_{T_f}^{T_2} m \times c_{pL}(T) dt \quad [\text{II.3}]$$

$C_{ps}(T)$  : chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$C_{pL}(T)$  : chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

$L_f$  : chaleur latente de changement de phase.



**Fig II.4 :** Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

## ***CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase***

---

Donc les avantages de la chaleur latente sont :

- La température de changement de phase quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.
- Les densités sont importantes de stockage.
- Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.
- Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment, peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.

Et les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente sont :

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 la chaleur sensible pour chauffer le solide jusqu'à la fusion, donc il faut :

- Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- Le changement de phase est lié avec le changement de volume.
- Le changement de phase est dans les limites des températures demandées.
- Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique.

### **Stockage thermique sensible, STS:**

Dans le stockage de chaleur sensible de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide ; la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée. Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant le système de stockage de chaleur sensible sans aucun problème. C'est le plus important avantage de cette méthode. Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considéré comme un inconvénient pour ce système [21,22].

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

---

Dans ce système, la quantité de chaleur dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage. La chaleur sensible peut être stockée à l'aide d'un lit de roches ou galets, dans le sol, la brique, le sable, l'eau, l'huile et l'air [23,20]. Ainsi, si à pression constante l'on réchauffe un corps solide ou liquide de masse  $m$  et de capacité thermique massique  $C(T)$  de la température initiale  $T_1$ , à la température finale  $T_2$ , on peut stocker une quantité d'énergie donnée par sa variation d'enthalpie. Cette quantité de chaleur est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\Delta H = H_{\text{finale}} - H_{\text{initiale}} = \int_{T_1}^{T_2} m \times cp(T) dT \quad [\text{II.4}]$$

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de températures entre  $T_1$  et  $T_2$  on a :

$$\Delta H = m \times C_p \times (T_2 - T_1) \quad [\text{II.5}]$$

Donc la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température.

Et on a deux cas :

- si  $T_2 > T_1$  on parlera de stockage du chaud.
- si  $T_2 < T_1$  on parlera de stockage du froid.

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

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

Tableau II.1. Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [23]

Matériaux	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Chaleur spécifique [J/kg.K]	Capacité thermique Volumétrique [J/m <sup>3</sup> .K]
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	27900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

### **Comparaison des systèmes de stockage :**

Tous les systèmes de stockage sont utilisés selon trois étapes majeures : la charge, le stockage et la décharge. Un grand nombre de moyens de stockage peuvent être identifiés selon leurs propriétés, leur température d'utilisation, le type de stockage souhaité et le domaine d'application envisagé. Les stockages ont différents potentiels comme le décrit [24]. Pour sélectionner le type de stockage, il conviendra de regarder pour quelle application il sera mis en œuvre. Par exemple, les systèmes latents et sensibles seront plutôt utilisés comme stockage tampon pour lisser la production ou différer l'utilisation de l'énergie. Alors que les stockages thermochimiques seront plus adaptés à un stockage de long terme ou inter- saisonnier qui emmagasinerait la chaleur produite en excès par certaines installations l'été pour la restituer l'hiver.

Les températures de fonctionnement de chaque système de stockage thermique sont présentées pour quelques matériaux dans le tableau suivant:

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

Tableau II.2. Comparaison des différents types de stockage en fonction de leur densité énergétique, [25,26].

Stockage sensible	Température (°C)		Capacité calorifique $c_p$ (kJ/kg.K)	Masse volumique $\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	Densité énergétique (kWh/m <sup>3</sup> )
	Froid	Chaud			
Sable – roche – huile minérale	200	300	1.3	1700	61
Béton renforcé	200	300	0.85	2200	52
Huile minérale	200	300	2.6	770	56
Eau	20	80	4.18	1000	70
Nitrates de sels fondus	250	350	1.5	1825	76
Stockage latent	Température de fusion $T_{\text{fusion}}$ (°C)		Chaleur latente $\Delta h_{s-L}$ (kJ/kg)	Masse volumique $\rho$ (kg/ m <sup>3</sup> )	Densité énergétique (kWh/m <sup>3</sup> )
Acide maléique	131-140		235	1590	103
Xylitol	95		232	1500	97
Erythritol	118		340	1450	137
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	117		165	1569	72
NaNO <sub>3</sub>	307		172	2260	108
Stockage thermochimique	Température de réaction (°C)		Enthalpie de réaction $\Delta H_r$ (kJ/mol)		Densité énergétique (kWh/m <sup>3</sup> )
	Charge	Décharge			
$\text{MgH}_2 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	380 à 1 bar	230 à 4 bar	-75		430
$\text{CaCO}_3 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	700	650	-178		110
$\text{MgH}_2 + \Delta H_r \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	450	25-400	-94.6 (charge) 64.8 (décharge)		300

### **Critères de choix et de la conception d'un système de stockage**

Les critères de conception d'un système de stockage sont nombreux et leur importance relative est directement liée à la technologie de la centrale et au mode de fonctionnement souhaité. La quantité d'énergie stockée et restituée, est un point clé, d'autres critères doivent être pris en compte, qu'ils soient économiques[27] :

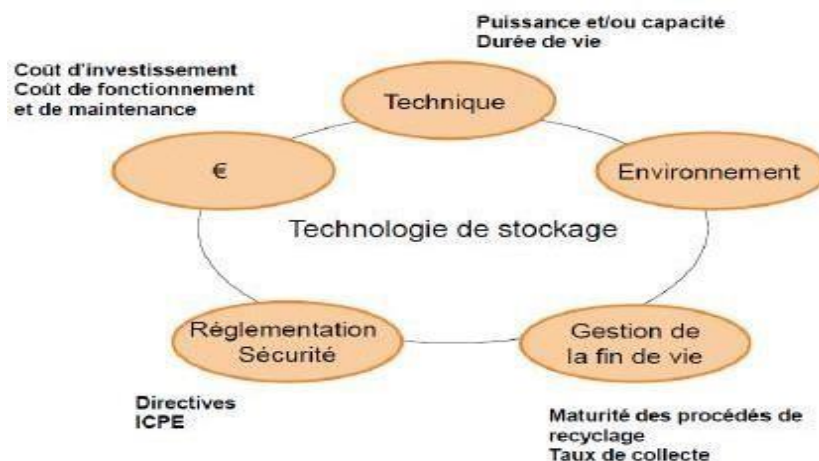
## CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

- ✓ Coût du matériau de stockage.
- ✓ Coût de l'échangeur de chaleur.
- ✓ Coûts d'investissement liés à l'encombrement du système de stockage.

Ou bien techniques :

- ✓ Densité énergétique élevée (par unité de masse ou de volume) ;
- ✓ Conductivité thermique élevée ;
- ✓ Transferts de chaleur efficaces entre le fluide caloporteur/de travail et le matériau de stockage.
- ✓ Stabilité mécanique et chimique du matériau de stockage ;
- ✓ Compatibilité chimique entre le fluide caloporteur/de travail, l'échangeur de chaleur et/ou le matériau de stockage ;
- ✓ Réversibilité du matériau de stockage pour un nombre élevé de cycles de charge et de décharge.
- ✓ Peu de pertes thermiques
- ✓ Contrôle/commande du procédé maîtrisé.

Tous ces points doivent être pris en compte lors de la conception et du dimensionnement de l'unité de stockage.

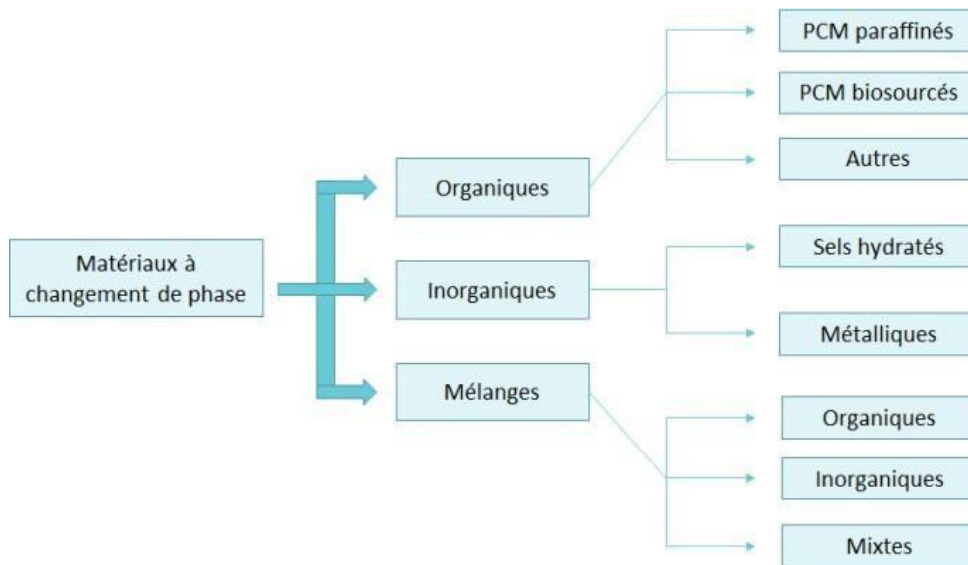


**Fig II.5** : Critères de choix d'une technologie de stockage.



**II.7 Matériaux à changement de phase (MCP) :**

Le matériau à Changement de Phase regroupe des composés et mixtures de différents profils chimiques. Leur caractéristique commune est de présenter une forte chaleur latente de changement de phase et une température de transition adéquate.



**Fig II.6 :** Différents types de MCP existants.

Les matériaux 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[28].

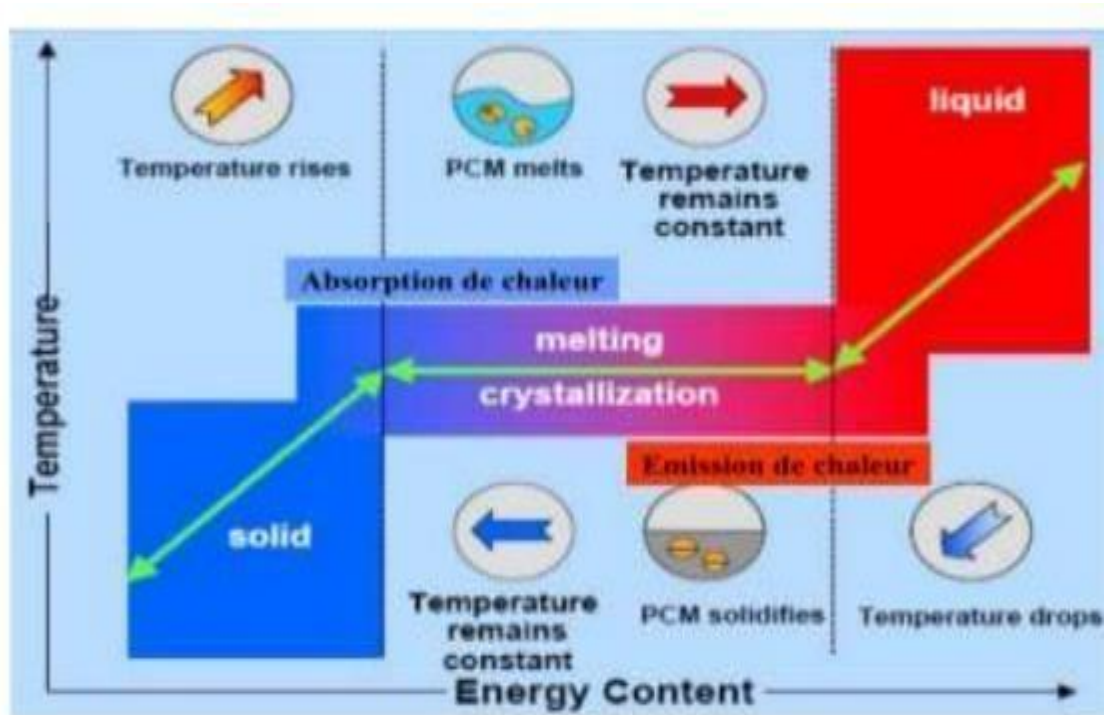
## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

Tableau II.3. Propriétés thermophysiques de certains MCP [29].

Matériaux		Température de fusion (C°)	Enthalpie de fusion (Kj/Kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333,6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique laurique	21	143
PCMs Inorganiques	KF.4H <sub>2</sub> O	18,5	231
	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25,8	125,9
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	32	251
PCMs Eutectiques	66,6%CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+33,3%Mgcl <sub>2</sub> o.6H <sub>2</sub> O	25	127
	48%CaCl <sub>2</sub> +4,3%NaCL+47,3%H <sub>2</sub> O	26,8	188
	47%Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O+53%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	30	136

### **Principe de fonctionnement de MCP :**

Les matériaux à changement de phase utilisent la chaleur latente de changement de phase pour contrôler la température dans une plage spécifique. Lorsque la température dépasse un certain point, Les lisions chimiques dans le matériau va commencer à briser et le matériau absorbe la chaleur dans un endothermique processus ou il passe de l'état solide a l'état liquide. Comme la température baisse, le matériau dégager l'énergie et revenir à l'état solide.



**Fig.II.7:**Principe de fonctionnement des MCP[30].

### II.6.2. Le choix d'un MCP :

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application

Donnée [31] :

#### ✓ 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.

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

---

### **✓ 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.

### **✓ Considérations cinétiques :**

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

### **✓ 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.

### **✓ 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.

### **✓ Considérations économiques :**

- Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

### **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.

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

---

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 [32].

### **Avantages des paraffines :**

- La pression de vapeur de fusion est faible même à des hautes températures.
- Quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire donc elles sont stables chimiquement, mais il faut protéger de l'air pour éviter l'oxydation.
- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg.
- Les cires paraffinées sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion.
- Les cires paraffinées ne présentent aucun danger écologique.

### **Deux principaux inconvénients sont :**

- Les cires paraffinées ont une très faible conductivité thermique, alors cette propriété diminue le taux de stockage et le déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion et solidification.
- Les cires paraffinées s'enflamment facilement.

### **Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage :**

#### **La surfusion :**

La surfusion correspond à l'état liquide d'un corps alors que sa température est inférieure à la température de cristallisation. Elle n'apparaît que pour certains types de MCP comme les matériaux inorganiques (des sels hydratés). Les solutions pour remédier à ce problème sont multiples:

- ✓ Incorporation d'additifs tensio-actifs.

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

---

- ✓ Faciliter la nucléation au moyen de cristaux solides stables autour de la température de cristallisation: ceux-ci servent de points d'accroche pour la cristallisation du matériau.
- ✓ Garder une zone froide à l'intérieur du matériau La surfusion empêche l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase à la température évolue. A l'inverse, dans certaines applications, la surfusion peut être un avantage [33].

### **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 [34].

### **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 [34].

## **Les applications des MCP pour le stockage de l'énergie thermiques :**

### **Applications médicales :**

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang et organes. Récipients usagé pour ce travail des buts semblable à ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussinets chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps [35].

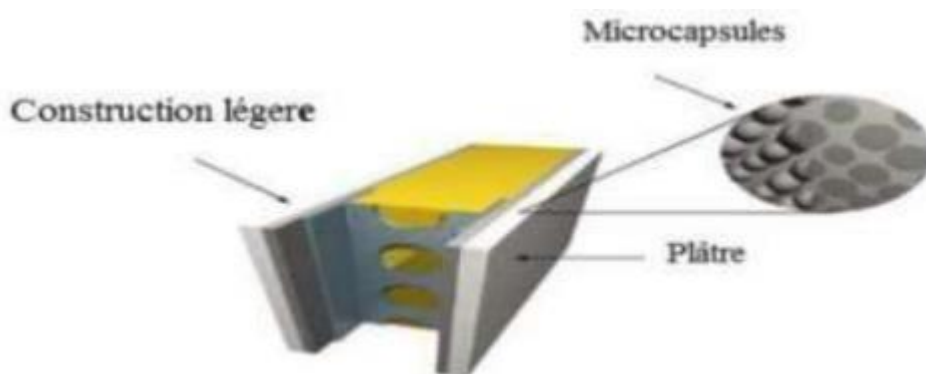


**Fig.II.8:** Récipients transporter sang et organes qui contiennent MCP.

### **Les applications des MCP dans le bâtiment :**

- Les plaques de plâtres-MCP :

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit par ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP [36].



**Fig.II.9:** Modèle de mur contenant une plaque de plâtre-MCP [36].

- Les murs trombes à base de MCP :

## ***CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase***

---

Différents MCP ont été expérimentés pour avoir le meilleur rendement thermique d'un mur trombe à base de MCP : Les différents travaux de ont montré que les murs trombe à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou plastique que les murs trombe traditionnels. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels.

### **Les MCP dans les rideaux :**

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer [35].



**Fig.II.10:** Rideaux à MCP.

### **II.8 Technologies des échangeurs**

La charge d'un système de stockage s'accompagne de la fusion du MCP, tandis que la décharge s'accompagne de la solidification. Un système est dit totalement chargé ou déchargé si le MCP est entièrement fondu ou solidifié, respectivement. Une notion importante, qui va être utilisée dans la suite, est celle de distance caractéristique de solidification. Il s'agit de l'épaisseur maximale de la couche solide de MCP dans un système donné, lorsque celui-ci est complètement déchargé. Cette grandeur est définie



## CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

comme étant le rapport du volume de MCP sur le volume total, interne, du système. Il s'agit donc uniquement du volume de MCP, du fluide caloporteur et de l'échangeur s'il y en a un. Il n'est pas tenu compte de l'épaisseur des parois externes, de l'isolant, des distributeurs. Cette variable a pour objectif de rendre possible une comparaison des technologies d'échangeur en terme de densité énergétique. A volume équivalent, elle permet de définir quel échangeur contient le plus de MCP. Mathématiquement, cette variable est définie telle que [38] :

$$CF = \frac{V_{MCP}}{V_{MCP} + V_{\text{échangeur}} + V_{FC}} \quad [\text{II.6}]$$

Le passage de l'état solide à l'état liquide se fait progressivement et s'accompagne d'une variation d'enthalpie et de viscosité. Parfois, le changement d'état s'accompagne d'une modification optique : certains composés sont ainsi opaques et blancs à l'état solide et transparent à l'état liquide (Figure II.11).

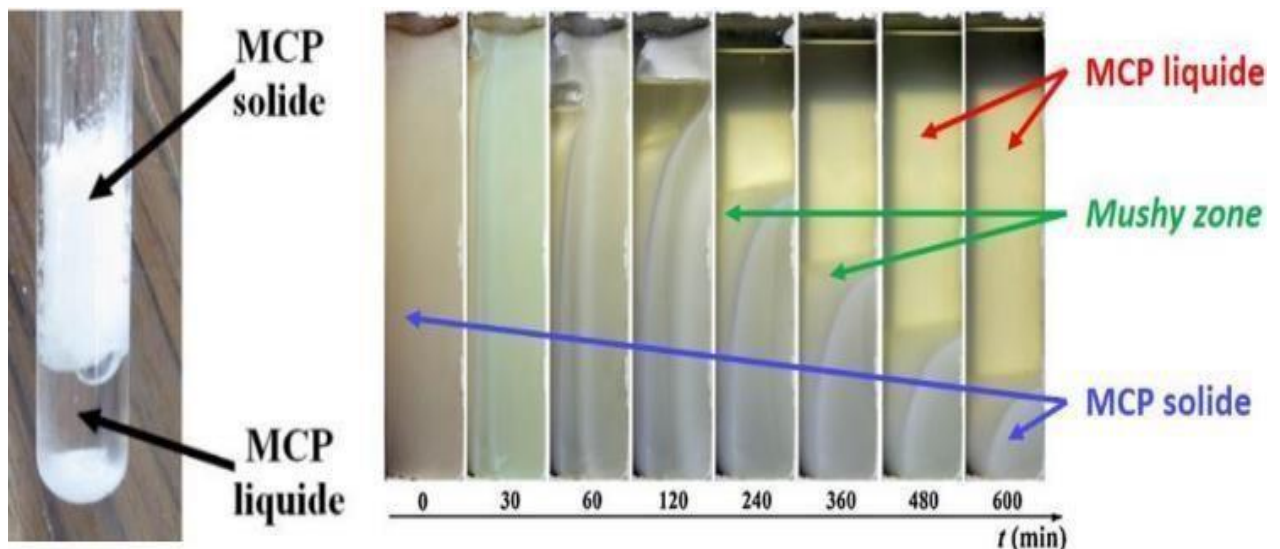
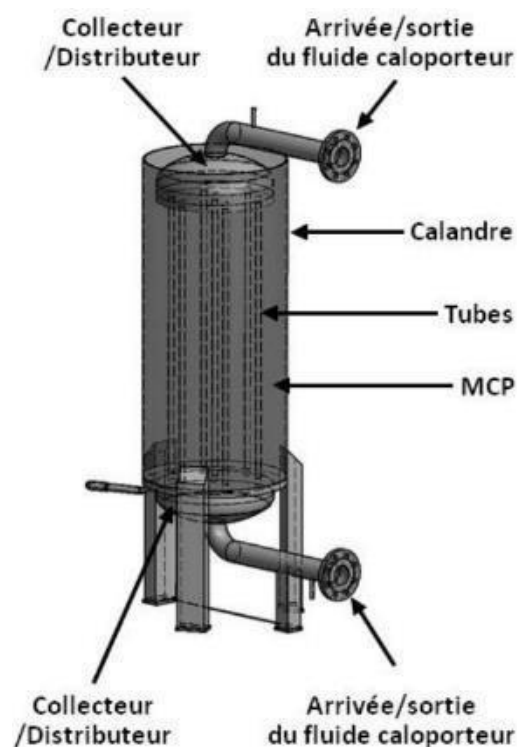


Fig II.11 : Visualisation de la fusion d'une paraffine.

**Echangeurs « tubes et calandre » :**

## CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase

Cette technologie d'échangeur est bien connue : une calandre dans laquelle circule un fluide est parcourue par un faisceau de tubes dans lesquels un autre fluide s'écoule. Les deux fluides échangent de l'énergie par conduction à travers l'épaisseur des tubes. Dans le cas du stockage thermique cette technologie est adaptée (Figure II.12), il n'y a plus d'échange entre deux fluides en mouvement, mais entre un fluide caloporteur qui circule dans les tubes et le MCP qui est fixe dans la calandre.[40]



**FigII.12** : Exemple de système de stockage de type tubes et calandre [38].

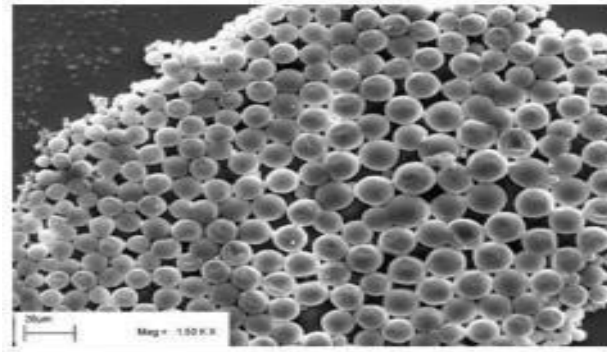
### Echangeurs avec MCP encapsulé :

L'encapsulation d'un MCP consiste à confiner celui-ci à l'aide d'un revêtement ou à le placer dans un module fermé. Selon qu'il s'agit de nano, micro ou macroencapsulation on les dimensions mises en jeu ne sont pas les mêmes et les procédés utilisés diffèrent. La micro-encapsulation de MCP est l'ensemble des méthodes physiques, chimiques et physico-chimiques visant l'obtention de particules micrométriques, généralement sphériques ou s'en approchant, composées d'une

## **CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase**

---

enveloppe très fine et élastique au sein de laquelle se situe un MCP. L'enveloppe se doit d'être élastique afin d'absorber les dilatations thermiques et l'expansion volumique induite par le changement de phase.[40]



**Fig II.13** : Microcapsule de paraffine.

### **Echangeurs à plaques :**

Comme les systèmes à tubes et à calandre, les échangeurs à plaques traditionnels sont modifiés pour pouvoir être utilisés comme système de stockage. Au lieu d'être parcourus par deux fluides caloporteurs, il n'y a plus qu'un fluide caloporteur qui s'écoule dans l'échangeur à plaques et qui vient échanger de l'énergie avec le MCP (un canal sur deux). Ce système peut être assimilé à de la macro encapsulation de MCP dans les plaques d'un échangeur.[40]

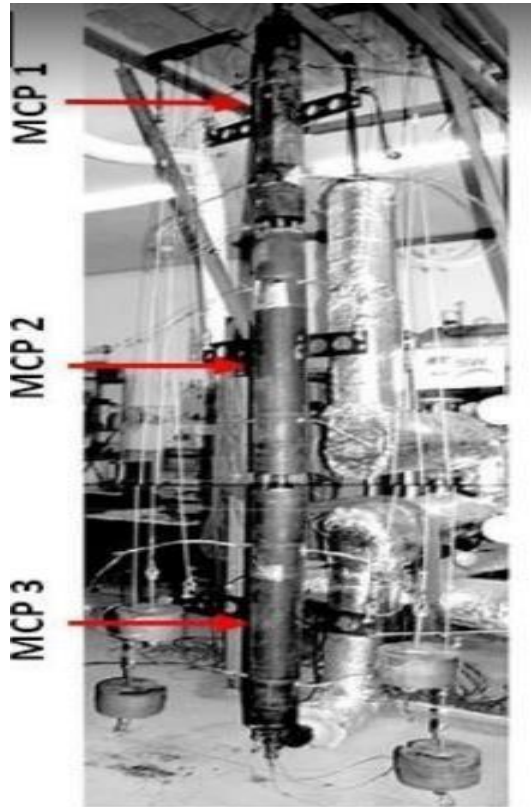
### **Echangeurs avec MCP en cascade :**

Cette technologie, comme les suivantes, ne sont pas à proprement parlé des technologies d'échangeur à part entière. Ce sont des alternatives et des variations de systèmes existants. Chaque MCP a une température de changement d'état bien définie, en utilisant plusieurs MCP disposés « en cascade » dans l'installation, les performances thermiques sont améliorées. Par exemple, si le fluide caloporteur arrive à une température  $T_1$  et échange de l'énergie avec un MCP qui fond à  $T_2 < T_1$ , si le système est bien conçu, le fluide caloporteur parcourt une certaine distance avant de se retrouver à  $T_2 + \delta T$ . Les échanges thermiques avec le MCP qui fond à  $T_2$  sont alors très faibles. En plaçant juste derrière un autre MCP qui va fondre à  $T_3 < T_2$ , les

## ***CHAPITRE 2 : Généralité sur le stockage thermique et les matériaux à changement de phase***

---

échanges thermiques vont de nouveau être rendus possibles et les systèmes en trouve globalement optimisé. Une telle méthode permet de maintenir la température du fluide caloporteur à un niveau plus constant.[40]



**Fig II.14 :** Système « en cascade » [39].

### **Conclusion :**

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie. Ce stockage d'énergie peut être effectué au moyen de matériaux à changement de phase (MCP). On considère que la paraffine est la plus largement répandue tel que sa capacité thermique élevée, sa faible température de fusion, etc.....

**Chapitre III**  
**Procédure expérimentale**

### III. 1 Introduction

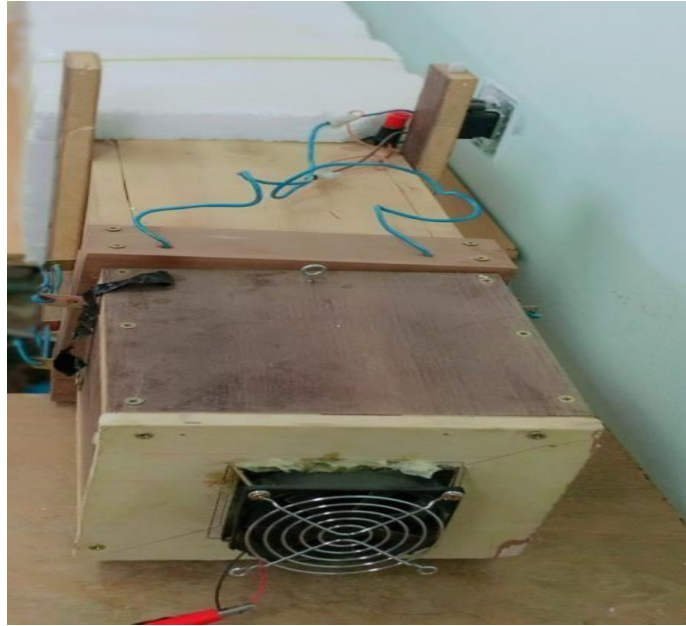
Dans de ce chapitre, on va présenter tout d'abord le banc d'essai utiliser dans notre étude expérimentale sur le stockage d'énergie thermique réalisé au sein du laboratoire du recherche ETAP de l'université de Tlemcen. On présente aussi les matériels utilisés pour le fonctionnement, le contrôle et l'instrumentation des différentes expériences.

#### Banc d'essai



**Fig. III.1** : Banc expérimental

Le banc d'essai utilisé comporte une unité de stockage thermique avec deux canaux d'entrée et sortie fabriqué en bois (Figure III.1). Les dimensions du banc est d'une longueur de 200cm, une largeur de 14.6cm et une épaisseur de 2cm. L'isolation du système est assurée avec du polystyrène d'épaisseur de 4 cm pour minimiser les pertes de chaleur pendant les manipulations. Un ventilateur électrique est placé à l'entrée du canal pour créer un courant d'air forcé dans l'unité de stockage (Figure III.2).



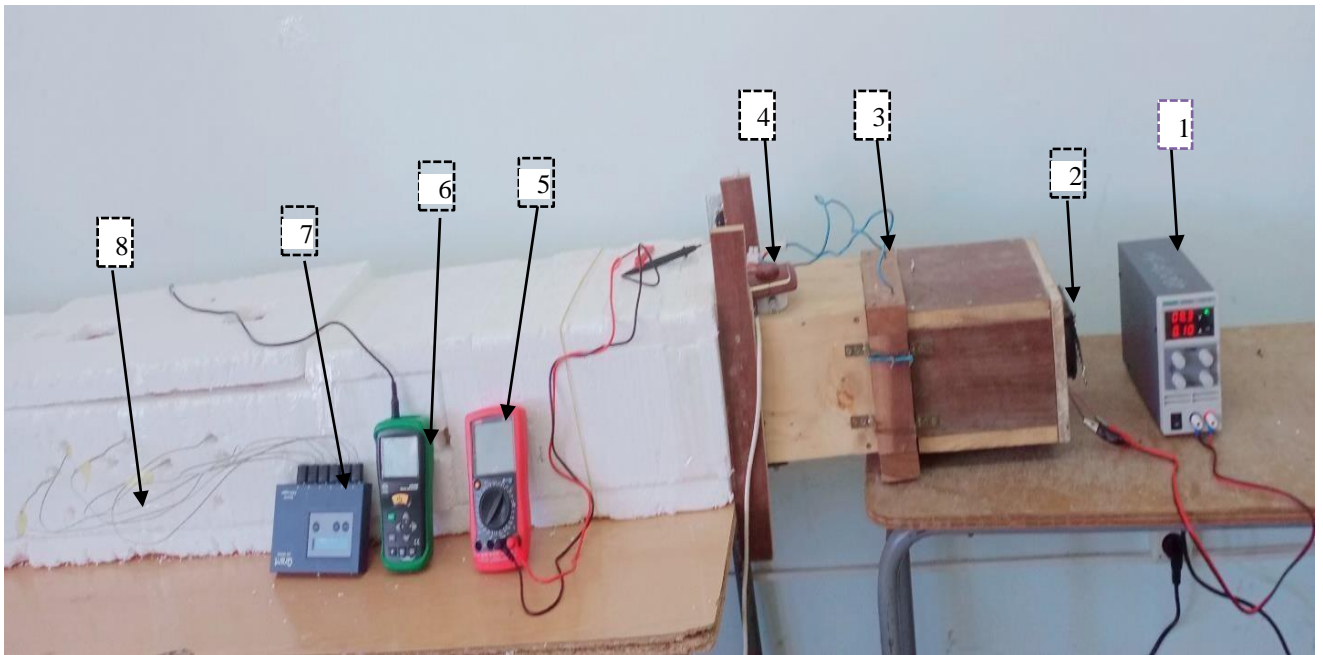
**Fig. III.2 : Vue côté du banc d'essai**

La partie supérieure de l'unité s'ouvre facilement pour faciliter l'emplacement du matériau de stockage (zone du stockage). L'unité est située à 90cm de l'entrée, d'une forme rectangulaire de 50cm de longueur, 17 cm de largeur et 13 cm de hauteur (Figure III.3).



**Fig. III.3 :Zone de stockage**

**Description de l'installation :**



- 1 : variateur de tension et courant 2 : ventilateur  
3 : résistance chauffante 4 : variateur électrique pour la résistance chauffante  
5 : multimètre 6 : anémomètre  
7 : enregistreur des températures 8 : thermocouple

**Fig.III.4 :** Réalisation expérimentale du stockage thermique.

Le travail consiste à étudier le comportement thermique durant les phases de stockage et de déstockage d'un stockeur d'énergie thermique par la chaleur latente en utilisant un MCP comme matériau de stockage. L'unité de stockage est munie de capsules remplies de paraffine (zone de stockage) utilisée comme MCP. À l'entrée, un ventilateur est placé pour générer de l'air forcé dont la vitesse est contrôlée directement par un variateur.

Une résistance électrique placée juste après le ventilateur sert à chauffer l'air. Elle est reliée à sa puissance. L'évolution de la température est enregistrée à l'aide de thermocouples (placées dans différents endroits du stockeur) reliés à un enregistreur à six voies.



### Capsules utilisées

On propose d'étudier le stockage d'énergie thermique en utilisant un matériau à changement de phase contenu dans des capsules de forme cylindrique (Fig. III.5). Ces capsules sont utilisées dans le domaine médical . Les capsules sont de dimensions (L=75mm et R=0.75mm)



**Fig III.5 :** Capsules utilisées.



**Fig. III.6 :** Paraffine (Tétracosane).

Le matériau à changement de phase utilisé dans les expériences est une paraffine appelée Tétracosane, dont le point de fusion est compris entre 49 et 54 °C. Les propriétés thermo-physiques de la paraffine sont représentées sur le tableau III.1 :

Tableau III.1. Propriétés thermo-physiques de la paraffine :

Symbole	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_l$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$L_f$ [kJ/kg]	$\lambda$ [W/m.K]	$C_p$ [kJ/kg.K]
Valeur	912	769	176	0.2	2

Tableau III.2. Propriétés thermo-physiques de l'air :

Symbole	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [kJ/kg.K]	$\lambda$ [W/m.K]
Valeur	1.293	1006	0.0234

**Matériels utilisés**

**a. Ventilateur**



**Fig III.7 : Ventilateur**

Un ventilateur placé dans un boîtier en bois est utilisé comme support pour créer un débit d'air à l'entrée du banc d'essai.

**b. Résistance**



**Fig ; III.8 :Résistance chauffante**

Un cadre en bois dur fabriqué en résistant aux fortes températures de longueur 16.5cm, de largeur 14cm et d'épaisseur de 3cm est utilisé pour support pour les fils de résistance électrique . Cette résistance représente la source de chaleur est raccorder au cadre par des vis en forme de crocher fixer à l'intérieur du cadre.

**c. Variateur pour le ventilateur**



**Fig. III.9 :** Variateur de courant

Un variateur de tension et de courant permet de faire varier la vitesse du ventilateur en contrôlant sa tension d'alimentation de 0-30 V.

**d. Interrupteur variateur**



**Fig. III.10 :** Interrupteur variateur.

Un potentiomètre est utilisé pour contrôler l'intensité du courant électrique vers les fils de la résistance chauffante.

**e. Anémomètre**



**Fig. III.11 :Anémomètre.**

L'anémomètre à hélice est un instrument de mesure de la vitesse du vent par la rotation d'une hélice à axe horizontal ou vertical.

**f. Multimètre**



**Fig III.12 :Multimètre**

Un multimètre numérique est un outil de test qui sert à mesurer au moins deux valeurs électriques, principalement la tension (volt), le courant (ampère) et la résistance (ohm).

### g. Enregistreur de température



**Fig. III.13** : Enregistreur de température

L'appareil d'enregistrement des températures mesure et enregistre en même temps les températures de chaque position des thermocouples pendant le stockage et le déstockage

### h. Thermocouples

Nous avons utilisées 6 thermocouples de Types K pour mesurer la température de l'air et de la paraffine remplie dans les capsules. Ils sont liés directement à l'enregistrement dans différentes positions de banc d'essai à savoir,  $T_{in1}$  à l'entrée de la chambre de stockage,  $T_1$  dans la capsule au milieu de la première rangée,  $T_2$  et  $T_3$  dans deux capsules de la deuxième rangée,  $T_4$  dans la capsule au milieu de la dernière rangée et enfin  $T_{out}$  température de l'air à la sortie de la chambre de stockage.

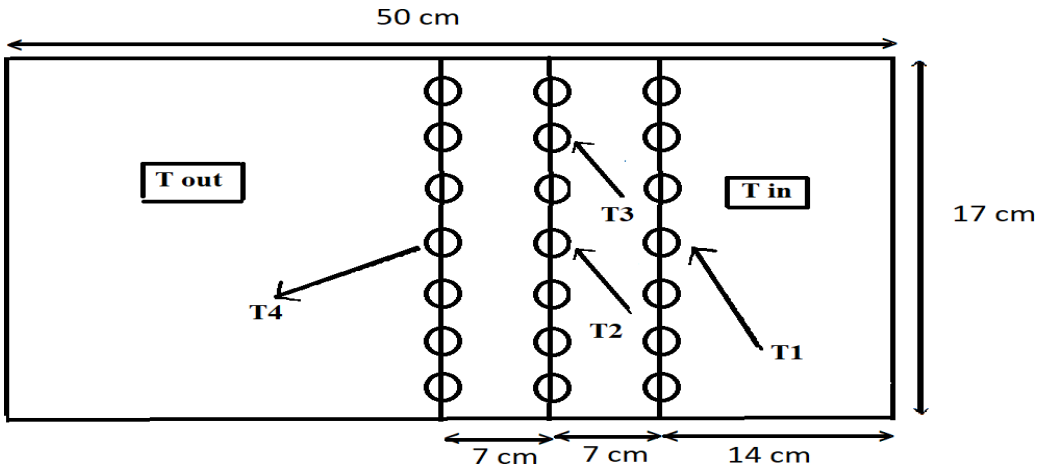
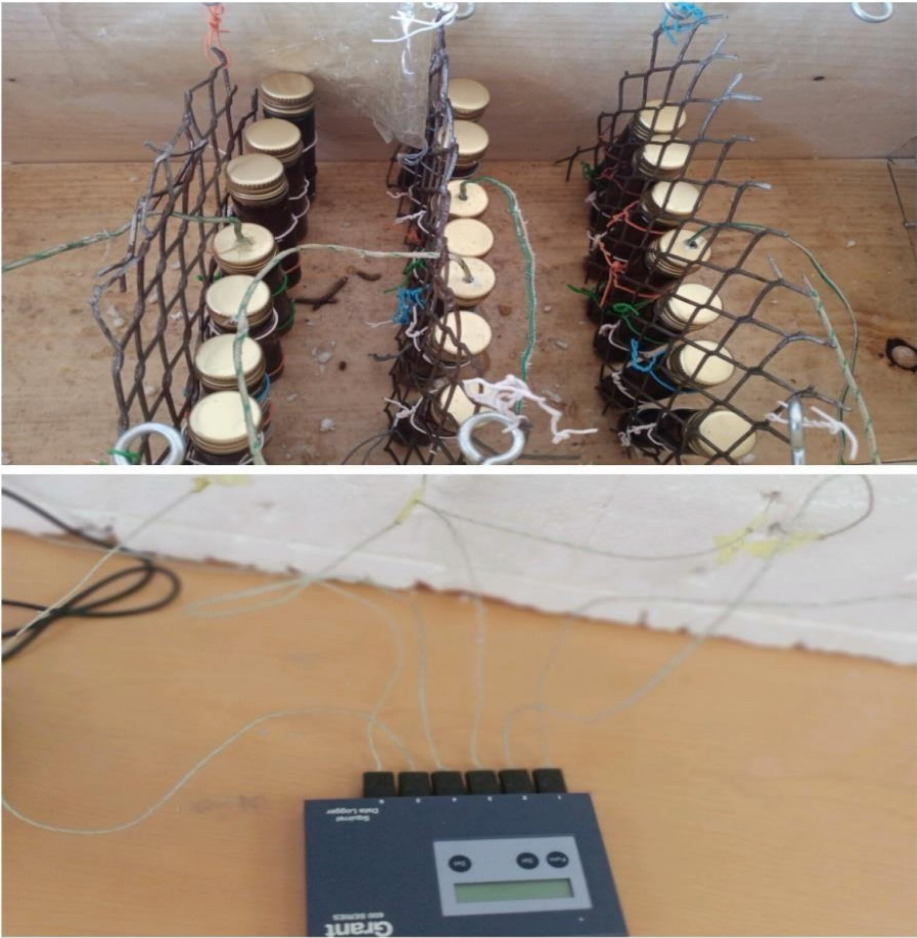


Fig III.14 : Emplacement des thermocouples.

### Remplissage des capsules

On a mesuré 7 capsules vides et 7 capsules remplies de la paraffine pour pouvoir tirer la masse moyenne de la paraffine dans une seule capsule qui est égale à 10.89 g (Fig. III.15).



**Fig III.15 :** Poids de 7 capsules vides.

Après la fusion de la paraffine dans une casserole, la paraffine liquide est remplie dans les capsules.



**Fig. III.16 :** Chauffage de la paraffine à l'aide d'une résistance variable.





**Fig. III.17 :**Paraffine liquide.



**Fig. III.18 :** Remplissage de la paraffine dans les capsules.



**Fig. III.19 :** Poids des capsules remplies de la paraffine

Nous avons fixé ces capsules avec des fils sur plusieurs rangées de sept (7) capsules chacun.



**Fig. III.20:**Fixation des capsules.



**Fig. III.21:** Emplacement des capsules dans la chambre de stockage.

### **III.6.Choix de la température d'entrée de l'air**

Le fait de travailler avec des capsules en plastique, on risque d'avoir une déformation de ces dernières à cause d'une température élevée(Fig. III.22). Pour éviter ce problème, plusieurs tests ont été effectués au début des expériences. Afin de déterminer la température maximale d'air à l'entrée (température de fonctionnement).



**Fig. III.22:**Déformation des capsules

### III. 7 Présentation du logiciel utilisé

Le logiciel SquirrelView est un progiciel universel qui est inclus avec chaque nouvel enregistreur de données Grant Squirrel. Son interface intuitive, conviviale et de type tableur permet une configuration rapide de l'enregistreur de données pour n'importe quelle application, téléchargement rapide des données et exportation directe vers Excel™.

SquirrelView Plus offre des avantages supplémentaires tels que des analyses graphiques des données et des options avancées.

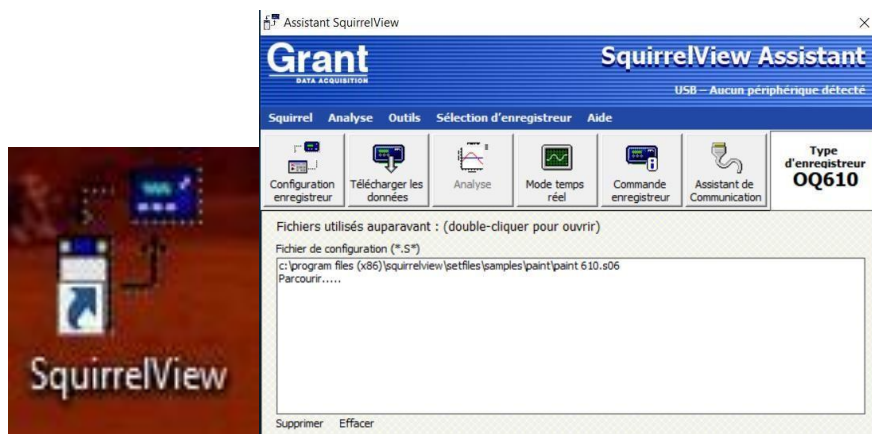


Fig. III.23 :LogicielSquirrelView.

**Chapitre IV**  
**Résultats et interprétations**

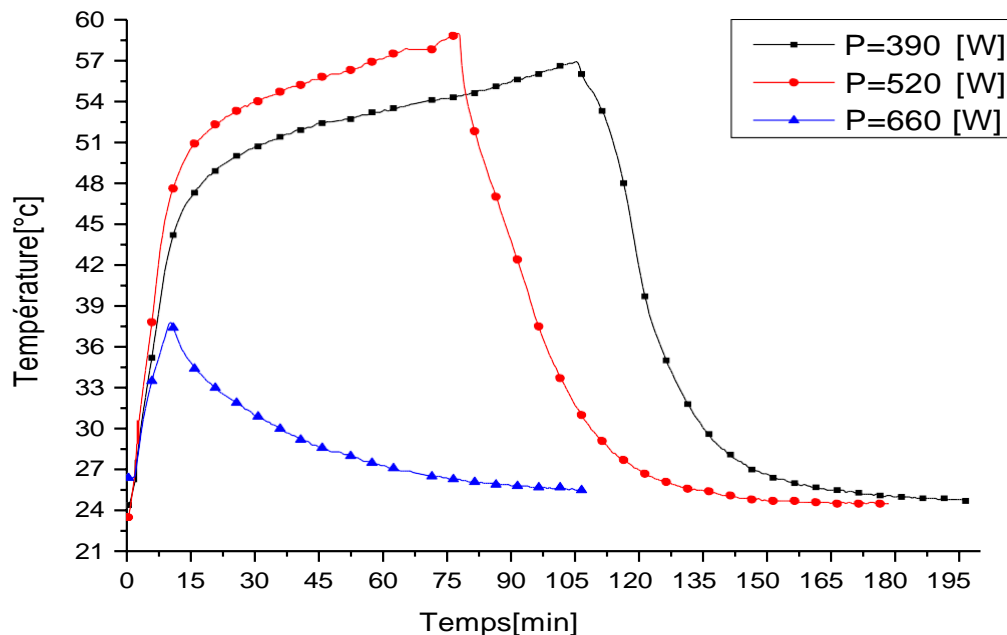
### Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours des expériences effectuées et la discussion des différents phénomènes thermiques prélevés afin de mieux comprendre le processus de stockage et de déstockage par la chaleur latente. Des capsules cylindriques sont utilisées comme un milieu de stockage du MCP (paraffine). Plusieurs essais ont été effectués au début des expériences afin d'assurer le bon fonctionnement de nos expériences, il se résume a:

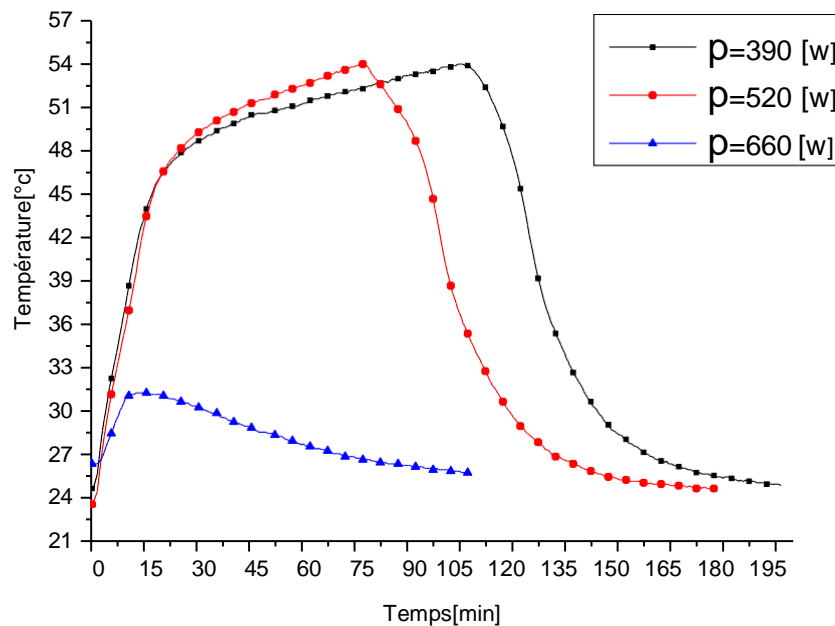
- L'emplacement des thermocouples ;
- La puissance de la résistance qui chauffe l'air d'entrée ;
- La Vitesse de circulation d'air;

Nous avons aussi fixé, la valeur de 68°C comme une température maximale d'entrée d'air  $T_{inl}$  située juste à l'entrée de la zone de stockage. Au-delà de cette température, il y a risque de déformation des capsules.

### IV. 2 Effet de la puissance de la résistance



**Fig. IV.1 :** Evolution temporelle de la température de la paraffine ( $T_{max}$ ) à un débit de l'air de 0.018 kg/s pour trois différentes puissances.

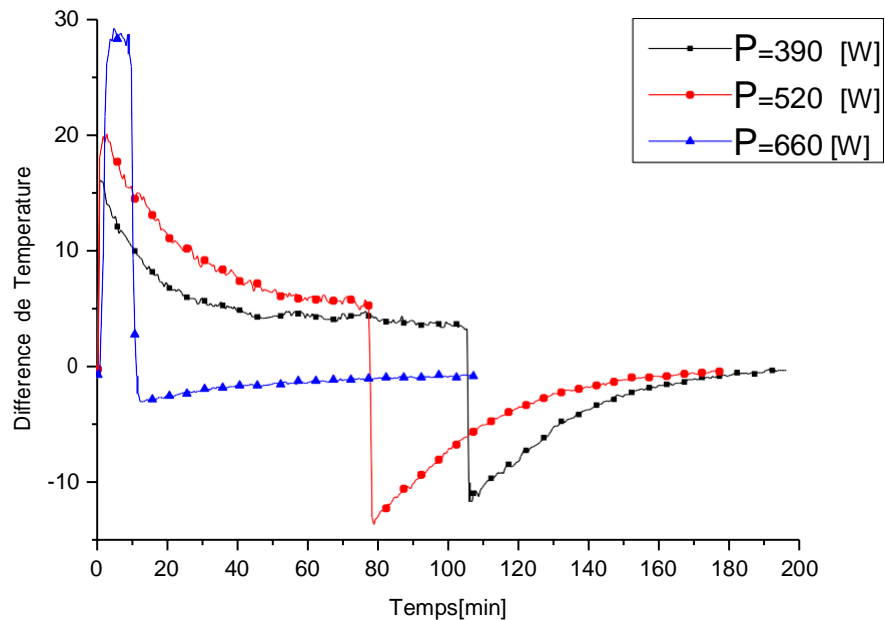


**Fig IV.2 :** Evolution temporelle de la paraffine ( $T_{min}$ ) à un débit de l'air de 0.018 kg/s pour trois différentes puissances.

Les Figures IV.1 et IV.2 montre l'effet de la puissance (390 W, 520 W et 660 W) sur l'évolution de la température du matériau de stockage au niveau de  $T_{max}$  et  $T_{min}$  pour un débit d'air de 0.018 kg/s. Les figures IV.1 et IV.2 montrent que  $T_1$  est la température maximale des capsules et  $T_3$  est la température minimale lors de la phase de stockage. En effet, le positionnement de ces deux capsules puisque  $T_1$  se trouve à l'entrée plus proche à l'arrivée de l'air chaud (1<sup>ère</sup> rangée) et l'autre  $T_3$  dans la deuxième rangée près de la paroi. Lors de la phase de stockage, les températures au niveau de  $T_{max}$  augmentent avec l'augmentation de la puissance et atteignent 56.9 °C après 105.5 min pour la puissance 390 W, 59 °C après 77 min pour une puissance 590 W et 36.6 °C après 2.83 min pour la puissance 660 W.

Lors de la phase de stockage, les températures au niveau de  $T_{min}$  augmentent avec l'augmentation de la puissance et atteignent 54°C après 125.5 min pour la puissance 390 W, 54 °C après 87 min pour une puissance 520 W et 30.2 °C après 8 min pour la puissance 660 W.

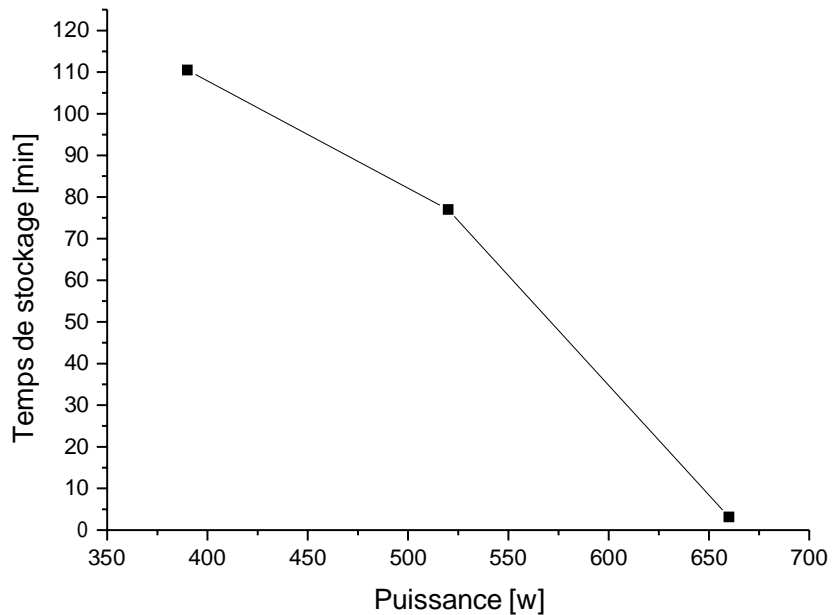
Durant la phase de déstockage, l'augmentation de la puissance entraîne un déstockage lent du stockeur. Pour les puissances (390W et 520W), le déstockage est plus rapide.



**Fig.IV.3 :** Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différentes puissances et un débit de 0.018 kg/s

La figure IV.3 illustre l'effet de la puissance sur l'écart de température entre l'entrée et la sortie d'air. L'écart de la température atteint 27, 20 et 17°C pour les puissances de 390, 520 et 660W, respectivement. Il est clair que l'augmentation de la puissance entraîne l'augmentation de l'écart de température et donc une augmentation de la quantité de chaleur stockée.





**Fig.IV.4 :** Evolution du temps de stockage en fonction de puissance .

La figure IV.4 présente l'évolution du temps de stockage en fonction des trois puissances. Le temps de stockage décroît ainsi avec l'augmentation de la puissance fournie avec un débit de 0.018 kg/. Une puissance de 520W la puissance optimale de fonctionnement puisqu'elle offre moins du temps pour le stockage en évitant d'atteindre la température de déformation. En plus, toutes les capsules atteignent la température de fusion de la paraffine (54 °C). Par contre, la température  $T_{in}$  a atteint la température de la déformation après juste 2.83 min pour une puissance de 660 W.

Effet du débit de l'air

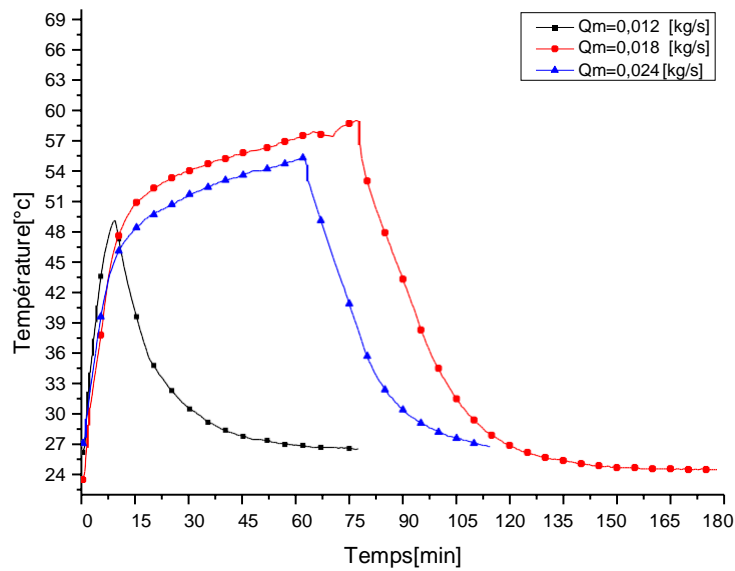


Fig IV.5 : Evolution temporelle de la température de paraffine ( $T_{max}$ ) à une puissance de 520W pour différents débits

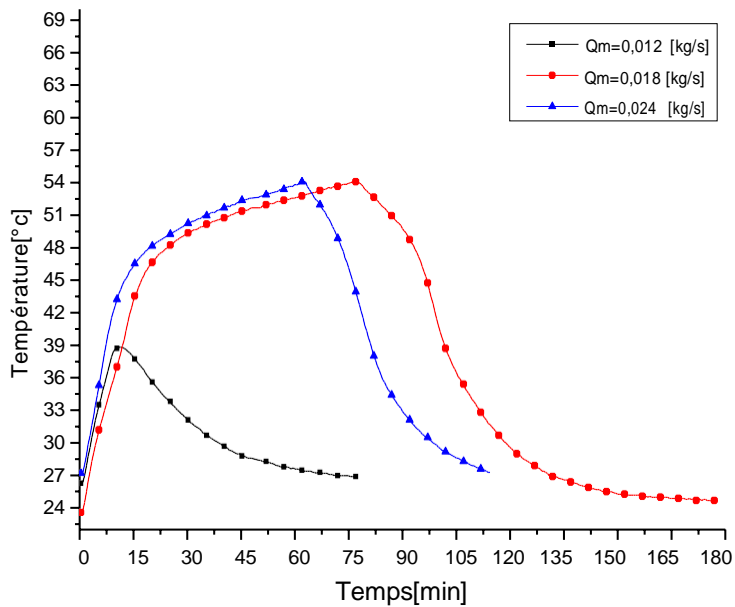
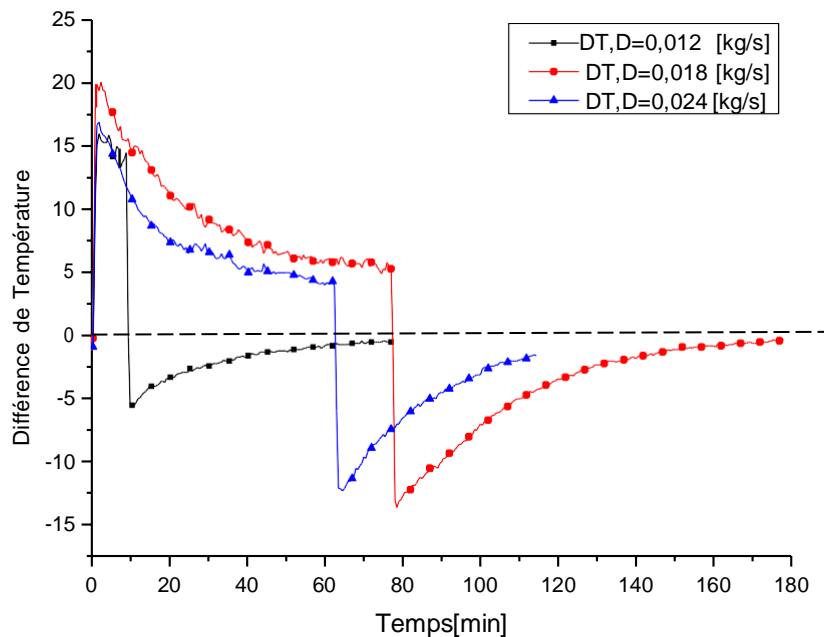


Fig.IV.6 : Evolution temporelle de la paraffine ( $T_{min}$ ) à une puissance de 520 W pour différents débit

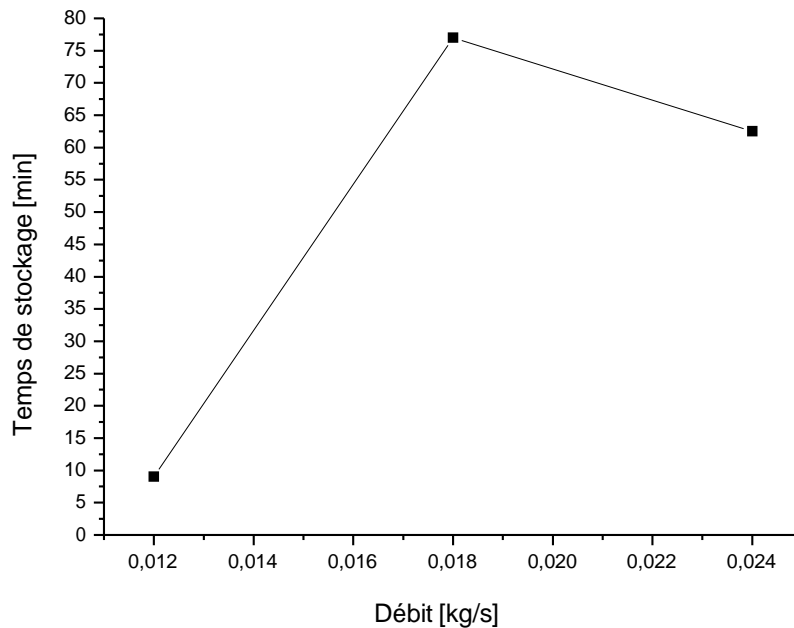
## CHAPITRE 4: Résultats et interprétations

Les figures IV.5 et IV.6 montrent l'effet du débit d'air (0.012Kg/s, 0.018Kg/s et 0.024Kg/s) sur l'évolution de la température du matériau de stockage au niveau de  $T_{\max}$  et  $T_{\min}$ . Pour un débit 0.012 kg/s, on remarque que la température maximale  $T_{\max}$  atteint 49°C au niveau de la première rangée alors la température minimale atteinte 37.9°C. Avec l'augmentation du débit à (0.018 kg/set 0.024 kg/s), la température maximale monte à  $T_{\max}$  (55.3°C et 59°C) et celle minimale à  $T_{\min}$  (54°C pour les deux).

Ainsi, l'augmentation du débit permet d'augmenter la température de la paraffine et donc la chaleur stockée. En effet, l'augmentation du débit d'air permet d'augmenter la chaleur véhiculée vers les capsules dans les différentes rangées.



**Fig.IV.7 :** Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différents débits et une puissance de 520W.



**Fig.IV.8 :** Evolution du temps de stockage en fonction des trois débits .

La Fig IV.7 montre l'évolution temporelle de la différence de température d'air entre l'entrée et la sortie pour différents débits et une puissance de 520 W. Avec un débit d'air de 0.018 kg/s, la différence de température est plus importante en comparaison avec les autres débits 0.012 kg/s et 0.024 kg/s. Le temps de stockage est le plus faible de 9 mn avec le premier débit étudié 0.012 kg/s puis 77mn et 62.5 mn pour et 0.018 kg/set 0.024 kg/s. Avec le premier débit 0.012 kg/s, la température  $T_{in}$  atteint à la température de déformation des capsules de la première rangé alors que les autres capsules ne sont pas arrivées à la température de fusion de la paraffine. Avec les débits 0.018 et 0.024 kg/s, le temps de stockage est suffisant pour la fusion du MCP de toutes les capsules. Avec 0.024 kg/s, assure un temps de stockage mais la différence de température d'air est plus important avec 0.018kg/s. On conclue que 520 W et 0.018 kg/s désigne net leurs valeurs optimales de fonctionnement de notre stockeur.

Effet du nombre des rangées

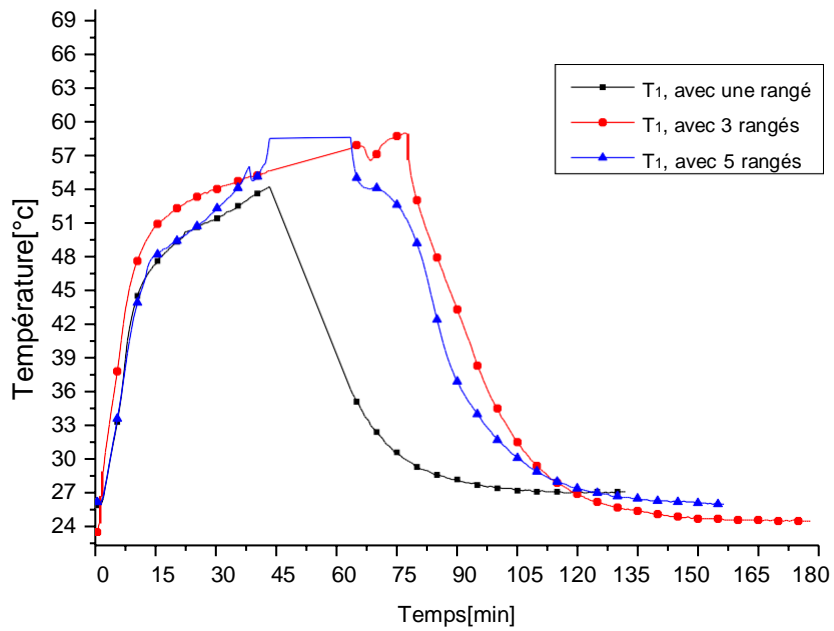


Fig.IV.9 : Evolution temporelle de la température de la paraffine  $T_{max}$  des 3 cas de rangées.

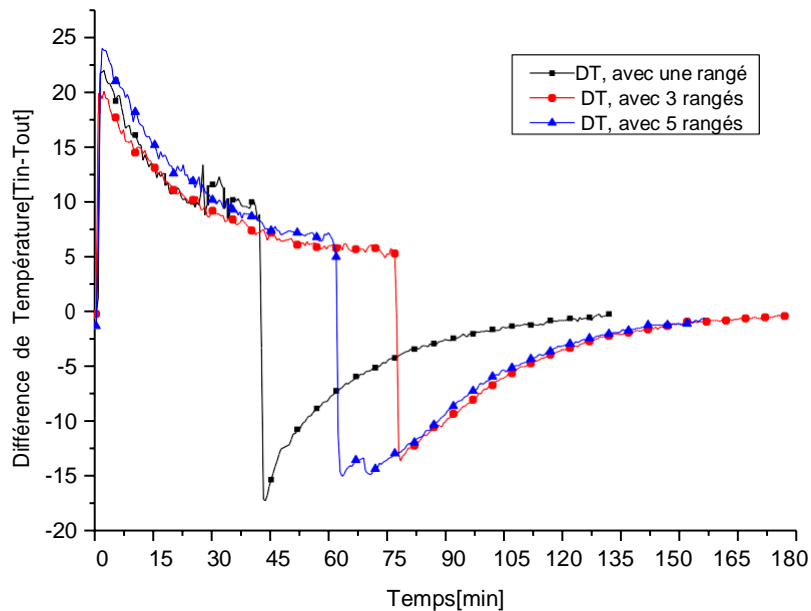
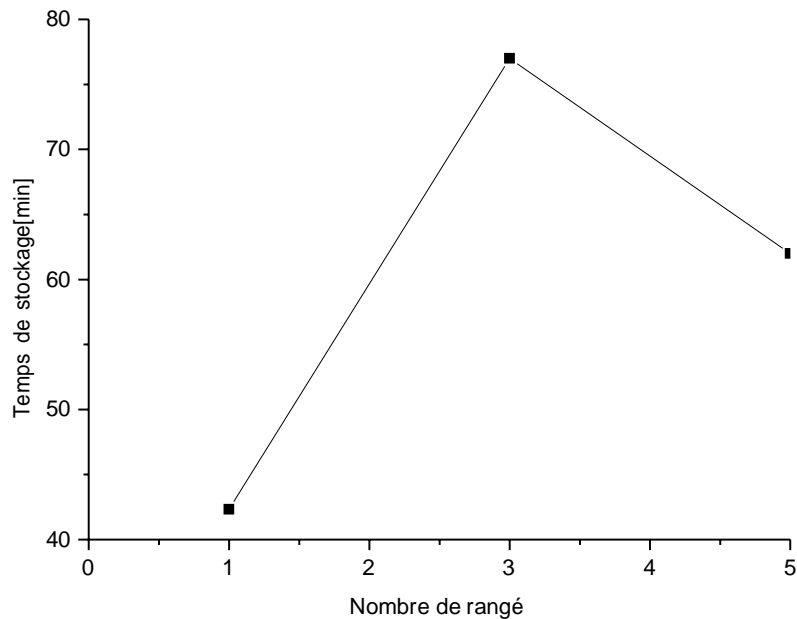


Fig.IV.10 : Evolution temporelle de la différence de température d'air pour différents cas de rangée.



**Fig.IV.11** : Evolution du temps de stockage en fonction du nombre de rangé

Les figures IV.9 et IV.10 montrent l'effet du nombre de rangées Durant le stockage et le déstockage pour un débit de  $0.018 \text{ Kg/s}$  et une puissance de  $520 \text{ W}$  sur l'évolution de la température maximale de la paraffine et l'écart de température d'air entre l'entrée et la sortie. Nous remarquons que 5 rangées offrent une différence de température plus importante et donc une augmentation de la chaleur stockée. Cependant, 3 rangées offrent un temps de stockage plus important indiquant l'effet important du comportement thermo-hydraulique. En effet, l'augmentation des rangées augmente simultanément la masse du milieu de stockage et les forces de frottement engendrées.

**Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Ce travail porte sur l'étude expérimentale du phénomène de stockage et de déstockage de l'énergie thermique par chaleur latente. Le stockeur est réalisé dans le laboratoire de recherche « Energétique et Thermique Appliquée ETAP » de notre université. Les expériences traitent l'effet de la puissance thermique fournie, du débit massique du fluide caloporteur et l'effet du nombre des rangées des conteneurs cylindriques. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats

1. L'augmentation de la puissance augmente la quantité d'énergie stockée et prolonge le processus de déstockage.
2. L'augmentation de la puissance entraîne l'augmentation de la différence de température du fluide caloporteur et donc une augmentation de la quantité de chaleur stockée.
3. Les expériences montrent qu'une puissance de 520 W est optimale puisqu'elle offre moins de temps pour le stockage et éviter d'atteindre la température de déformation des conteneurs cylindriques.
4. L'augmentation du débit permet d'augmenter la température de la paraffine et donc la chaleur stockée. Par l'augmentation du débit d'air permet d'augmenter la chaleur véhiculée vers les capsules dans les différentes rangées.
5. Avec 0.024 kg/s, il y a moins de temps de stockage mais la différence de température d'air est plus importante avec 0.018kg/s.
6. L'utilisation de 5 rangées offre une différence de température plus importante et donc une augmentation de la chaleur stockée. Cependant, 3 rangées offrent un temps de stockage plus important indiquant l'effet important du comportement thermo-hydraulique.

En perspective, nous proposons d'étudier différentes formes de conteneurs et de traiter les cas de MCP en cascade



**Références bibliographiques**

- [1] **H.AitAdine ,H.El Qarnia**, Numerical analysis of the thermal behavior of a shell-and-tube heat storage unit using phase change materials, *Appl. math, mod*, vol.33,p- 2132-2144, avril 2009.
- [2] **D.Zhoua, C.Y.Zhao**, Experimental investigations on heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous materials, *Appl.Therm.Eng*, p- 970-977,décembre2010.
- [3] **H.Bah**, étude des effets de l'épaisseur de la paraffine sur la performance d'un chauffe-eau solaire a changement de phase, laboratoire d'Energétique Appliquée, Ecole supérieure Polytechnique, Université cheikh Anta Diop, B.P : 5085, 2010.
- [4] **Y.B.Tao et Y.L.He**, Numerical study on thermal energy storage performance of phase change material under non-steady-state inlet boundary, *Appl Eng*,vol.88,p-4172-4179,21 décembre2010.
- [5] **W.Foudhil et all**, Simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un canal poreux : Analyse des performances et comparaison",2eme Congres de l'Association Marocaine de Thermique, avril 2012.
- [6] **V. V. Tyagi et all**, Thermal performance evaluation of a solar air heater with and without thermal energy storage",vol.107,p.1345–1352,2012.
- [7]**M.Avci et M.Yusuf Yazici**, Experimental study of thermal energy storage characteristics of a paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit, fevrier",Vol. 73, p-271-277,2013.
- [8] **S.Zakaria**, Analyse du transfert de chaleur dans un système de stockage mixte chaleur sensible et chaleur latente, mémoire de master, génie mécanique option systèmes énergétiques et thermiques Université Saad Dahlab de Blida“ ”p.65, 2013.

- [9] **M.Groune**, Etude d'un stockage thermique mixte (chaleur sensible et chaleur latente), mémoire de master en génie mécanique option énergies renouvelable Université Saad Dahlab de Blida“ ”, p-68, 2014.
- [10] **S.Bellan ,J.Gonzalez-Aguila et All**, Numerical analysis of charging and discharging performance of a thermal energy storage system with encapsulated phase change material”, vol.71,p.481-500,octobre 2014.
- [11] **R.Elbahjaoui.,H.EL Quarnia**, Optimisation d'une unité de stockage d'énergie solaire par chaleur latente de fusion utilisant la cire de paraffine(PRAFFIN WAX P116)”,Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Sem la lia Marrakech Maroc,24 Avril 2015.
- [12] **L.Solomon, A.F El mozugui.et All**, Effect of internal void placement on the heat transfer performance –Encapsulated phase change material for energy storage? vol.78,p.438-447,2015.
- [13] **F.Benmoussa,H.Benmoussa et all**, Stockage de L'énergie Thermique: Effet des parametriques physique et géometriques sur les performances de stockage, Universite de Batna, Octobre 30-31, 2016.
- [14] **A.Parida , A.Bhattacharya ,P.Rath**, Effect of convection on melting characteristics of phase change material-metal foam composite thermal energy storage system”,vol.32,p.101808,juin 2020.
- [15] **R.Kothari, A.Ahmad et All**, experimental analysis of the heat transfer rate of phase change material inside a horizontal cylindrical latent heat energy storage system”,vol.5,p.208-216, 26 Octobre 2021
- [16] **D.E. Beasley and C. Ramanarayan**, Thermal Response of Packed Bed of Spheres Containing a phase change material, International Journal of Energy Research, 13, 253-265, 1989.

- [17] **A. Benmansour and M.A. Hamdan**, Simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe de sphères contenant un matériau à changement de phase, *Revue d'Énergie Renouvelable*, 4, 125-134, 2001.
- [18] **M. Mahfoudi**, Stockage de la chaleur dans un milieu granuleux solide .doctorat en sciences : Génie mécanique option : Energétique. Université Mohamed khider Biskra faculté des sciences et de la technologie département : Génie Mécanique .. p147 , 2016
- [19] **L. Telkes**, Thermal storage for heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Charttes ville, Virginia, USA.1975
- [20] **M. MAZMAN**, Latent Heat Storage and Applications, thèse , Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish) 11, 2006
- [21] **H.Lane** Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles. USA: CRC.Turkish, 1983
- [22] **A.SHARMA et all**, Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materails and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 318-345. 2009
- [23] **D.ĐNÇER, Đ., ROSEN**, Thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and SonsPublishing Company, New York, USA. 2002
- [24] **H.Mehling et L.F.Cabeza**, Heat and cold storage with PCM, Springer - Verlag BerlinHeidelberg ed 2008.
- [25] **T. Bauer, D. Laing, et R. Tamme**, Characterization of Sodium Nitrate as Phase Change Material, *Int J Thermophys*, vol. 33, no. 1, pp. 91-104, 2012.
- [26] **H. Zhang, R. M. J. Van Wissen et all**, Characterisation of sugar alcohols as seasonal heat storage media - experimental and theoretical investigations, 2014.

- [27] **M. Pierre Pardo**, Développement D'un procédé de stockage d'énergie thermique haute température par voie thermochimique, Doctorat de l'université de toulouse , lundi 9 décembre 2013. p139.
- [28] **M. Mohammed et al**, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45, 2004, pp 1597–1615.
- [29] **S. Blaise et al**, 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.
- [30] **M. Larnicol** , Stocker de la chaleur avec les Matériaux à changement de phase- Ghislenghien 2009.
- [31] **N. Bellavance**, Comment fonctionne un caloduc ?", <http://horyax.fr/comment-fonctionne-un-caloduc.html>, 12/4/2012, Date d'accès: 20/5/2016.
- [32] **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.
- [33] **L.F. Cabeza, M. Ibanez et al**, Experimentation with a water tank including a PCM module, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, pp.1273-1282, 2006.
- [34] **L.F. Cabeza, A. Castell et al**, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1675-1695, 2011
- [35] **A. Sharma, V.V. Tyagi et al**, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 318-345, 2009.

- [36] **C.Y. Zhao et G.H. Zhang** , Review on microencapsulated phase change materials(MEPCMs): Fabrication, characterization and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 3813-3832, 2011.
- [37] **D. Laing, T. Bauer et all**, Development of high temperature phase-change-material storages, *Applied Energy* 109 497-504 2013.
- [38] **M. Medrano, M. O. Yilmaz et all**, "Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems" *Applied Energy* 86 2047-55 2009.
- [39] **H. Michels et R. Pitz-Paal**, Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants, *Solar Energy* 81 829-37 2007.
- [40] **M. Martinelli**, Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur ,*Mécanique des fluides, Energétique et Procédés* ,Université Grenoble Alpes ,2016.