

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 أبي بكر بلقايد  
تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté par :

SAOULI Kaouthar et SALHI Fatima Zahra

**Amélioration de la fusion de la paraffine en  
utilisant des additifs en aluminium:  
Etude Expérimentale**

Sujet

Soutenu publiquement, le 05 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

M. SAIM. R	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M. GUELLIL. H	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. KORTI. A. N	Professeur	Univ. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme. SAIB. H	MAA	Univ. Tlemcen	Examinatrice



*Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions vivement et chaleureusement **Mr. Guellil. H** notre encadreur et **Mr. Korti. N** notre co-encadreur , pour nous avoir soutenus et guidés tout au long de ce mémoire.*

*Nous remercions tous nos enseignants qui nous ont orientés dans notre parcours d'étude de licence et de master sans oublier le chef de département **Mr Benramdane Mohammed**.*

*Mes remerciements vont aux **Mr.Saim. R** et **Mm. Saib. H** membres de jury qui ont pris soin d'examiner le travail présenté dans ce mémoire. Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, et ceux qui ont fait l'honneur de jurer ce mémoire.*





*Malgré qu'aucune dédicace ne serait témoin de mon profond amour, mon immense gratitude et mon plus grand respect, car je ne pourrai jamais oublier la tendresse et l'amour dévoué par lesquels ils m'ont toujours entouré depuis mon enfance*

*Je tiens à dédier ce modeste travail avant tout a **ma très chère mère**, la femme qui ma donné le désir d'apprendre et de savoir vivre, ma fierté et mon bonheur, Celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation*

*A **mon cher père** qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les miracles*

*A ma très cher sœur **Sanaa** et son mari **Amine***

*et mon frère **Ilyes** et sa femme **Lynda***

*qui ont toujours étaient la pour moi*

*A ma tante **Salima** et sa fille **Reham***

*Et mes profonds sentiments vont vers ma très chère amie et ma binome **Fatima***

*A mes copines*

*Et enfin ce travail est en hommage a*

*Nos bonbines **Abderrahmane** et **Saad ddine***

**KAOUTHAR.**





*A mes parents **medjahed** et **zahra** ;*

*Que dieu les garde pour qu'ils nous inondent comme toujours par leur  
Éternel amour et générosité, qu'ils trouvent dans ce travail le résultat d'une  
Éducation pleine d'indulgence et le fruit de leur effort et leur sacrifice.*

*A mes sœurs **hanane** et **meriem** et mes frères **abdeloifi** et **abdelhak**  
Et mes profonds sentiments vont vers ma très chère amie et ma binome **kawther**  
Pour leur encouragement et leurs soutiens.*

*A tous mes cousins et cousines*

*A tous mes amis ;*

*Pour leur dévouement et leurs perpétuels encouragements*

**FATIMA.**



## Résumé

Le stockage est une méthode importante pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation stable entre l'énergie requise et l'énergie fournie. La première étape de ce travail consiste à fabriquer un banc expérimental sous forme d'une cavité thermique rectangulaire fabriquée en métal et dans laquelle sont réalisées différentes expériences sur la fusion de la paraffine. Une interface de mesure est développée avec LabVIEW pour la gestion de mesures expérimentales. La seconde étape s'articule sur l'amélioration du processus de changement de phase de la paraffine tout en ajoutant des additifs d'aluminium dans la paraffine afin d'améliorer la conductivité thermique et par la suite, l'amélioration du processus de changement de phase.

**Mots clés :** fusion, paraffine, convection, MCP, changement de phase, LabView.

## ملخص

يعد التخزين طريقة مهمة للإدارة المثلى للطاقة الحرارية. إنه يجعل من الممكن تكييف الإنتاج مع الاحتياجات وتهيئة أفضل الظروف لهذه الإدارة من خلال تحقيق علاقة مستقرة بين الطاقة المطلوبة والطاقة الموردة. تتمثل الخطوة الأولى في هذا العمل في صنع مقعد تجريبي على شكل تجويف حراري مستطيل مصنوع من المعدن ويتم فيه إجراء تجارب مختلفة على ذوبان البارافين. تم تطوير واجهة قياس باستخدام LabVIEW لإدارة القياسات التجريبية .

تدور الخطوة الثانية حول تحسين عملية تغيير تم تطوير واجهة قياس باستخدام LabVIEW لإدارة القياسات التجريبية الطور للبارافين مع إضافة الألومنيوم إلى البارافين من أجل تحسين التوصيل الحراري وبالتالي تحسين عملية تغيير الطور.

**الكلمات المفتاحية:** الذوبان, البارافين, الحمل الحراري, MCP, تغيير المرحلة, LabView .

## Abstract

Storage is an important method for optimal management of thermal energy. It makes it possible to adapt production to needs and to create the most favorable conditions for this management by achieving a stable relationship between the energy required and the energy supplied. The first step of this work is to make an experimental bench in the form of a rectangular thermal cavity made of metal and in which various experiments on the melting of paraffin are carried out. A measurement interface is developed with LabVIEW for the management of experimental measurements. The second step revolves around improving the phase change process of the paraffin while adding scrap aluminium into the paraffin in order

to improve the thermal conductivity and subsequently, improving the process of changing the phase.

**Keywords:** fusion, paraffin, convection, PCM, phase change, LabView.

# Sommaire

---

Résumé

## Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature et abréviation

Introduction générale..... 1

### *Chapitre I: Revue bibliographique*

1. Introduction .....	4
2. Travaux antérieurs .....	4

### *Chapitre II: Stockage de l'énergie thermique et les MCP*

1. Introduction .....	20
2. Matériau à Changement de Phase (MCP).....	20
2.1. Types des Matériaux à Changement de Phase .....	21
2.1.1. Les MCP inorganiques .....	21
2.1.2. Les MCP organiques .....	23
2.1.3. Les MCP eutectiques .....	26
2.1.4. Etude comparative des composés organiques, inorganiques et eutectiques .....	27
2.2. Les problèmes liés au changement de phase .....	28
2.2.1. La ségrégation.....	28
2.2.2. La corrosion.....	29
2.2.3. La surfusion.....	29
2.2.4. La dilatation .....	29
2.2.5. La surchauffe.....	29
2.3. Choix de MCP .....	29
2.3.1. Critères thermodynamiques.....	29
2.3.2. Critères cinétiques.....	30
2.3.3. Critères chimique .....	30
2.3.4. Critères économiques .....	30
2.4. Amélioration de la conductivité des MCP .....	30
3. stockage thermique .....	31
3.1. stockage thermique par chaleur sensible .....	31
3.2. stockage thermique par chaleur latente .....	33
3.2.1. Les avantages du stockage par chaleur latente.....	35
3.2.2. Importance du stockage thermique latent .....	35
3.3. Stockage thermochimique .....	35
3.4. Les principales applications du stockage de l'énergie .....	36
3.4.1. Les capteurs solaires à eau .....	36
3.4.2. Les capteurs solaires à air.....	37

# Sommaire

---

3.4.3.	Les fours solaires .....	37
3.4.4.	Le textile .....	37

## *Chapitre 3 : Procédure expérimentale*

1.	Introduction.....	39
2.	Description du dispositif expérimental .....	39
3.	Méthodes de réalisation.....	40
3.1.	Préparation de l'enceinte MCP .....	40
3.2.	Matériaux à changement de phase MCP .....	41
3.3.	positionnement des thermocouples .....	42
4.	Logiciel utilisé .....	44
4.1.	Présentation de l'interface LabVIEW .....	45
4.2.	Description du logiciel .....	47
5.	Expériences menées .....	48
5.1.	Paraffine seule .....	48
5.2.	Utilisation des additifs en aluminium.....	48

## *Chapitre 4:Résultats et interprétations*

1.	Introduction .....	51
2.	paraffine seule.....	51
2.1.	Evolution de la température de la paraffine .....	51
2.2.	Evolution de la fraction volumique .....	52
2.3.	Energie stockée .....	53
2.4.	Energie perdue .....	54
3.	Paraffine avec déchets d'aluminium .....	56
3.1.	Comparaison entre l'évolution les températures .....	56
3.2.	Comparaison de la fraction volumique .....	57
3.3.	Comparaison de l'énergie stockée .....	58
	Conclusion générale et perspectives .....	61
	Références bibliographiques .....	

# Liste des figures

---

## *Chapitre 1: revue bibliographique*

<b>Fig.1.1.</b> Images de mousse métallique (avec différentes tailles de pores) et de paraffin .....	5
<b>Fig1.2.</b> Schéma et photo du dispositif expérimental avec l'ailette en T au contact de la paraffine RT27.....	6
<b>Fig 1.3.</b> Photo de la mousse de cuivre imprégnée par la paraffine .....	7
<b>Fig 1.4</b> Profils de fusion de la paraffine dans l'échangeur à ailettes en cuivre, à différents Instants .....	7
<b>Fig.1.5.</b> Photographies de l'expérience avec la N-octadécane encapsulé dans une sphère et les résultats des simulations .....	8
<b>Fig 1.6</b> Schéma du stockage contenant les capsules de MCP.....	8
<b>Fig 1.7.</b> Simulation des profils de température d'un MCP encapsulé à différents instants Pendant la solidification.....	9
<b>Fig.1.8.</b> Durée du changement de phase complet d'une capsule en fonction de la conductivité thermique du MCP, calculs numériques... ..	9
<b>Fig.1.9.</b> Le vaisseau cylindre-plein (a) et le modèle pour un cylindre (b).....	10
<b>Fig.1.10.</b> Schéma du réservoir multicouche contenant deux MCP.....	11
<b>Fig.1.11.</b> Variation transitoire de la fraction liquide pour différente concentration .....	11
<b>Fig.1.12.</b> Domaine physique .....	12
<b>Fig. 1.13.</b> Solidification avec un vide supérieur retraits pour $D= 70$ mm et $T = 20$ ° C....	12
<b>Fig.1.15.</b> Comparaison de l'interface de phase entre le résultat expérimental et la simulation numérique.....	13
<b>Fig.1.16.</b> Comparaison de l'interface de phase entre le résultat expérimental et la simulation numérique pendant le processus de décharge.....	14
<b>Fig.1.17.</b> Schéma de l'unité TMS de batterie, (a) batterie et son boîtier, et (b) dimensions géométriques et conditions aux limites.....	15
<b>Fig.1.18.</b> Photos instantanés du champ de température et des lignes de courant à des moments représentatifs au régime turbulent.....	15
<b>Fig.1.19.</b> Photos instantanés du champ de température et des lignes de courant à des moments représentatifs de la turbulence régime.....	16

# Liste des figures

---

<b>Fig.1.20.</b> Comparaison des formes des fractions numériques solides et liquides avec l'expérience.....	17
<b>Fig.1.21.</b> Diagramme schématique du système de stockage thermique à lit compact .....	17
<b>Fig.1.22.</b> Evolution des phases solide et liquide pendant la solidification .....	18
<b>Fig 1.23.</b> Photo de la structure en nid d'abeille remplie par une paraffine.....	18

## *Chapitre 2: Stockage de l'énergie thermique et les MCP*

<b>Fig.2.1.</b> Classification des matériaux à changement de phase .....	21
<b>Fig.2.2.</b> Sels Hydratés.....	22
<b>Fig.2.3.</b> Acide gras .....	23
<b>Fig.2.4.</b> Paraffine brutes, en capsulées, ou en huile .....	24
<b>Fig.2.5.</b> Les eutectiques .....	26
<b>Fig.2.6.</b> Les différentes techniques de transfert thermique par MCP.....	28
<b>Fig.2.7.</b> Technologies de stockage d'énergie thermique .....	31
<b>Fig.2.8.</b> Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement de phase.....	32
<b>Fig.2.9.</b> Diagramme d'un changement d'état d'un matériau .....	34
<b>Fig.2.10.</b> Schéma du capteur solaire et de ses différents composants.....	36

## *Chapitre 3 : Procédure expérimentale*

<b>Fig.3.1.</b> Photos des matériels utilisés dans les expériences .....	39
<b>Fig. 3.2a.</b> Cavité thermique .....	40
<b>Fig. 3.2.b.</b> Résistance électrique .....	41
<b>Fig. 3.3.</b> Isolation de la cavité thermique.....	41
<b>Fig. 3.4.</b> Paraffine utilisée comme MCP .....	42
<b>Fig. 3.5.a.</b> Fixation des thermocouples à l'intérieur de la cavité thermique .....	43
<b>Fig. 3.5.b.</b> Positions des thermocouples à l'intérieur de la cavité thermique .....	43
<b>Fig.3.6.</b> Module d'acquisition NI avec les capteurs de température .....	44
<b>Fig.3.7.</b> Interface LabVIEW(face avant).....	45
<b>Fig.3.8.</b> Boucle while .....	46
<b>Fig.3.9.</b> Création du graphe .....	46

## Liste des figures

---

<b>Fig.3.10.</b> Création d'un tableau de données.....	47
<b>Fig. 3.11.</b> Création d'un fichier d'enregistrement des mesures .....	47
<b>Fig.3.12.</b> Paraffine seule .....	48
<b>Fig.3.13.</b> Intégration des additifs en aluminium dans la paraffine .....	49

### *Chapitre 4:Résultats et interprétations*

<b>Fig. 4.1.</b> Evolution temporelle de la température de la paraffine seule .....	51
<b>Fig. 4.2.</b> Evolution temporelle de la fraction liquide de la paraffine seule .....	53
<b>Fig. 4.3.</b> Evolution temporelle de l'énergie stockée par la paraffine seule.....	54
<b>Fig. 4.1.</b> Evolution temporelle de l'énergie perdue .....	55
<b>Fig. 4.5.</b> Evolution de la température de la paraffine avec et sans Aluminium .....	56
<b>Fig. 4.6.</b> Evolution fraction liquide de la paraffine seule et avec l'aluminium .....	58
<b>Fig. 4.7.</b> Evolution de l'énergie stockée de la paraffine avec et sans aluminium .....	59

# Liste des tableaux

---

## *Chapitre 2: Stockage de l'énergie thermique et les MCP*

<b>Tab.2.1</b> . Les avantages et les inconvénients des paraffines .....	25
<b>Tab.2.2</b> . Propriétés thermiques de certains MCP.....	26
<b>Tab 2.3</b> . principaux avantages et inconvénients des MCP organiques, inorganiques et eutectiques .....	27
<b>Tab.2.4</b> . Propriétés thermophysiques des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C.....	33
<b>Tab.2.5</b> . Avantages et inconvénients des différents changements d'états .....	34

## *Chapitre 3 : Procédure expérimentale*

<b>Tab.3.1</b> . Propriétés thermo-physiques de la paraffine (Tétracosane) .....	42
--	----

# Nomenclature et Abréviation

---

## *Abréviation*

*MCP* Matériaux à changement de phase

## *Symboles*

$\rho_s$	Masse volumique de la paraffine à l'état solide (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_L$	Masse volumique de la paraffine à l'état liquide (Kg/m <sup>3</sup> )
$L_f$	Chaleur latente (kJ/Kg)
$\lambda$	Conductivité thermique (W/m.K)
$c_p$	Chaleur spécifique à pression constante (kJ/ (Kg.K))
$T$	Température (°C)
$l_f$	Fraction volumique (%)
$t$	Temps (min)



---

# *Introduction Générale*

---



## Introduction générale

L'un des problèmes majeurs existant dans le monde économique, c'est la gestion des ressources énergétiques et leurs influences sur l'environnement. D'une part, l'exigence d'une sur exploitation réduit les réserves d'énergie d'origine fossile, d'autre part, elle est la cause principale de la production des gaz à effet de serre et par conséquent du réchauffement climatique. Afin de surmonter ce défi, plusieurs laboratoires de recherche, agissent sous l'égide d'agences internationales et œuvrent pour la sauvegarde de l'environnement, l'économie d'énergie, la protection des ressources énergétiques et la promotion des énergies nouvelles et renouvelables non polluantes (solaire, éolienne, etc...) et concentration sur le système de stockage et de récupération.

Parmi les énergies renouvelables, on peut citer l'utilisation de rayonnement solaire qui est associé à des systèmes de stockage d'énergie thermique. En général, stocker de l'énergie consiste à l'emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse (solaire, tarifs de nuit...) pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère. La nature intermittente de l'énergie solaire pose des problèmes de stockage. Il est nécessaire de développer des dispositifs de stockage permettant le transfert d'énergie des périodes excédentaires aux périodes déficitaires et adapter ainsi sa production à sa consommation.

Le stockage d'énergie thermique joue un rôle essentiel dans les différentes applications telles que les bâtiments éco-énergétiques et les centrales électriques. Des problèmes similaires se posent pour les systèmes de récupération de chaleur perdue où la disponibilité de la chaleur perdue et les périodes d'utilisation sont différentes. Les techniques de stockage thermique peuvent être classées comme stockage de chaleur sensible et le stockage de chaleur latente. Le stockage de la chaleur latente est particulièrement intéressant, car il offre une grande densité de stockage d'énergie en stockant l'énergie comme chaleur latente de fusion à température constante (température de fusion du MCP correspondant).

L'utilisation des Matériaux à Changement de Phase (MCP) ont été mis en évidence à plusieurs reprises dans le passé en raison de leur forte densité de stockage et d'un changement de phase à température constante, permettant un taux de transfert thermique plus élevé et plus constant qu'un stockage par chaleur sensible. Le stockage par chaleur latente est une technique largement étudiée pour des applications basées sur du stockage d'énergie d'origine

solaire comprenant un cycle thermique par jour. Ce faible nombre de cycles allonge la durée de retour sur investissement et limite sévèrement son utilisation.

Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à l'étude expérimentale de stockage de l'énergie par chaleur latente dans un matériau à changement de phase dans une enceinte carrée chauffée de deux côtés. Des petites feuilles d'aluminium sont ajoutées à la paraffine pour accélérer sa fusion. Afin d'atteindre l'objectif fixé dans cette étude, on a subdivisé le travail en quatre chapitres.

- ❖ Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les différentes voies de stockage de la chaleur. Il dresse également un état de l'art des différentes méthodes d'intensification des transferts thermiques dans les matériaux à changement de phase.
- ❖ Le second chapitre expose le stockage de l'énergie thermique sous différentes formes basant sur le stockage par la chaleur latente (matériaux à changement de phase) ainsi que la classification des MCP et leurs différentes formes disponibles.
- ❖ Le troisième chapitre porte sur la présentation du dispositif expérimental réalisé, les équipements utilisés et la procédure expérimentale.
- ❖ Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus avec les différentes interprétations et discussions.

En fin dans la conclusion, on donne une synthèse de l'essentiel des résultats obtenus.



---

*Chapitre I*  
*Revue bibliographique*

---



## I. Introduction

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière de l'économie d'énergie. C'est un domaine de recherche qui n'a pas suscité au début beaucoup d'intérêts et ce, jusqu'à la crise énergétique de 1969 et le début des années 80.

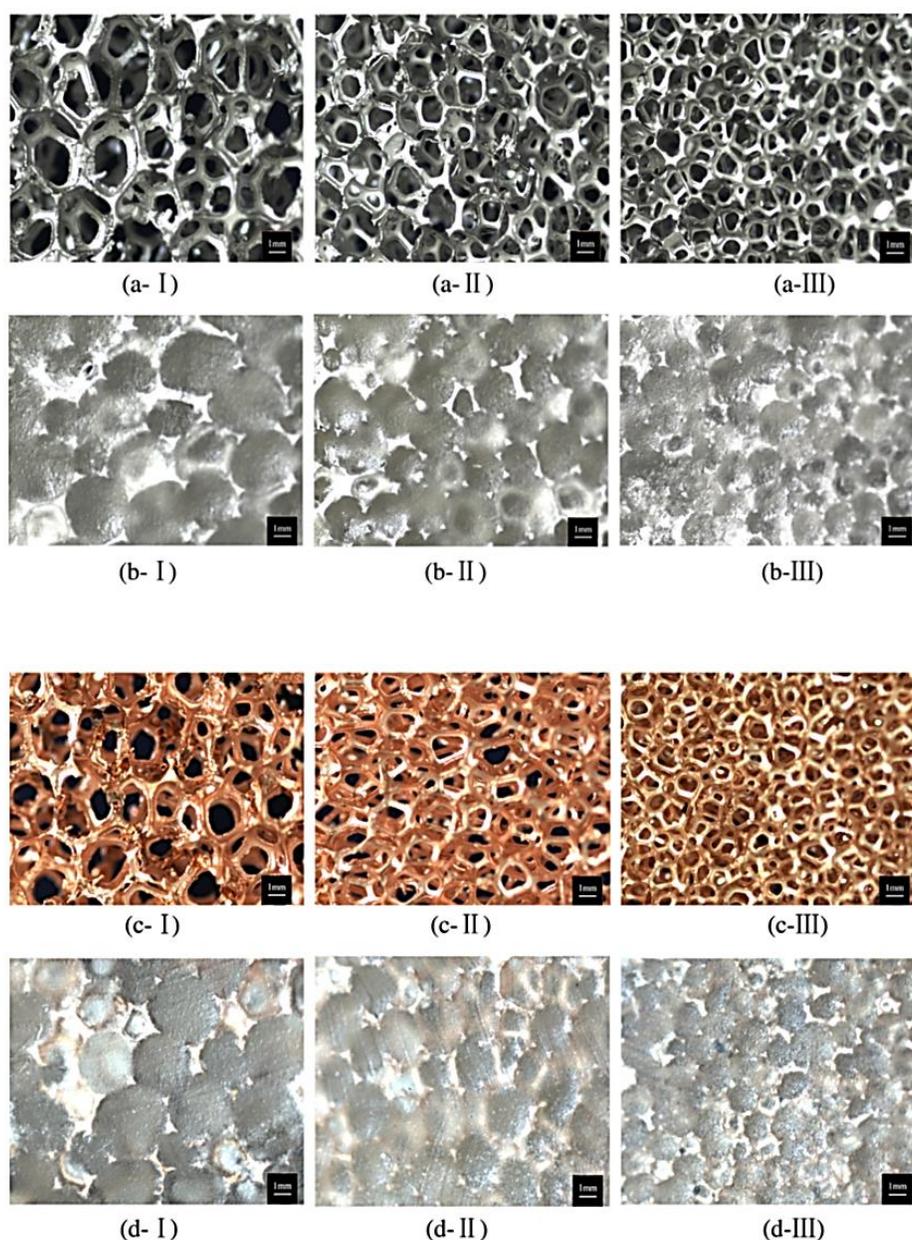
La présente partie de ce chapitre vise à fournir des informations pour cette recherche et donne une compréhension générale sur l'utilisation des MCP.

## II. Travaux antérieurs

**P.Lemberg et al [1]** ont étudié les processus de Fusion et de solidification d'une plaque de paraffine chauffée à partir de deux surfaces latérales. Ils ont montré que le transfert de chaleur lors de la fusion se fait d'abord par conduction puis par convection naturelle qui joue un rôle important dans l'accélération de la fusion. La convection naturelle n'apparaît que si le nombre de Rayleigh est supérieur à 10. Ils ont mis aussi en évidence l'existence d'un coefficient de convection.

**Serradj [2]** a présenté une étude numérique bidimensionnelle du processus de fusion d'un matériau à changement de phase placé à l'intérieur d'une enceinte rectangulaire. Les faces sont isolées thermiquement à l'exception de la face verticale avant qui est chauffée de manière isotherme. Il a considéré que la conduction est le mode de transfert de chaleur qui régit le processus au début de la fusion, suivie par une courte période de transition où la convection naturelle devient le mode de transfert de chaleur dominant dans la phase liquide. Les résultats numériques obtenus à savoir, la position, l'inclinaison et la propagation de l'interface solide liquide ainsi que la fraction fondue, sont en bon accord comparativement avec les résultats expérimentaux.

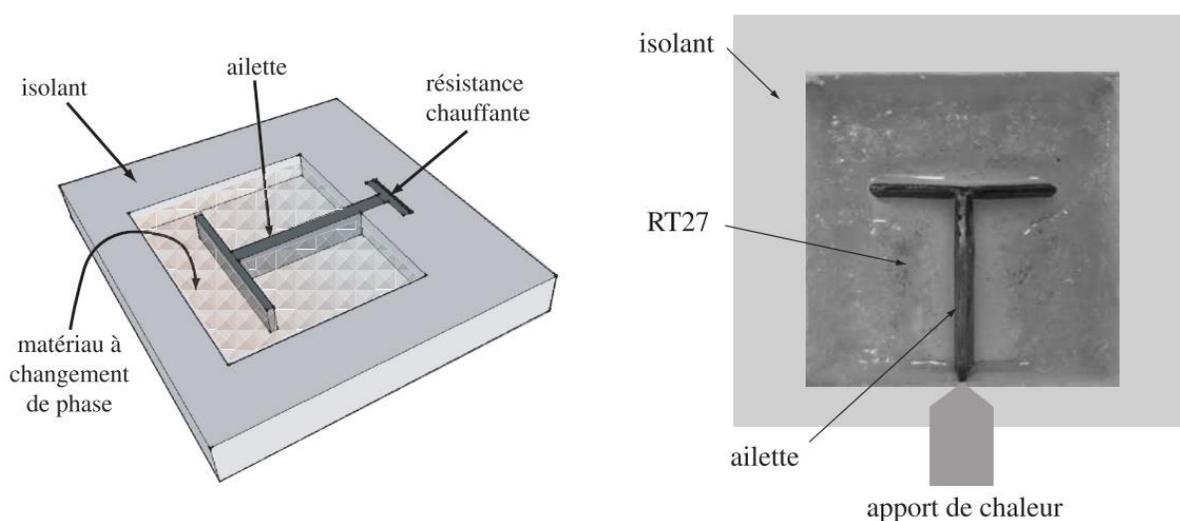
**Xiao et al [3]** utilisent pour le stockage de l'énergie solaire des matériaux composites à changement de phase (MCP) de paraffine avec des mousses de cuivre et de nickel ayant les mêmes porosités et la même taille de pores et le tout est préparé en utilisant une méthode d'imprégnation sous vide (Fig. 1.1). Par rapport à la paraffine pure, les résultats indiquent que les conductivités thermiques des MCP composites de paraffine / mousse de nickel sont près de trois fois plus importantes que celles de la paraffine pure, tandis que les conductivités thermiques des MCP composites de paraffine / mousse de cuivre sont près de 15 fois plus importantes que celles de la paraffine pure. Aussi, les températures de fusion et de congélation des MCP composites de paraffine / mousse métallique changent légèrement par rapport à celles de la paraffine pure. La température de fusion augmente, tandis que la température de congélation diminue (les écarts des températures de pointe de fusion du composite de paraffine / mousse de nickel et du composite de paraffine / mousse de cuivre avec la taille des pores de 25 PPP par rapport à ceux de la paraffine pure étaient de 0,55 ° C et 0,40 ° C, respectivement).



**Fig.1.1. Images de mousse métallique (avec différentes tailles de pores) et de paraffine [3]. (a) mousse de nickel, (b) composites de paraffine / mousse de nickel, (c) mousse de cuivre et (d) composites de paraffine / mousse de cuivre (I: 5PPI, II: 10PPI, III: 25PPI).**

Dans le même axe de recherche, **Huang et al. [4]** ont fabriqué par infiltration par fusion sous vide un composite constitué de l'alcool myristylique (MA, alcool gras) comme MCP avec une mousse métallique (CPCM comme squelette). De plus, les effets de la taille des pores de la mousse métallique sur les performances thermiques ont été analysés et le tout a été comparé avec la mousse de nickel et la mousse de cuivre. Comparativement au MA pur, ils ont découvert que la température de fusion des CPCM a légèrement augmenté, tandis que la température de solidification a diminué. En outre, la chaleur latente des composites MA / mousse métallique a présenté une légère diminution. Les résultats ont montré que les composites maintenaient une bonne stabilité. La conductivité thermique des composites MA / mousse métallique avait une amélioration évidente. Par rapport au MA pur, la conductivité thermique du composite MA / mousse de nickel (40 PPI) et du composite MA / mousse de cuivre (40 PPI) a été augmentée de 1,80 fois et 7,51 fois respectivement. Plus la taille des pores est petite, plus la conductivité thermique est élevée, qui se produit à la fois dans les composites de mousse de nickel et de cuivre.

Les travaux d'Olivès et al. [5] traitent l'amélioration du transfert thermique d'un module de stockage par chaleur latente en étudiant l'impact de l'ajout d'une ailette en cuivre en forme de T ou de Y (Fig. 1.2), ainsi que par l'utilisation d'une matrice poreuse de graphite. Une étude énergétique et entropique a permis de tracer l'efficacité des différentes solutions présentées. De plus, une modélisation numérique est présentée et comparée aux résultats expérimentaux issus d'une thermographie infrarouge. Pour une même quantité de MCP, l'étude a montré que l'intensification du transfert thermique est plus performante en utilisant le graphite à la place des ailettes. Le graphite présente un intérêt fort par rapport aux deux autres configurations testées et permet en effet une génération entropique moindre et mieux répartie.



**Fig.1.2. Schéma et photo du dispositif expérimental avec l'ailette en T au contact de la paraffine RT27 [5].**

Zhao et al. [6] utilisèrent sur la Fig.1.3 une mousse de cuivre, d'une conductivité thermique de 350 W/m.K, une porosité d'environ 95% et le tout est imprégné par une paraffine. Un flux de chaleur est imposé sur la partie inférieure du matériau pour étudier l'écart de température entre la paroi et le matériau à différentes positions. Les résultats de l'étude montrent des performances très supérieures dans le cas avec mousse par rapport à l'emploi seul du MCP. Cependant, la convection naturelle contribue à réduire cet écart lorsque le MCP seul est à l'état fondu. L'influence de la porosité de la mousse, ainsi que la densité de pores ont été étudiées. Ainsi, en multipliant la densité de pores par 3, un gain d'un facteur 2 est obtenu sur le flux de chaleur calculé entre la température de la paroi et la température du matériau à 8 mm de profondeur. Ce gain a été encore amélioré lorsque la porosité de la mousse passe de 95 à 85 %. D'une autre part, un modèle numérique en deux dimensions est développé, utilisant une équation de transfert pour chaque milieu (métal ou PCM). Le modèle ne prend pas en compte la convection du MCP dans les pores de la mousse métallique et permet une bonne modélisation du transfert thermique dans le matériau en comparaison des résultats expérimentaux. Cependant, un léger écart de température est observé lors de la fusion du matériau, ceci est dû à l'hypothèse du modèle prenant en compte une fusion à température fixe plutôt qu'une plage de température (observée en réalité).



**Fig.1.3. Photo de la mousse de cuivre imprégnée par la paraffine [6].**

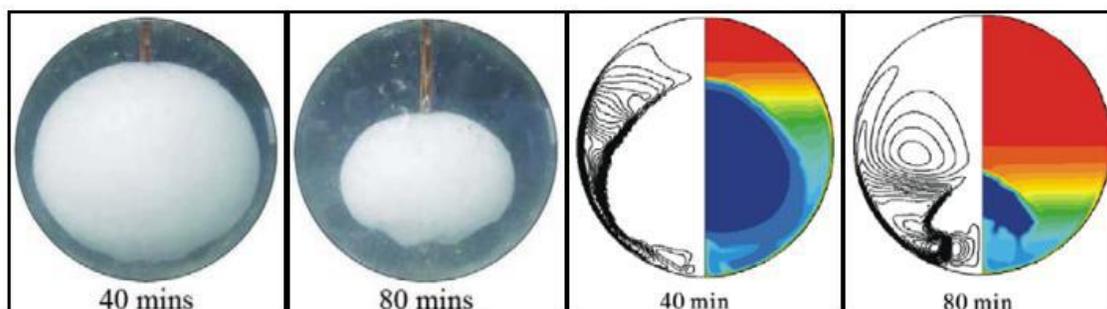
**Xavier Py et al [7]** a étudié expérimentalement le processus de la fusion de la paraffine dans un échangeur à ailettes en cuivre. Les premiers essais ont été effectués en utilisant de l'huile comme fluide caloporteur. Un nombre de Prandtl de 160 et un nombre de Reynolds de 1830 ont été calculés pour l'écoulement considéré. La Fig.1.4 présente l'évolution du profil de fusion de la paraffine dans l'échangeur à ailettes en cuivre. Il a été observé indépendamment du sens d'écoulement du fluide, que la fusion a toujours lieu du haut vers le bas. Ce phénomène est dû à la convection dans le MCP fondu et à la plus faible densité de la paraffine en phase liquide.



**Fig.1.4. Profils de fusion de la paraffine dans l'échangeur à ailettes en cuivre, à différents instants [7]**

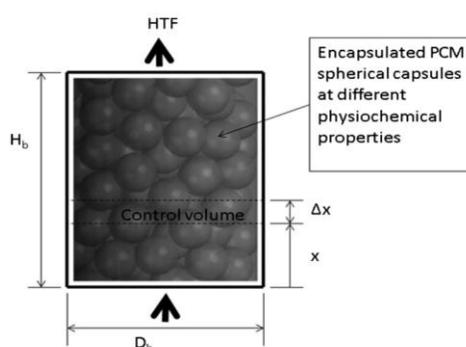
**F. L. Tan [8]** a étudié expérimentalement le processus de fusion avec et sans contrainte de n- octadécane à l'intérieur d'un récipient en verre et faire la comparaison entre les deux. Il a remarqué que le MCP solide est empêché de couler vers le bas de la sphère dans le cas de la fusion par contrainte, alors que pour une fusion sans contrainte, le MCP solide coulerait au fond de la sphère en raison de la gravité. Les expériences ont été réalisées à trois températures de paroi différentes de 35, 40 et 45 °C avec un sous-refroidissement de 1 °C pour la fusion sans contrainte et trois sous-refroidissement initial différents de 1 , 10 et 20 °C à une température de paroi constante de 40 °C pour la fusion avec contrainte. Dans le même axe de travail, **Tan et al [9]** ont réconforté les travaux par une autre étude expérimentale et numérique de la fusion des paraffines pour comprendre le rôle de la flottabilité dans la gestion des ressources en eau. L'expérience se basait sur le remplissage d'une capsule de verre sphérique par un MCP. 11 thermocouples de type K ont été placés verticalement à l'intérieur le long de l'axe de symétrie (Fig. 1.5). Le solide est refroidi à 1 °C et la température de la surface de la sphère était maintenue à 40 °C. Les auteurs

montrèrent que le transfert de chaleur par conduction est dominant pendant la première période dû à la forme sphérique du MCP. Après 40 minutes, la forme ovoïde de la phase solide a montré la présence de mouvement de la phase liquide de la partie inférieure vers la partie supérieure de la sphère. Ensuite, le changement de phase s’est accéléré vers la région supérieure de la sphère.



**Fig.1.5. Photographies expérimentale et simulée de la N-octadécane encapsulé dans une sphère [9].**

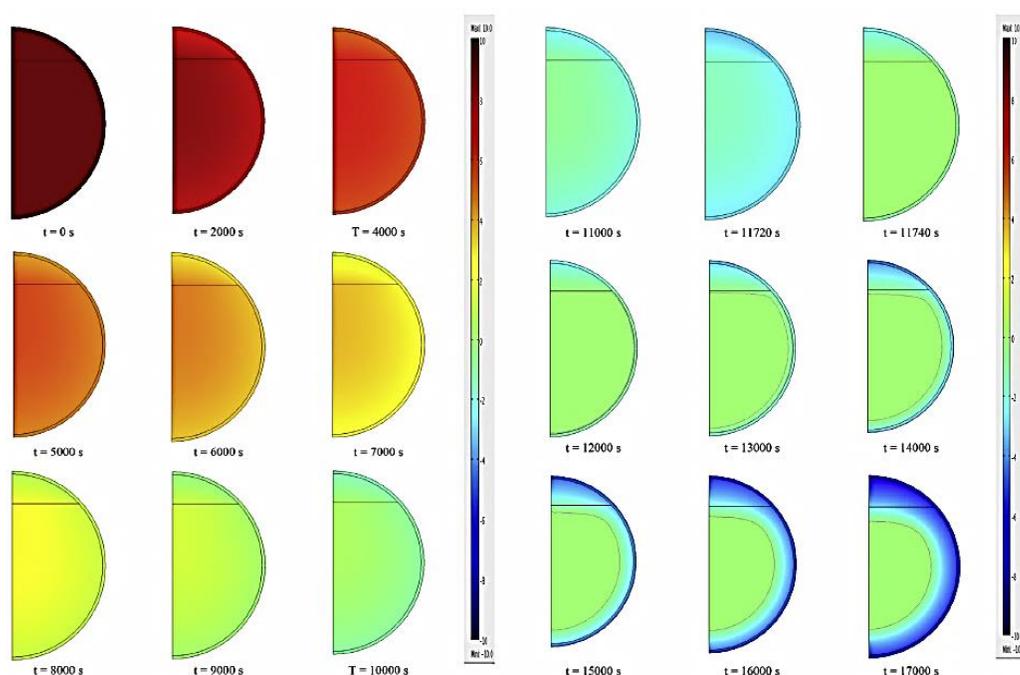
**Aldoss et Rahman [10]** ont étudié l’intérêt de l’utilisation de plusieurs MCP. L’étude s’intéresse à un système de stockage thermique utilisant des capsules sphériques de plusieurs tailles entre 50 et 100 mm, contenant un, deux ou trois MCP (Fig.1.6). Un modèle numérique en une dimension utilisant une méthode enthalpique et résolu par la méthode des différences finies est utilisée.



**Fig.1.6. Schéma du stockage contenant les capsules de MCP [10].**

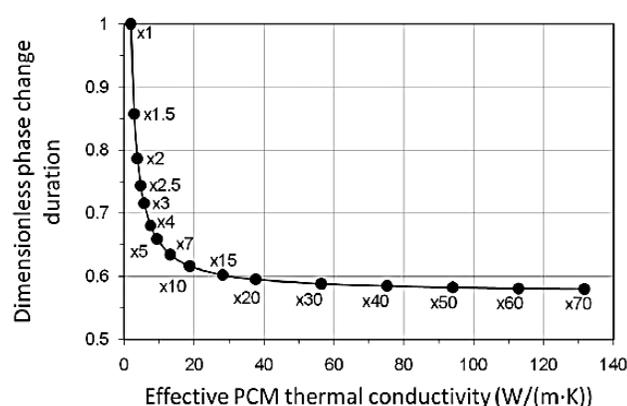
Les résultats montrent que l’utilisation de plusieurs MCP améliore les performances du système lors des phases de stockage et déstockage. Cependant, le gain de performance ne devient plus significatif au-delà de 3 MCP. Il est également précisé que l’utilisation d’un système multi-MCP nécessite la prise en compte d’un dimensionnement plus complexe.

Dans les travaux de **Calvet et al. [11]**, les capsules utilisées sont fabriquées par la société CRISTOPIA, en polyoléfine, d’un diamètre de 98 mm et 2 mm d’épaisseur d’une conductivité thermique de 0,52 W/(m.K). Un modèle numérique est mis en place sous COMSOL multi-physiques en deux dimensions sous différentes hypothèses : le MCP est homogène et isotrope, la convection libre de l’air (capsules remplies en partie pour prendre en compte la variation volumique durant le changement de phase) et du MCP, ainsi que la variation de densité sont négligées. Enfin, toutes les autres propriétés thermiques du problème sont différentes en phase solide et liquide mais supposés indépendantes de la température (conductivité thermique, capacité thermique massique, etc.).



**Fig.1.7. Simulation des profils de température d'un MCP encapsulé à différents instants pendant la solidification [11].**

La (Fig.1.7) montre la simulation numérique d'une capsule à différents instants, pendant la solidification du MCP. La conductivité thermique effective du MCP est investiguée ici en comparant les temps de changement de phase complet d'une capsule pour différentes valeurs de conductivité, les résultats sont présentés sur la Fig.1.8.



**Fig.1.8. Durée du changement de phase complet d'une capsule par rapport à la conductivité thermique du MCP [11].**

ESEN [12] et al ont étudié théoriquement les performances d'un réservoir de stockage d'énergie cylindrique à assistance solaire sont étudiées. Dans le réservoir, le MCP est emballé dans des cylindres et le fluide caloporteur (HTF) y circule parallèlement (Fig. 1.9).

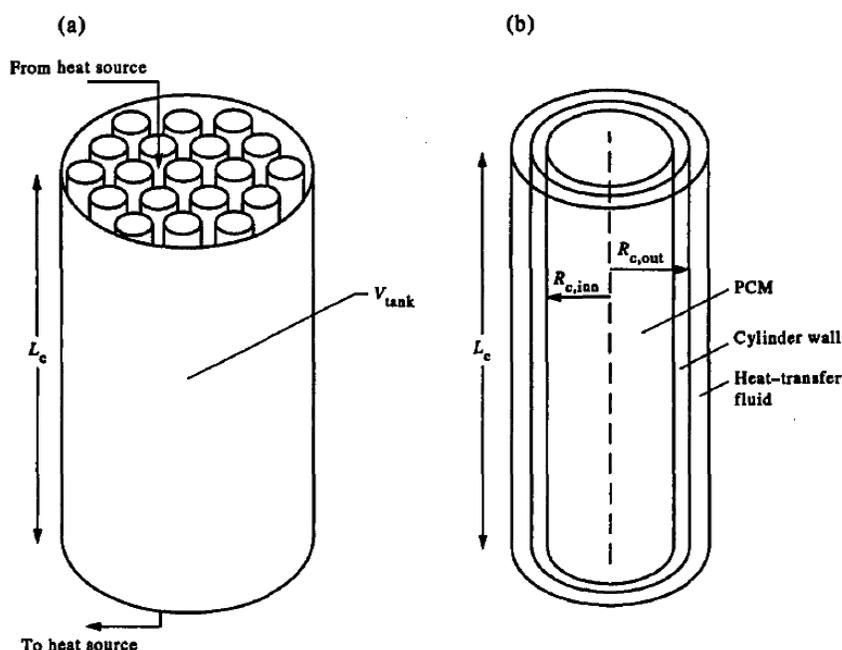
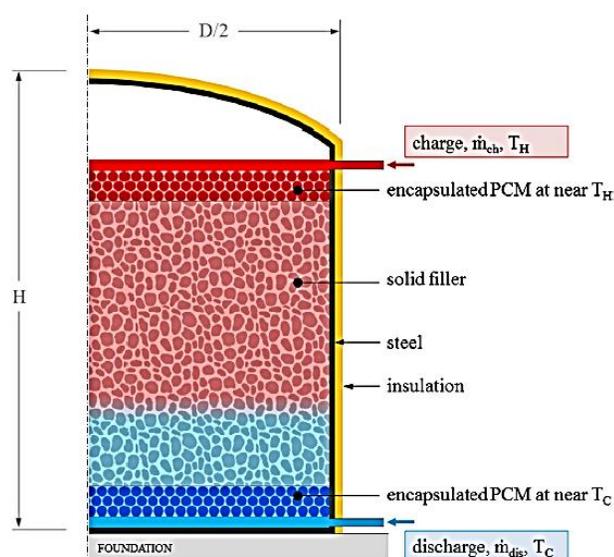


Fig.1.9. (a) Récipient cylindrique plein, (b) Modèle pour un cylindre [12].

L'ensemble d'équations résultant est résolu au moyen du processus d'itération Gauss-Sddd. Les résultats montrent que le MCP, le rayon du cylindre, le débit massique et la température d'entrée du fluide caloporteur doivent être choisis avec soin afin d'optimiser les performances du réservoir.

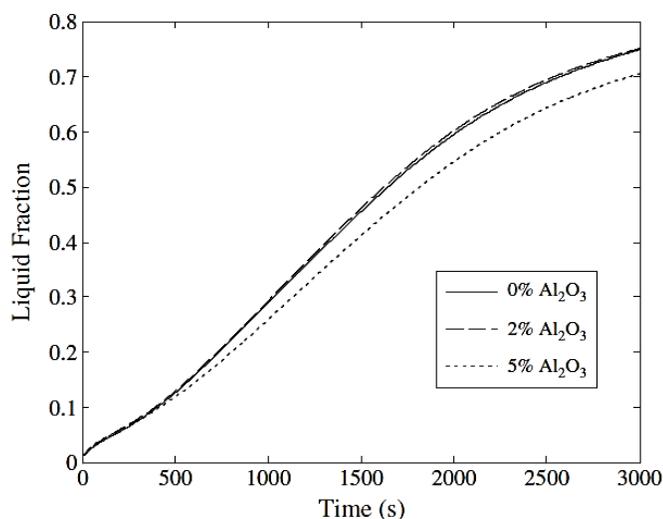
**Galione et al. [13]** ont étudié un réservoir contenant une succession de couches solides et de matériaux à changement de phase pour la réduction du coût de stockage d'une centrale solaire thermique à concentration. Le concept de stockage est appliquée sur une centrale parabolique de 50 MW, similaire en Andalousie 1 (Grenade, Espagne) et qui a été retenue comme référence.

En termes d'efficacité énergétique et exergetique, le stockage multicouche avec deux MCP (Fig.1.10) montre des résultats prometteurs par rapport à l'utilisation de stockages avec couches solides ou un MCP uniquement. L'étude met en avant des quantités d'énergie/exergie stockées 20 % supérieures au stockage utilisant uniquement des couches solides, pour une dimension similaire. Deux modes de fonctionnement du système sont étudiés : phases de chargement/déchargement jusqu'à obtenir un régime établi et le fonctionnement pendant 17 jours sous conditions réelles. Dans le second cas, il a été observé que la variation des conditions de fonctionnement affecte significativement les performances respectives de chaque type de stockage. En conséquence, il est recommandé de mener une optimisation approfondie du système tenant compte de tous les paramètres pour une application réelle.



**Fig.1.10. Schéma du réservoir multicouche contenant deux MCP [13].**

Arasu *et al.* [14] ont étudié numériquement la fusion du mélange paraffine/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans une enceinte carrée (25 mm x 25 mm) chauffée sur un seul côté. La fonction courant, les isothermes et l'interface liquide-solide à différentes étapes du processus de fusion sont présentés et discutés. L'effet de l'orientation de la surface chauffée et la concentration de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans la paraffine sur le rendement du système de stockage à chaleur latente sont analysés. La (Fig.1.11) montre la variation transitoire de la fraction liquide pour différentes concentrations.



**Fig.1.11. Variation transitoire de la fraction liquide pour différentes concentrations [14]**

Assis *et al* [15] ont exploré numériquement et expérimentalement le processus de solidification d'un matériau à changement de phase (MCP) dans une capsule sphérique. À l'état initial, le liquide de MCP occupe 98,5% de l'enveloppe. La partie supérieure de l'air occupe 1,5%. Dans les expériences, une cire de paraffine disponible dans le commerce est utilisée. Ses propriétés sont engagées dans les simulations numériques. L'étude est réalisée pendant la solidification dans les capsules sphériques de 20, 40, 60 et 80mm de diamètre à la température de paroi uniforme, qui variait de 10 à 40°C en dessous de la température moyenne de solidification du matériau à changement de phase. Le modèle physique est représenté sur la (Fig.1.12).

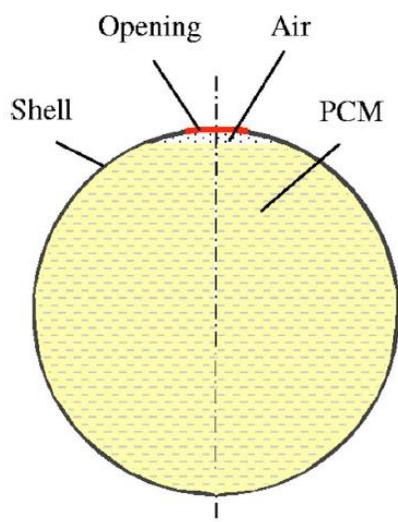


Fig.1.12. Domaine physique [15].

Fig.1.13. Solidification avec un vide supérieur (retrait de la matière) pour  $D=70\text{ m}$  et  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [15].

Les résultats montrent que:

- La fraction de fusion est égale à zéro lorsque la solidification est terminée.
- Les résultats de la simulation sont également représentés quand le MCP a totalement fondu
- Les conditions qui déterminent la forme et la structure des vides dans les différents cas n'ont pas encore été établies. Il y a des indications que la vitesse de refroidissement et la taille de la coquille sont les principaux facteurs.

**Guijun Chen et al [16]** Dans cet article, une expérience visible avec un tube circulaire horizontal rempli de MCP a été présentée. L'interface de phase ainsi que la température du MCP peuvent être surveillées en fonction du temps. Les performances du système LHTS avec le MCP emballé du côté intérieur ou du côté extérieur du tube est comparé à différents taux de remplissage (40–90%). Les résultats montrent que le tube avec garniture MCP à l'intérieur a une meilleure performance globale lorsque le taux de remplissage est supérieur à 62% par rapport au tube avec l'emballage MCP à l'extérieur. En outre, une méthode d'enthalpie-porosité vérifiée par les données expérimentales est adoptée pour simuler la charge et décharge des systèmes LHTS avec d'autres formes de tubes différentes.

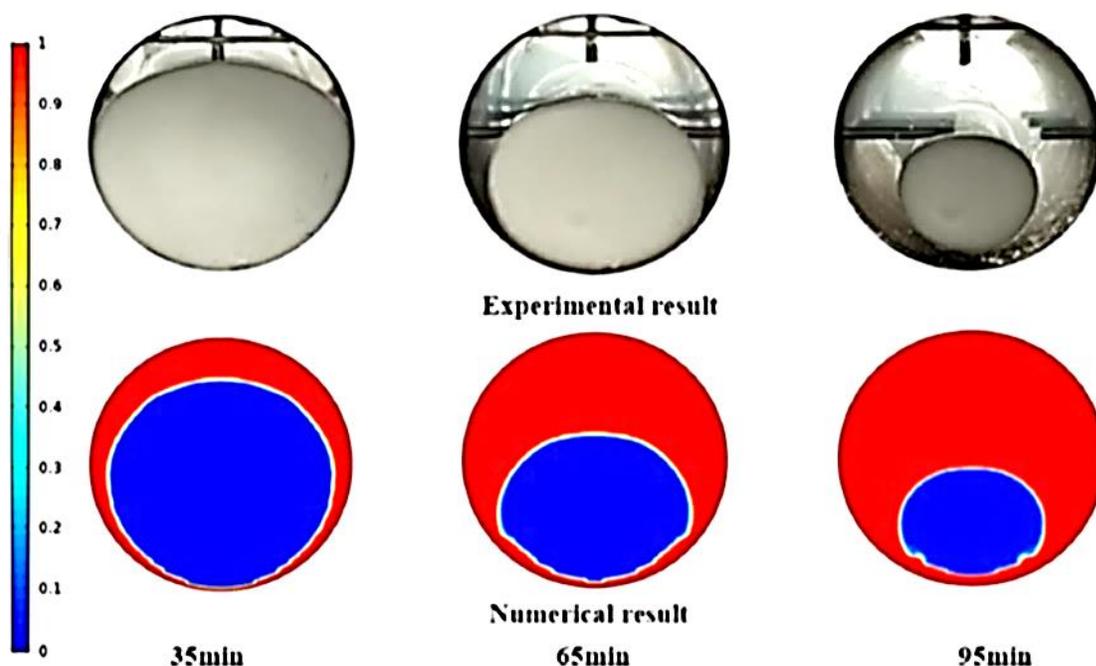


Fig.1.14. Comparaison de l'interface de phase entre le résultat expérimental et la simulation numérique aux instants 35, 65 et 95 min pendant le processus de stockage [16].

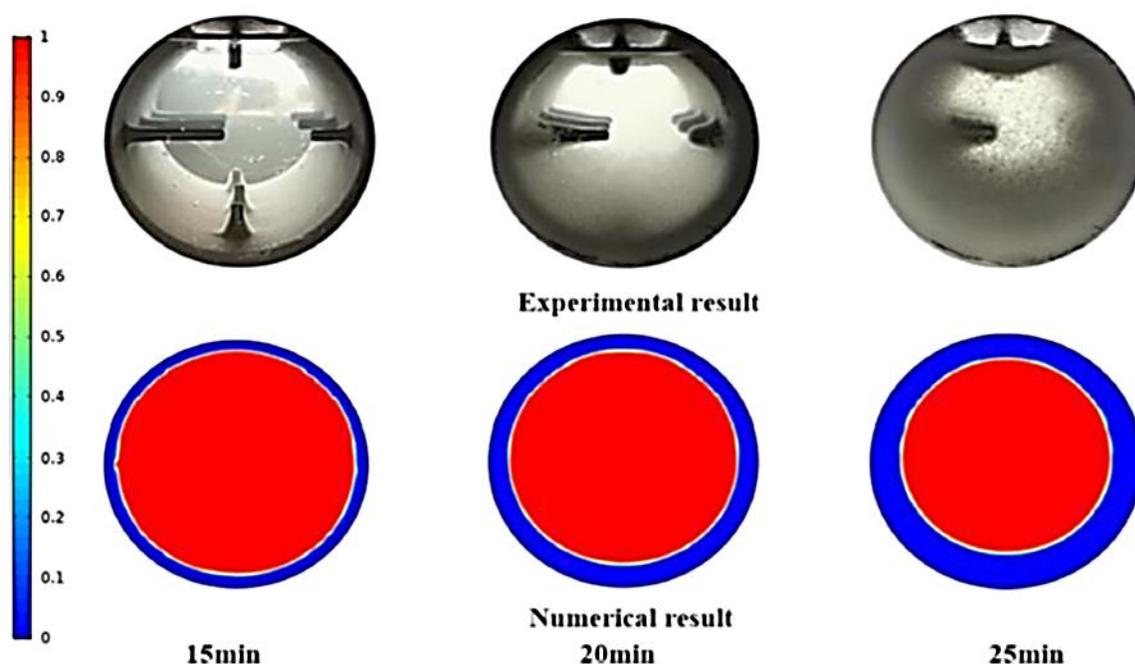
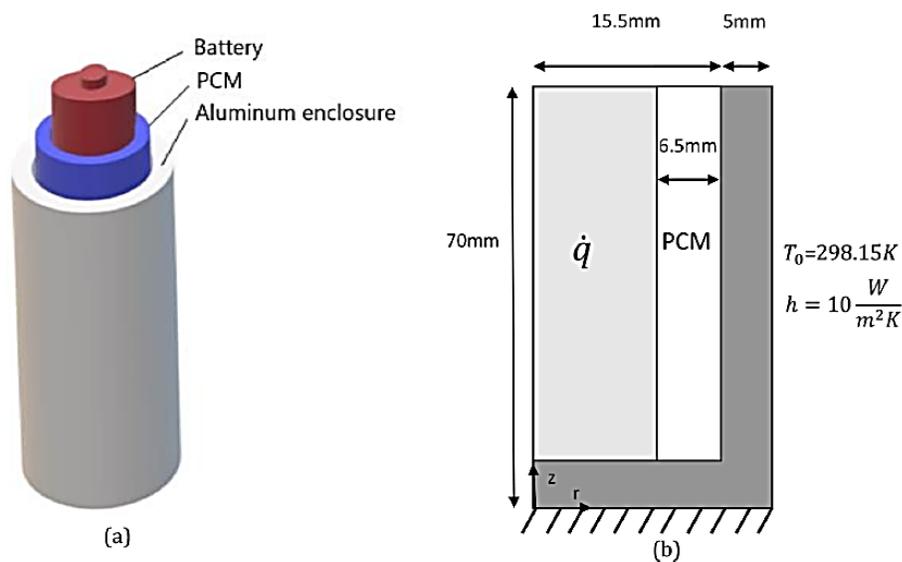


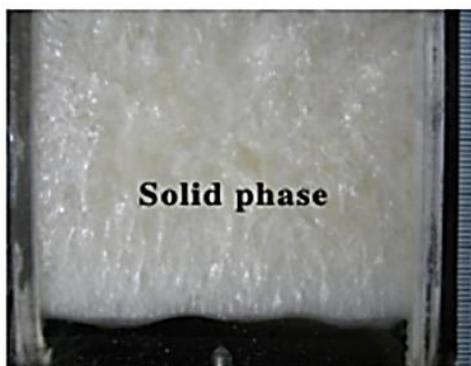
Fig.1.15. Comparaison de l'interface de phase entre le résultat expérimental et la simulation numérique aux instants 15, 20 et 25 min pendant le processus de déstockage [16].

L'étude de **M. Heyhata et al** [17] vise à analyser les performances thermiques du système de TMS (Thermal Management System) d'une batterie au lithium-ion avec une application de matériaux à changement de phase (MCP) (Fig. 1.16). Pour améliorer les performances de TMS, des nanoparticules, des ailettes et de la mousse métallique poreuse sont utilisées à côté du MCP et leurs effets sur les performances du système sont comparés. Les résultats numériques sont validés par des données expérimentales publiées antérieurement et sont présentés pour deux taux de génération de chaleur de 4,6 W et 9,2 W. Les seuls effets de l'ajout de nanoparticules au MCP, de l'utilisation de différents nombres d'ailettes et de l'application de la mousse métallique sur les performances du système sont examinés. Ces mêmes résultats indiquent que la composition poreuse-MCP fonctionne plus efficacement que les nano-MCP et les ailettes-MCP. Le modèle de non-équilibre thermique local (LTNE) et la loi non-Darcy sont considérés pour simuler la fusion du nano-MCP à l'intérieur du milieu poreux.

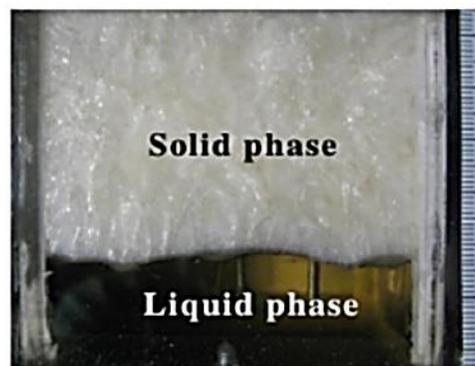


**Fig.1.16. Schéma de l'unité TMS de batterie, (a) batterie et son boîtier, (b) dimensions géométriques et conditions aux limites [17].**

**S. Madruga et al [18]** effectuent une analyse comparative des résultats expérimentaux (Fig. 1.17) et des simulations numériques (Fig. 1.18) sur la fusion du matériau à changement de phase tétracosane contenu dans un cube et chauffé par le bas. Les simulations montrent des régimes distincts du processus de fusion: (i) régime conducteur, (ii) régime de croissance stable, (iii) grossissement (iv) régime turbulent. Ils ont observé le comportement de l'interface solide/liquide durant toute l'expérience et qui est caractérisée par une forme irrégulière. Ils ont visualisé le comportement des isothermes, ainsi que le champ de vitesses correspondant au régime turbulent. Ainsi l'observation de l'interface solide/liquide est une mesure utile pour identifier l'état global de la fusion en terme thermique (panaches) et en termes de vitesses (cellules convectives).



$h=14mm$   
 $t=1200s$   
(a)



$h=27mm$   
 $t=2400s$   
(b)

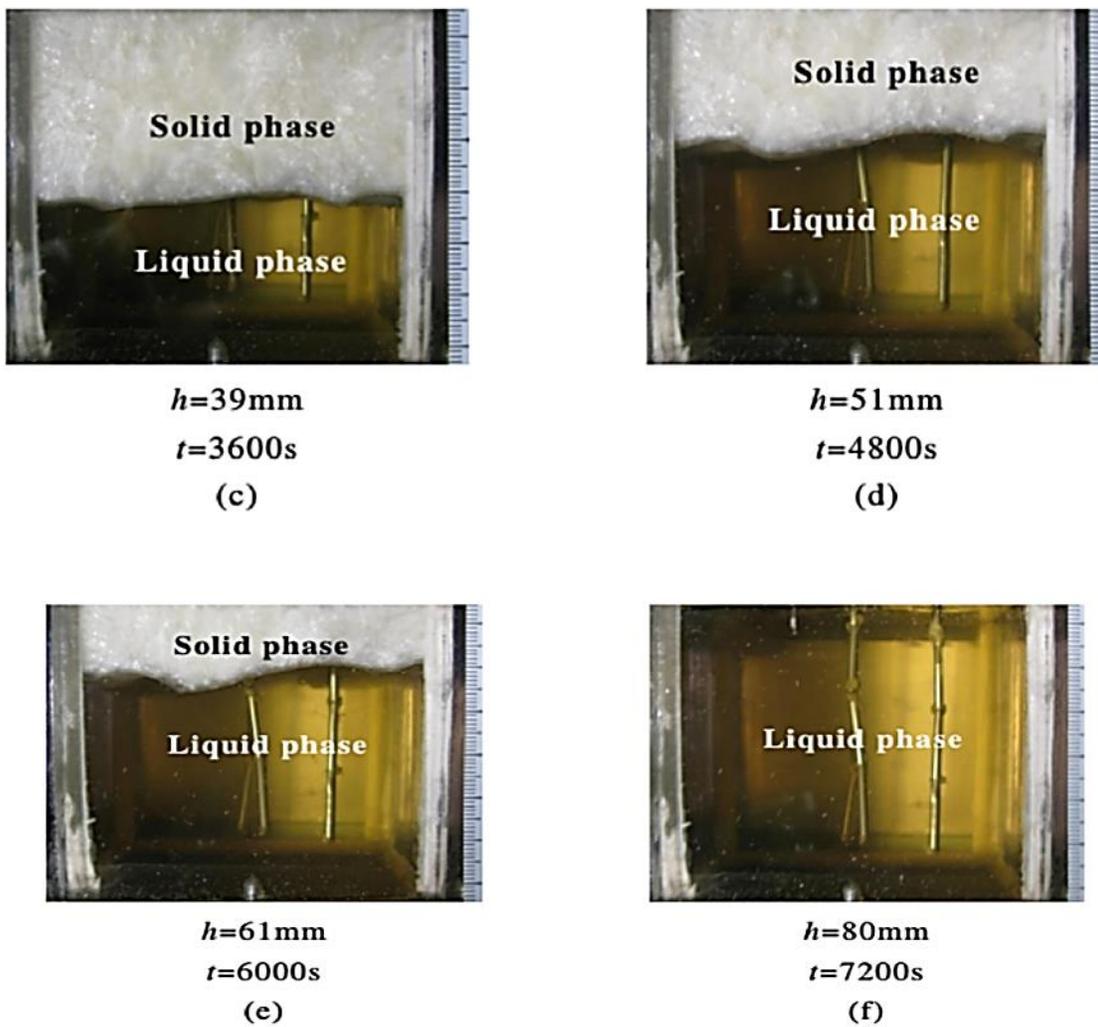


Fig.1.17. Photos instantanés en différents moments de la fusion du tétracosane lorsque la paroi inférieure est maintenue à une température constante  $T_w = 80^\circ \text{C}$  [18].

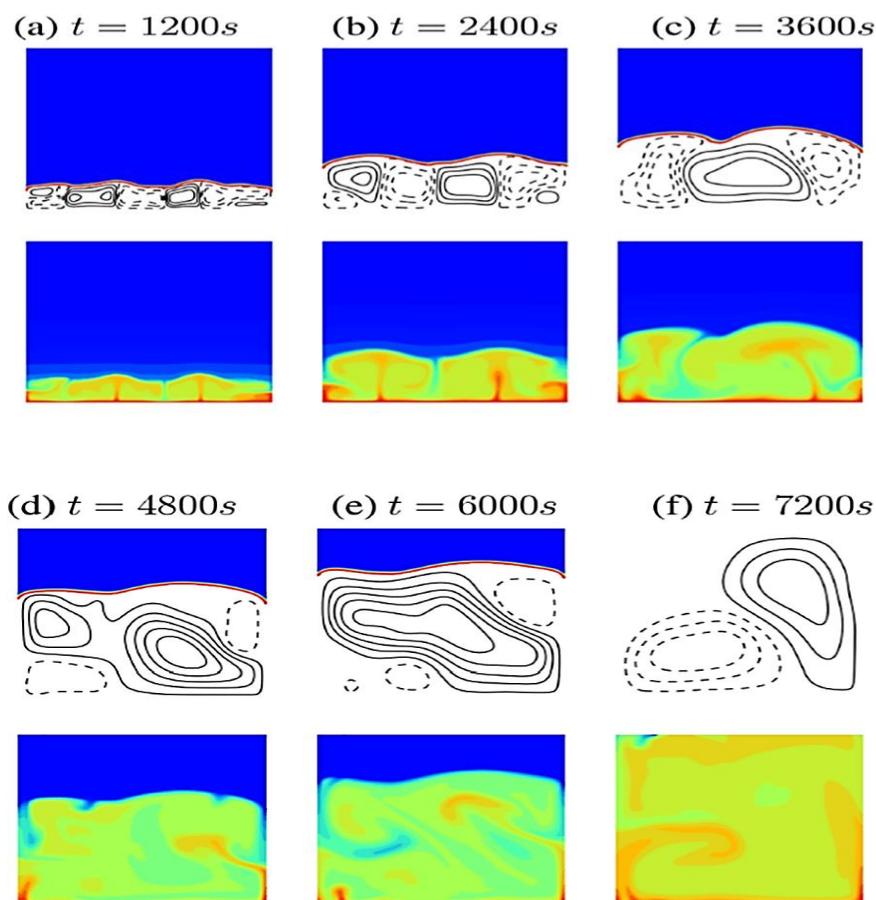


Fig.1.18. Photos instantanés du champ de température (deuxième et quatrième rangées) et des lignes de courant (première et troisième rangées) à des moments représentatifs au régime turbulent [18].

M. Bechiria et al [19] présentent dans leur article une étude numérique de la fusion de matériau à changement de phase (MCP) partiellement rempli dans un tube cylindrique vertical (Fig. 1.19). L'espace supérieur du tube a été rempli d'air pour tenir compte de l'expansion volumétrique du MCP. La convection naturelle à l'intérieur de la phase liquide MCP a été considérée via la dépendance à la température de la densité et de la force gravitationnelle. Les résultats montrent que tous les paramètres du problème (le nombre de Fourier, le nombre de Grashoff, le nombre de Stefan, le rapport de diffusivité thermique mur / MCP, rapport d'aspect du tube, rapport diamètre de coque / tube et température initiale sans dimension) peuvent réellement affecter les phénomènes de changement de phase et par conséquent, affecter le temps de fusion.

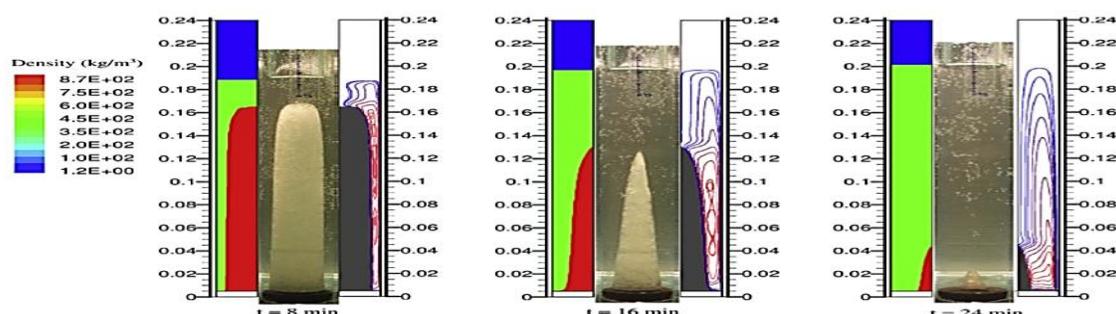


Fig.1.19. Comparaison des formes des fractions numériques solides et liquides avec l'expérience [19].

K.Elfeky et al [20] ont analysé le comportement de la chaleur latente d'un système de stockage d'énergie à lit de plusieurs MCP pour application sur des concentrateurs d'énergie solaire (CSP) (Fig. 1.20). Dans cette conception, des capsules sphériques remplies de MCP de différentes propriétés thermophysiques sont utilisées. Les capsules sont emballées dans le lit à différentes sections en fonction de la température de fusion MCP (Fig. 1.21). Les résultats montrent que le système MCP à trois étages avec différents points de fusion présente l'énergie et l'efficacité exergétique les plus élevées pendant un cycle de charge et décharge. De plus, les résultats montrent que l'unité MCP à trois étages peut améliorer considérablement le taux de transfert de chaleur et raccourcir efficacement le temps de stockage de chaleur.

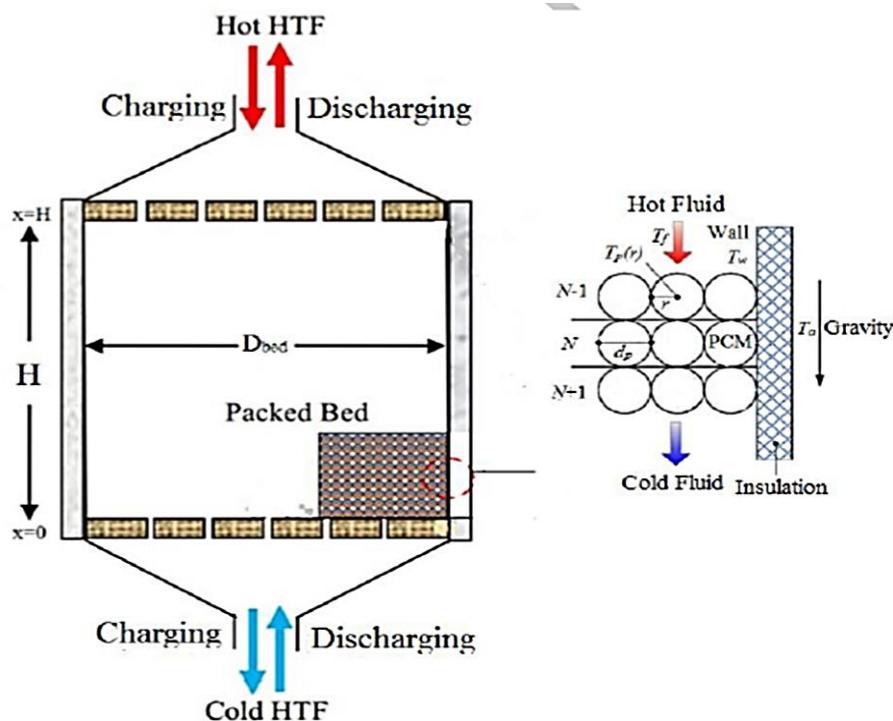


Fig.1.20. Diagramme schématique du système de stockage thermique à lit compact [20].

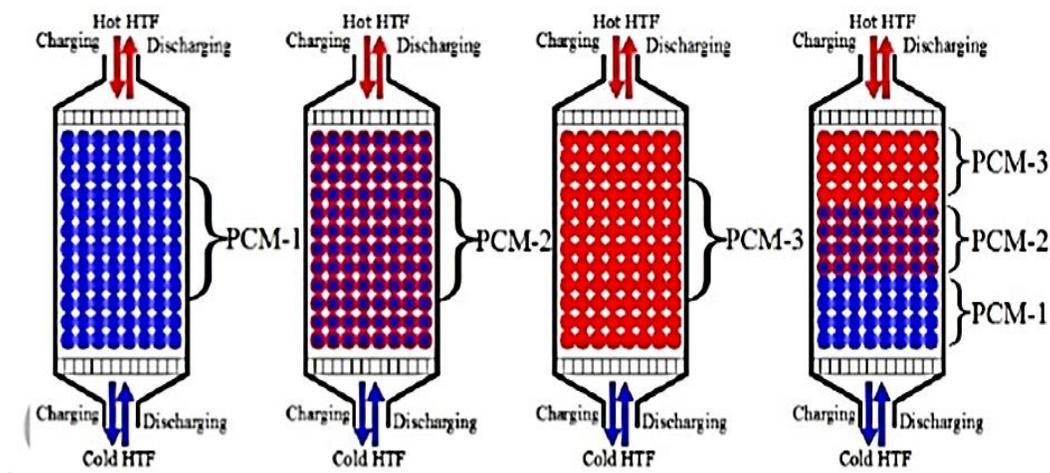


Fig.1.21. Différents cas de distribution de MCP [20].

Khodadadi et al [21] étaient les premiers à faire un rapport sur la fonctionnalité améliorée de nanostructures des matériaux à changement de phase améliorés (NEMCP) par la dispersion de nanoparticules. Ils ont simulé la solidification d'un nano fluide (l'eau avec des particules de cuivre de nano-taille) dans un modèle de stockage carré. Il a été trouvé que la chaleur latente de MCP baisserait et le temps de décharge a diminué quand la fraction massive de particules dispersées ait été augmentée. Compte tenu de la bonne suspension de nanoparticules dans des matériaux à changement de phase conventionnels tels que l'eau, il est démontré que les NEPCM ont un grand potentiel pour les applications exigeantes de stockage d'énergie thermique. Plus précisément, le taux de dégagement de chaleur élevé du NEPCM par rapport au MCP conventionnel et sa conductivité thermique plus élevée indiquent sa promesse d'une plus grande utilisation dans divers secteurs énergétiques. La (Fig.1.21) montre l'évolution des phases solide et liquide pendant la solidification.

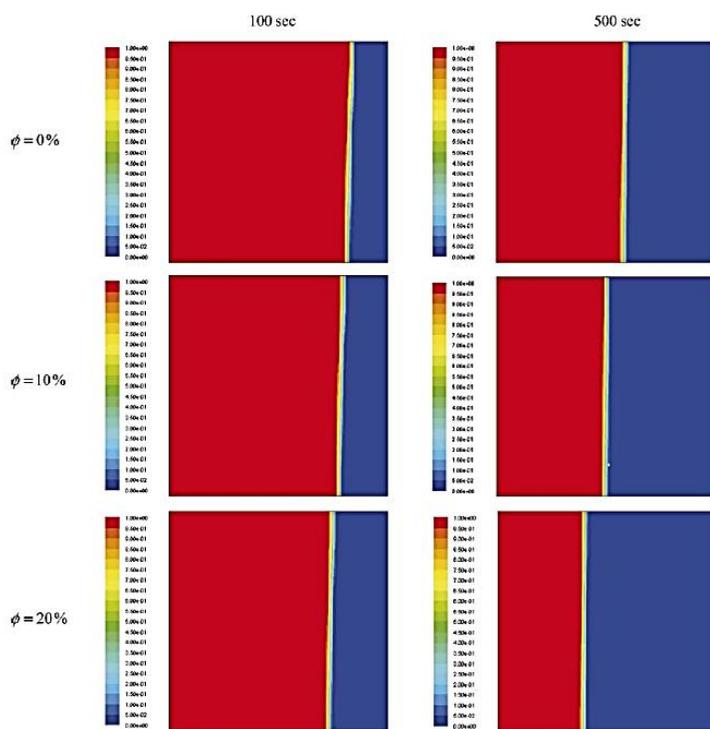
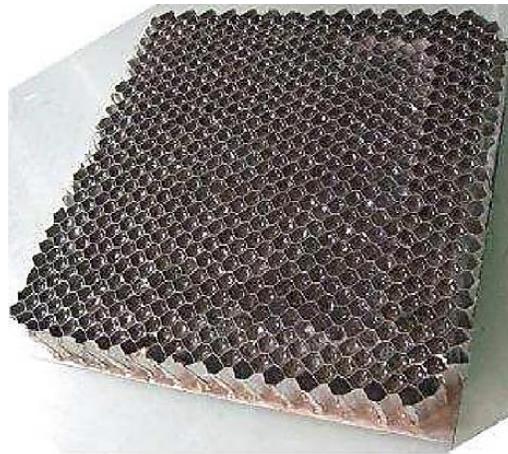


Fig.1.22. Evolution des phases solide et liquide pendant la solidification [21].

**Hasse et al. [22]** ont utilisé une structure métallique conductrice en nid d'abeille (Fig.1.25) qui permet la diminution du temps de changement de phase du matériau en favorisant le transfert par conduction le long des parois métalliques. Un dispositif expérimental comprenant l'échantillon placé entre un plateau chauffant et une couche isolante permet l'observation de l'évolution de la température du matériau lors des cycles de chauffage et refroidissement (période de 24 heures). Les valeurs d'énergie stockée et libérée sont comparées à des mesures issues d'un DSC (Calorimétrie Différentielle à Balayage). Les résultats de cette étude montrent que l'utilisation d'une telle structure couplée au MCP permet d'obtenir un stockage par chaleur latente très efficace. La valeur d'énergie stockée par unité de surface est comparée à un stockage par chaleur sensible (eau ou air) et une amélioration d'un facteur 3 est obtenue par rapport à l'eau, et 10 par rapport à l'air. Un modèle numérique est également développé sous COMSOL Multiphysiques dans le but d'optimiser la géométrie de la structure afin de répondre au mieux aux besoins d'un stockage quotidien appliqué au bâtiment



**Fig.1.23. Photo de la structure en nid d'abeille remplie par une paraffine [22].**



---

*Chapitre II*  
*Matériaux à*  
*Changement de Phase*

---



## 1. Introduction

Au moment où l'on parle de plus en plus d'environnement et de rationalisation de l'exploitation des ressources énergétiques, le stockage de l'énergie thermique se présente comme une solution particulièrement intéressante puisqu'il permet de dissocier l'utilisation de la production de l'énergie.

Essentiellement trois modes de stockage thermique peuvent être envisagés :

- Le stockage par chaleur sensible qui exploite la capacité calorifique d'un matériau
- Le stockage par chaleur latente qui consiste à utiliser la transformation solide-liquide d'un Matériau à Changement de Phase (MCP)
- Le stockage thermochimique qui exploite la chaleur de sorption mise en œuvre dans des processus physico-chimiques renversables d'absorption exothermique et de désorption endothermique d'un gaz sur un milieu absorbant.

Le stockage d'énergie est une solution très adaptée aux systèmes de froid industriel et de climatisation. Mais dans ce secteur, le stockage par chaleur sensible est souvent inopérant du fait de la nécessité de forts écarts des températures et du stockage thermochimique qui est encore peu développé.

Actuellement, le stockage d'énergie par chaleur latente apporte une solution efficace aux investisseurs soucieux d'optimiser leur équipement : il permet une réelle gestion de l'énergie et donc d'utiliser des énergies au moment où elles sont les moins coûteuses (énergie solaire, tarifs de nuits pour l'électricité ...).

Dans le cas particulier du stockage du froid, il offre de plus la possibilité de diminuer de façon sensible la quantité de fluides frigorigènes utilisés en accord avec les nouvelles législations très restrictives pour la protection de l'environnement [23].

## 2. Matériau à Changement de Phase (MCP)

Les MCP ont été considérés comme des matériaux de stockage d'énergie thermique. L'application des MCP se trouve généralement dans de nombreux domaines, notamment le refroidissement des produits alimentaires, les parois dans les bâtiments, le système de récupération de chaleur, les centrales solaires, l'emballage, le textile,...etc. Dans le bâtiment, les matériaux de construction thermiquement massifs permettent de réduire les fluctuations de la température de l'air et de déplacer les charges de refroidissement en périodes creuses (réduire les charges les charges de refroidissement et de chauffage) en réduisant ainsi la consommation énergétique [24]. Les MCP peuvent être tout matériau capable d'absorber, de stocker et de libérer de la chaleur sous forme d'énergie thermique. En effet, l'énergie thermique qui est stockée dans les MCP au cours d'un processus de fusion, elle est récupérée au cours du processus de solidification [25].

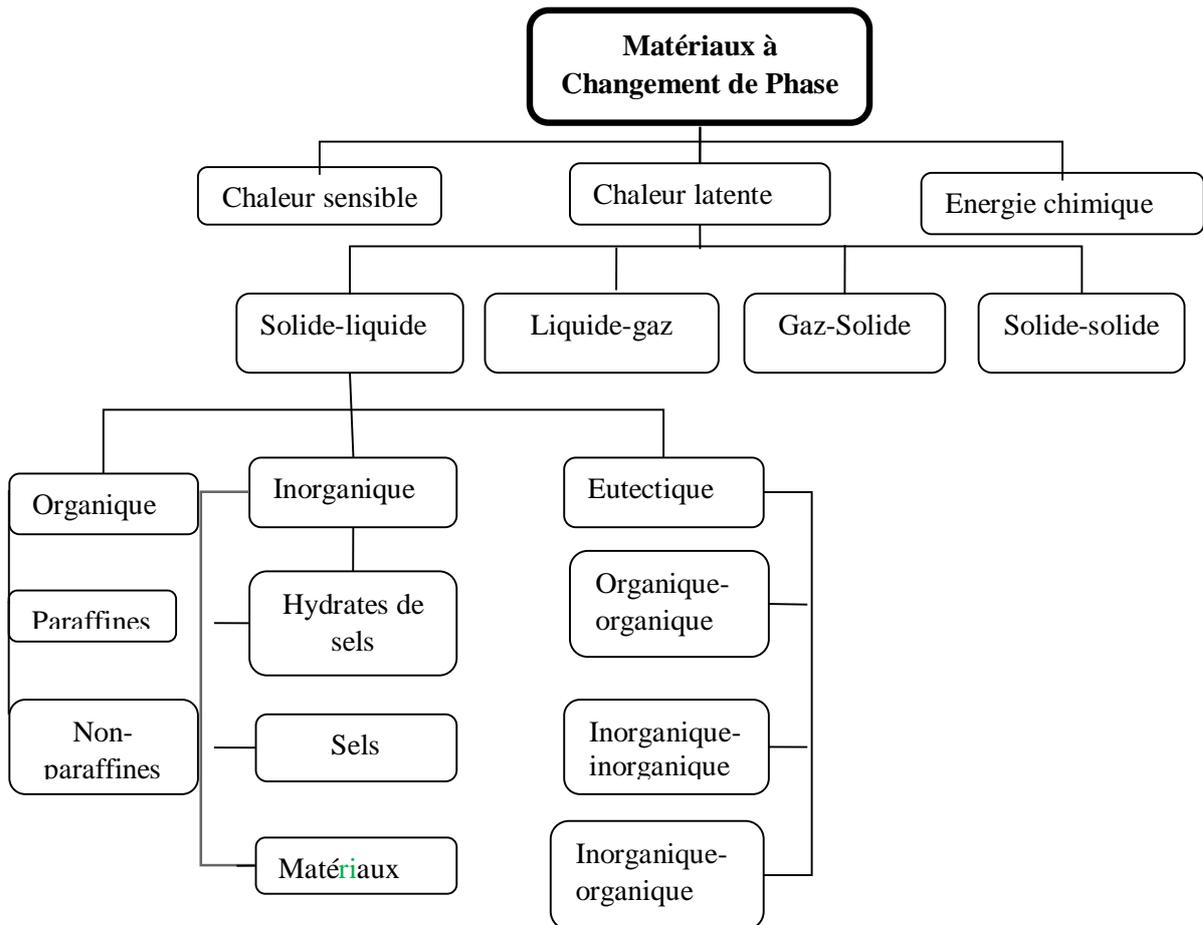


Fig.2.1. Classification des matériaux à changement de phase

## 2.1. Types des Matériaux à Changement de Phase

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories:

- **Inorganique** (hydrates salins, métaux).
- **Organique** (paraffines, corps non-paraffiniques).
- **Eutectique** (mélanges de deux ou plusieurs corps qui ont des températures de fusion précises) de corps inorganiques et/ou organiques

### 2.1.1. Les MCP inorganiques

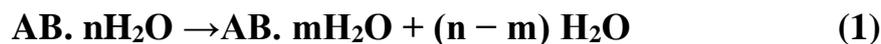
Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de température de fusion compris entre  $-100\text{ °C}$  et  $+1000\text{ °C}$ . Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion  $0\text{ °C}$  à la pression atmosphérique), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0\text{ °C}$ ), des sels hydratés (température de fusion compris entre  $5\text{ °C}$  et  $130\text{ °C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à  $150\text{ °C}$ ) [26].



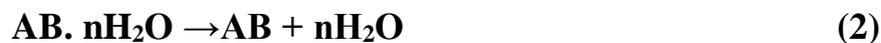
Fig.2.2. Sels Hydratés.

### Hydrates de sels

Les hydrates de sel sont des sels inorganiques qui contiennent de l'eau et dont la formule générale est  $AB \cdot nH_2O$ . Pendant la charge, la déshydratation du sel aura lieu. Le produit de cette déshydratation peut être un hydrate de sel avec moins de molécules d'eau selon la formule :



Ou bien le même sel sous sa forme anhydre :



Le sel hydraté le plus utilisé pour son faible coût est le  $CaCl_2 \cdot 6H_2O$  ( $T_{\text{fusion}} = 28 \div 30$  °C). On peut citer aussi le  $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  pour les applications de climatisation et un nouveau matériau obtenu à partir d' $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  utilisé avec des additifs pour des applications industrielles autour de 100 °C. On trouve aussi la bischofite constituée d'un mélange d'hydrates de sels composée à 95 % massique de  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  et à 5 % massique de  $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ ,  $Li_2SO_4 \cdot H_2O$  et autres sels ioniques tels que NaCl et KCl de température de fusion autour de 98.9 °C [27].

### Avantages

Les hydrates de sel sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente (100÷300 kJ/kg), une température de fusion adaptée aux applications à basse température (8÷100 °C) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité. Ils sont en effet déjà commercialisés pour servir comme

matériaux de stockage et disponibles en gros volume. Par ailleurs, ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ 0,5 W/m. K) [27].

### **Inconvénients**

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion. Ainsi, au moment de la fusion, il peut se former une solution aqueuse saturée en sel et le surplus de solide peut se déposer au fond du conteneur par sa différence de masse volumique, ce qui empêche la solidification. Pour cela, différentes solutions ont été proposées, comme exemple : l'agitation mécanique, l'encapsulation du MCP, l'utilisation d'un excès d'eau pour éviter la saturation de la solution ou encore l'ajout d'additifs. Un autre inconvénient des hydrates de sel est la surfusion. Pour résoudre ce problème, un agent de nucléation peut être ajouté. Il permet de fournir un noyau où la cristallisation peut commencer. Une autre option est la rétention dans une petite région froide de cristaux qui serviront comme noyaux. Pour éviter ces problèmes, les chercheurs se sont donc tournés vers les substances organiques telles que la paraffine [27].

#### **2.1.2. Les MCP organiques**

Les matériaux ou les substances organiques qui ont une température ou une plage de température compris entre 0 °C et 150 °C et qui sont les plus utilisés, sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre [26].



**Fig.2.3. Acide gras.**

□ □

### □□□ Les paraffines

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes composés de chaînes de  $n$  atomes de carbone auxquels sont attachés  $2n+2$  atomes d'hydrogène ( $C_nH_{2n+2}$ ). La paraffine la plus simple est le méthane ( $CH_4$ ). Sa température d'ébullition est très basse :  $-162$  °C. C'est le constituant principal du gaz naturel [28].



**Fig.2.4. Paraffine brutes, encapsulées ou en huile.**

❖ **Les avantages et les inconvénients des paraffines**

Tableau.2.1 . Les avantages et les inconvénients des paraffines [28].

Les avantages	les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pas de ségrégation de phase.</li> <li>- Ils sont chimiquement stables (il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation).</li> <li>- La surfusion est négligeable, ainsi les agents de nucléations ne sont pas nécessaires.</li> <li>- Elles sont compatibles avec tous les récipients en métal et facilement incorporées aux systèmes de stockage de chaleur.</li> <li>- Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique.</li> <li>- Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes.</li> <li>- Elles sont non toxiques et 100% recyclables.</li> <li>- Pas de dégradation des propriétés thermiques du matériau après plusieurs cycles de fusion/solidification.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les cires paraffiniques ont une très faible conductivité thermique, la moitié de celle des hydrates salins.</li> <li>- Les paraffines ont un changement de volume élevé en passant de l'état solide à l'état liquide.</li> <li>- Elles sont inflammables, mais ceci peut être facilement résolu par un conditionnement approprié.</li> <li>- La paraffine est habituellement plus chère que les hydrates salins.</li> </ul>

❖ **Conditionnement des paraffines**

Bien que les paraffines aient les propriétés requises d'un MCP, leur faible conductivité pénalise la cinétique de charge/ décharge de l'énergie thermique.

Pour résoudre ce problème plusieurs types de conditionnement ont été proposés :

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

Une autre méthode consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone [28].

### 2.1.3. Les eutectiques

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruente. Les eutectiques ont un potentiel important dans les applications de stockage thermique de l'énergie.

Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire [29].



Fig.2.5. Les eutectiques

Table.2.2. Propriétés thermiques de certains MCP [30].

Matériaux		Température de fusion (°C)	Enthalpie de fusion (kJ/kg)
MCP Inorganiques	Eau	0	333.6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique - laurique	21	143
MCP Eutectiques	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
MCP 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

### 2.1.4. Etude comparative des composés organiques, inorganiques et eutectiques

Le tableau suivant présente les principaux avantages et inconvénients des MCP organiques, inorganiques et eutectiques (Tab.2.3) [31].

Type de MCP	Avantages	Inconvénients
Organiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Simple d'utilisation</li> <li>▪ Non corrosif</li> <li>▪ Pas de surfusion</li> <li>▪ Disponible pour une large gamme de température</li> <li>▪ Compatible avec les matériaux conventionnels de construction</li> <li>▪ Réactifs et recyclables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Généralement cher</li> <li>▪ Faible chaleur latente</li> <li>▪ Large de changement d'état</li> <li>▪ Peut-être inflammable</li> <li>▪ Fortes variations de volume lors du changement de phase</li> <li>▪ Faible conductivité thermique à l'état solide et l'état liquide</li> </ul>
Inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Forte chaleur latente de fusion</li> <li>▪ Bonne conductivité thermique</li> <li>▪ Non-inflammable</li> <li>▪ Fusion nette (plage de fusion étroite)</li> <li>▪ Bon marché et facilement disponible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corrosif pour la plupart des métaux</li> <li>▪ Décomposition de phase</li> <li>▪ En rapport avec la</li> <li>▪ Ségrégation et la corrosion et surfusion</li> </ul>
Eutectique	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure</li> <li>▪ Leur chaleur latente volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les données seulement limitées sont disponible sur les propriétés thermophysiques comme l'usage de ceux des matières nouvelles aux applications du stockage thermique.</li> </ul>

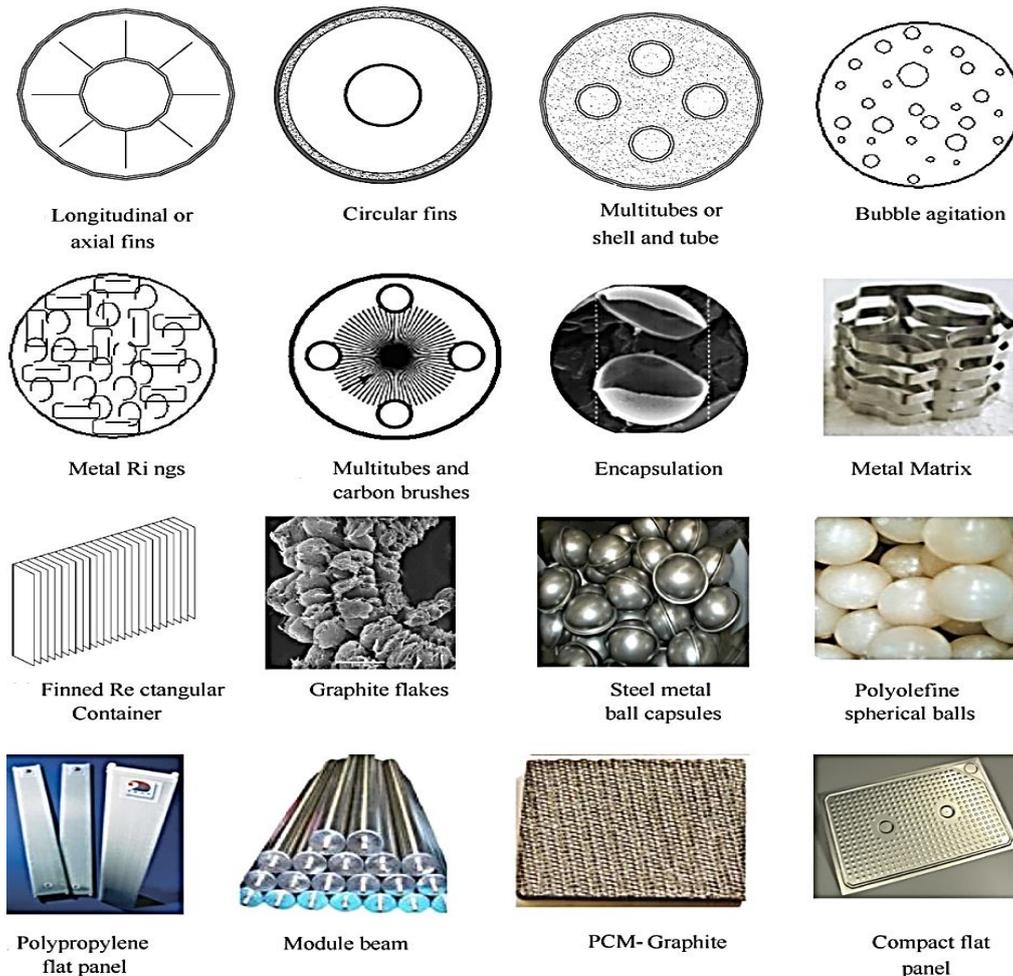


Fig.2.6. Les différentes techniques de transfert thermique par MCP [32].

## 2.2. Les problèmes liés au changement de phase

### 2.2.1. La ségrégation

C'est un phénomène observé dans la plus part des matériaux à changement de phase. Dans le cas des sels hydratés à fusion non congruente (c'est-à-dire la phase liquide est de même composition que la phase solide), la solidification s'accompagne de la formation de deux phases (liquide et solide). La phase la plus dense, en générale le solide, se dépose au fond du récipient : c'est la ségrégation des phases. Cette dernière rend difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage à chaleur latente. Diverse méthodes peuvent être utilisées pour minimiser la ségrégation et stabiliser les composés.

- L'agitation : elle permet de rendre homogène le liquide de départ avant la solidification, elle n'est pas très pratique car c'est une méthode de laboratoire.
- La diminution des dimensions du récipient dans lequel le matériau est encapsulé car ceci confère au matériau une vitesse de refroidissement supérieure à la vitesse de décantation [33].

### 2.2.2. La corrosion

Le manque de stabilité à long-terme du système MCP-conteneur a longtemps limité l'expansion de l'utilisation des stockages à chaleur latente. Ce phénomène peut être dû à deux facteurs : le manque de stabilité chimique du matériau lui-même, et/ou la corrosion entre le MCP et le conteneur. A ce sujet, les paraffines sont réputées pour la conservation de leurs propriétés thermiques au fil des cycles charge/décharge. En revanche, la nature ionique des sels hydratés cause des problèmes de corrosion avec les conteneurs métalliques [33].

### 2.2.3. La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur sont faibles, le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement [34].

### 2.2.4. La dilatation

Pendant le changement de phase de l'état solide à l'état 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 [35].

### 2.2.5. 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 [35].

## 2.3. Choix de MCP

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0÷120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lors que certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques qui sont définies à partir d'un certain nombre de critères [36].

### 2.3.1. Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée ;
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur) ;

- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative ;
- Une fusion congruente ;
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition [36].

### 2.3.2. Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion. Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques [36].

### 2.3.3 Critères chimique

Le matériau à changement de phase doit montrer :

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

Aussi le matériau ne doit pas être nocif ; il doit être non inflammable et non explosif [36].

### 2.3.4. Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité
- A bon marché

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés [36].

## 2.4. Amélioration de la conductivité des MCP

Actuellement, les MCP ont une conductivité thermique assez faible de l'ordre de 0,2 W/(m.K) en moyenne, ce qui ne permet pas d'avoir un bon transfert thermique. Ce phénomène est alors amplifié par l'épaisseur de la phase (solide ou liquide) à traverser car, lors du changement de phase du MCP, l'échange thermique a lieu à l'interface solide/liquide du MCP. Lorsque le front de solidification ou de fusion se déplace, il laisse derrière lui une nouvelle phase (solide ou liquide) que le flux thermique doit traverser avant d'atteindre le front en question. Plus l'épaisseur de cette phase est importante et plus la résistance thermique qu'elle engendre est grande.

Pour pallier ce problème, deux solutions sont utilisées en générale : faire en sorte que l'épaisseur à travers soit le plus petit possible. Pour cela, on utilise souvent des microcapsules sphériques qui permettent aux MCP de changer facilement de phase sur l'ensemble de leurs volumes. L'autre solution consiste à mélanger ou à mettre au cœur de MCP un matériau ayant une bonne conductivité (graphite, maille de fer, fil de fer, etc) [26].

### 3. stockage thermique

L'énergie thermique peut être stockée par le changement d'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente, thermochimique ou une combinaison entre eux. Une vue d'ensemble des techniques principales du stockage de l'énergie thermique est montrée dans la figure suivante [37].

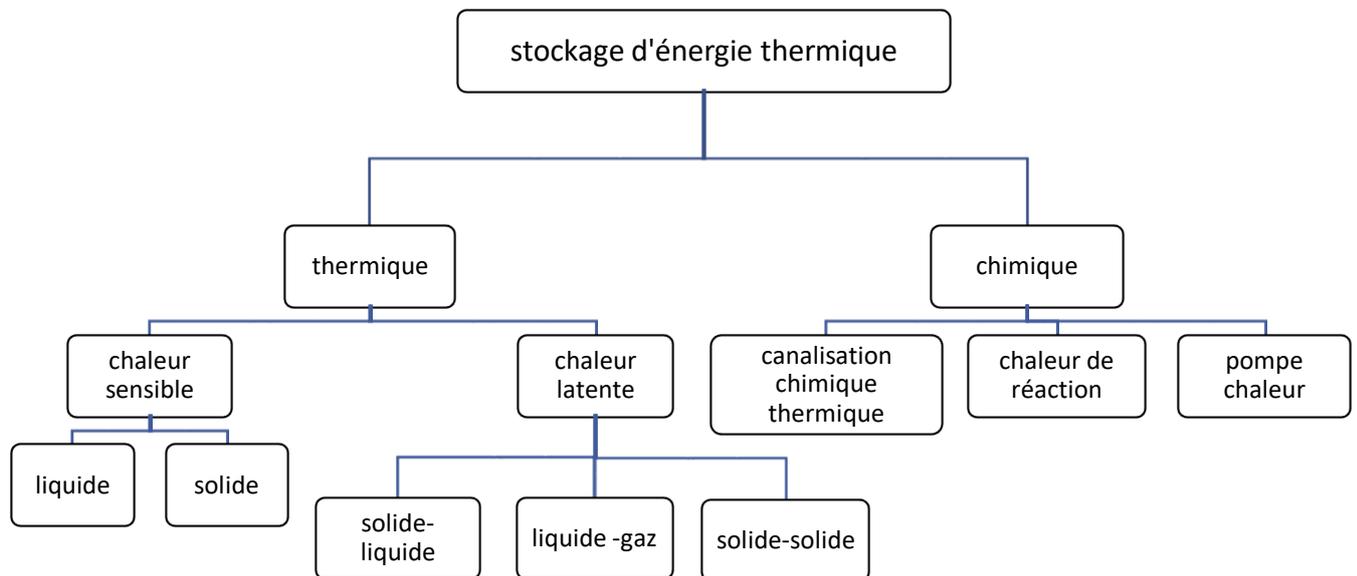
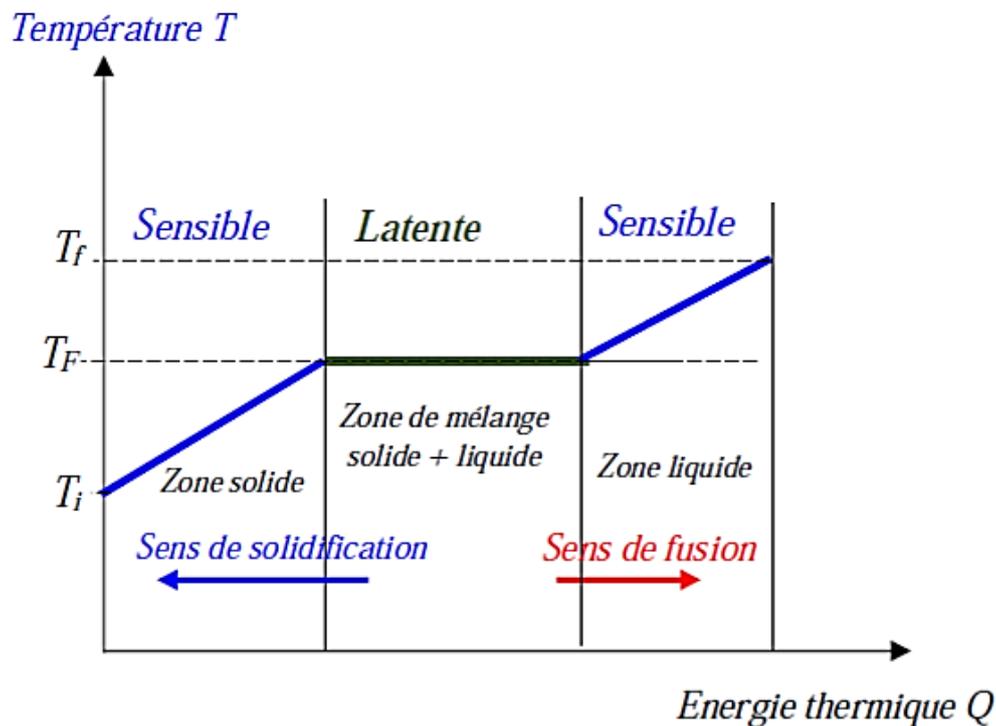


Fig.2.7. Technologies de stockage d'énergie thermique [38]

#### 3.1. Stockage thermique par chaleur sensible

Le système de stockage de l'énergie thermique est basé sur le stockage de chaleur sensible. L'énergie est stockée en modifiant la température des matériaux utilisés (Figure 1.1) [36].



**Fig.2.8. Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement de phase.**

Les matériaux de stockage de chaleur sensible ne subissent aucun changement dans leur phase (liquide, solide ou gaz) sur la plage de température considérée. Les principaux avantages de ces systèmes sont leur faible coût et leur longue stabilité de fonctionnement. Si  $h$  est l'enthalpie massique du matériau de stockage, la variation de la quantité de chaleur, notée  $Q$ , échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial (noté avec l'indice  $i$ ) à un état final (noté avec l'indice  $f$ ) peut être exprimée comme suit :

$$Q = m \cdot (h_f - h_i) \quad [\text{J}] \quad (3)$$

Où :

- $m$  est la masse du matériau [kg],
- $h_i$  est l'enthalpie massique initiale [J/kg],
- $h_f$  est l'enthalpie massique finale [J/kg].

Dans le cas où la capacité thermique massique du matériau (notée  $C_p$ ) est constante, l'équation (1.1) de la variation de la quantité de chaleur peut s'écrire comme suit :

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_f - T_i) \quad [\text{J}] \quad (4)$$

Où :

- $C_p$  est la chaleur spécifique massique [J/(kg.K)],
- $T_i$  est la température initiale [K],
- $T_f$  est la température finale [K].

Donc, pour permettre un maximum d'énergie thermique emmagasinée, il est utile d'utiliser des matériaux à forte capacité thermique.

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

- Le stockage par les fluides (l'eau, l'huile, les sels fondus). Ils offrent une grande capacité de stockage d'énergie thermique, spécialement l'eau qui est peu coûteuse et facilement disponible. Cependant, ses principaux inconvénients sont : La corrosion, les fuites, une isolation coûteuse en raison de la pression de vapeur élevée et un grand changement de volume [37].

Matériaux	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/(kg.K))	Capacité thermique volumétrique (10 <sup>6</sup> 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
Fer	7900	452	3,57
Acier	7840	465	3,68
Terre graveleuse	2050	1840	3,77
Magnétite	5177	752	3,89
Eau	999	4182	4,17

**Tab.2.4. Propriétés thermophysiques des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C [39].**

### 3.2. Stockage thermique par chaleur latente

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est emmagasinée grâce au changement d'état d'un matériau de stockage. La chaleur latente est la quantité de chaleur absorbée ou restituée par un matériau lors de son changement de phase, à température et pression constantes. Elle s'exprime ainsi [37] :

$$Q_{\text{latente}} = m L_s \quad (5)$$

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

$L_s$  la chaleur massique de changement d'état du matériau (J/kg).

Les matériaux de stockage par chaleur latente permettent d'emmagasiner une grande quantité de chaleur dans une masse et un volume plus faibles de matériau, avec seulement une faible variation de température par rapport aux supports de stockage de chaleur sensible.

Les matériaux utilisés comme supports de stockage de chaleur latente sont connus sous le nom de Matériaux à Changement de Phases (MCP) [37].

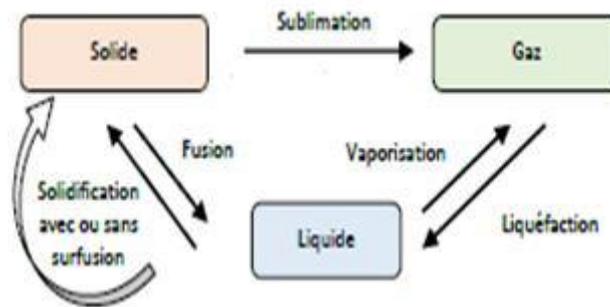


Fig.2.9. Diagramme d'un changement d'état d'un matériau.

Selon les propriétés thermophysiques des phases obtenues (solide, liquide et gaz), les valeurs des chaleurs latentes et les niveaux de température de chaque type de transformation (changement de phase du : solide au liquide, solide au solide ou liquide au gaz) présente plusieurs avantages et inconvénients. Certains de ces avantages et de ces inconvénients sont résumés dans le tableau (Tab.2.5) suivant [37].

Type de transformation	Avantages	Inconvénients
<b>Liquide au Gaz</b>	La valeur de la chaleur latente est grande	Le changement de volume est important
<b>Solide au Solide</b>	Le changement de volume est faible Pas de formation de fluide	La valeur de la chaleur latente est faible
<b>Solide au Liquide</b>	Le changement de volume est faible	La valeur de la chaleur latente est moyenne
<b>Solide au Gaz</b>	La valeur de la chaleur latente est importante	Le changement de volume est important

Tab.2.5. Avantages et inconvénients des différents changements d'états.

La capacité du stockage de systèmes de stockage de la chaleur latents est influencée par [40] :

- ✓ Pèsent de moyen du stockage de la chaleur.
- ✓ Chaleur spécifique dans phase solide et liquide.
- ✓ Différence entre la température initiale et température de fusion.
- ✓ Différence entre température de fusion et température finale.
- ✓ Chaleur spécifique de fusion.

Le stockage par chaleur latente permet de stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses et des volumes réduits.

### 3.2.1. Les avantages du stockage par chaleur latente [41]

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

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

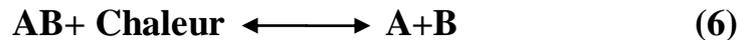
### 3.2.2. Importance du stockage thermique latent

Contrairement au stockage sensible, ce type de stockage peut être efficace pour des différences de températures très faibles. En plus de l'avantage de l'aspect statique de la température de solidification ou de fusion lors du stockage ou du déstockage de la chaleur latente, la capacité de stockage de cette énergie est beaucoup plus importante que celle de la chaleur sensible : par exemple, si on prend le cas de l'eau, sa chaleur latente de fusion est de 80 kcal/kg, la fusion de un kilogramme d'eau est équivalent donc à 93 kWh/m<sup>3</sup>, soit 15,5 fois la capacité de stockage sous forme de la chaleur sensible [42] .

La quantité de chaleur mise en jeu sous forme latente pour une faible plage de température est beaucoup plus importante d'une manière générale que celle fournie sous forme de chaleur sensible. Ainsi, le stockage latent est plus performant comparé à celui sous forme sensible [43].

## 3.3 Stockage thermo-chimique

Le stockage thermochimique s'appuie sur un mécanisme physico-chimique réversible :



Le matériau AB absorbe de la chaleur ce qui engendre l'apparition des deux composants A et B, distincts, pouvant être stockés séparément. Ce phénomène endothermique est appelé la charge, phase de stockage de chaleur. Inversement la mise en contact des composants A et B provoque la formation d'un composant AB et la libération de chaleur. Ce phénomène exothermique correspond à la décharge, phase de restitution de chaleur. Chaque système faisant un appel au stockage thermochimique possède un cycle de fonctionnement s'articulant en ces deux étapes de charge et de décharge. Les matériaux associés à ce type de stockage sont primordiaux car l'efficacité des systèmes en dépend [44].

### 3.4. Les principales applications du stockage de l'énergie

Les systèmes de stockage de l'énergie par chaleur latente, dans lesquels on utilise des matériaux à changement de phase, font l'objet de nombreux travaux. De nouvelles techniques de stockage et d'utilisation sont nécessaires pour la récupération des différentes énergies alternatives (énergie solaire, géothermique, éolienne,...).

**Sharmaa [26]**, a récapitulé des travaux de recherche sur ce sujet en examinant les systèmes de stockage avec MCP et leurs applications à savoir la technologie solaire, l'isolation des bâtiments et en aérospatiale. Il a aussi présenté les techniques de mesure de la chaleur latente et de la température de fusion.

#### 3.4.1. Les capteurs solaires à eau

**Kurklu et al. [27]**, ont réalisé un nouveau type de capteur solaire. Ce capteur présente deux sections (Fig.2.11), une remplie avec de l'eau et l'autre avec un matériau à changement de phase : de la paraffine dont la température de fusion est située entre 45÷50°C. Les résultats expérimentaux ont montré que, pour une journée avec un ensoleillement élevé, la température du réservoir est maintenue à 30 °C pendant toute la nuit.

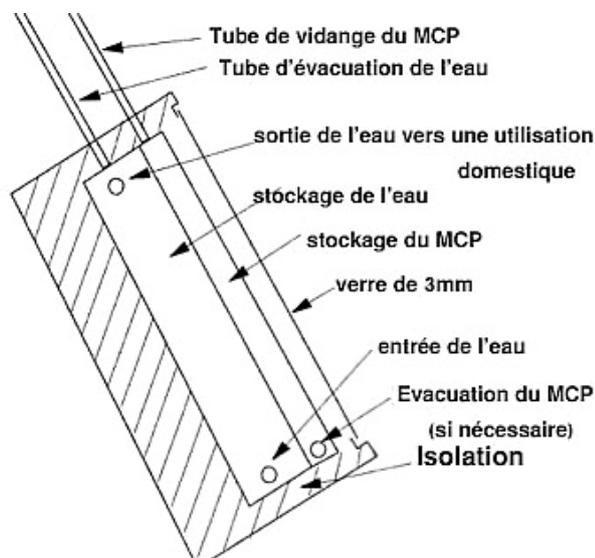


Fig.2.10. Schéma du capteur solaire et de ses différents composants [41]

### 3.4.2 Les capteurs solaires à air

**Morrison et al.** [27] ont évalué les performances des systèmes de chauffage solaire de l'air à changement de phase en utilisant l'unité de stockage d'énergie. Les principaux objectifs de leur travail étaient de déterminer l'effet de la chaleur latente de fusion du MCP sur la performance thermique de l'air des systèmes de chauffage solaire et d'élaborer des modèles empiriques de stockage d'énergie.

La principale conclusion était que le MCP devrait être choisi sur la base du point de fusion plutôt que de sa chaleur latente [41].

### 3.4.3. Les fours solaires

Le principe d'un four solaire ou cuiseur solaire est de concentrer les rayons du soleil sur un appareil de cuisson grâce à des réflecteurs, pour chauffer son contenu.

**Muthusivagami** [28] a classé les fours solaires en deux types :

- les fours solaires (Figure 20) sans stockage (four direct et four indirect) et les fours solaires avec stockage, dont les cuisinières solaires doivent contenir un matériau à stockage pour stocker la variation d'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible ou latente ou thermochimique [41].

### 3.4.4. Le textile

Dans l'industrie textile, les MCP sont utilisés sous forme de microcapsules placées au cœur des fibres qui absorbent, stockent et libèrent l'énergie de façon réactive afin de réchauffer lorsqu'il fait froid ou de rafraîchir lorsqu'il fait chaud. De cette manière, la température corporelle sera régulée passivement en fonction de la température ambiante et donc il est plus judicieux de choisir un MCP dont les températures de fusion et de cristallisation sont très proches de la température superficielle du corps humain [41].

Les applications les plus nombreuses dans ce domaine se font actuellement autour des vêtements de montagne, de sport, de travail et de sécurité, des textiles techniques à usage médical et des combinaisons d'astronautes.



---

***Chapitre III***  
***Procédure***  
***Expérimentale***

---



## 1. Introduction

Nous nous intéressons dans ce chapitre à l'étude expérimental du phénomène de stockage thermique lors de la fusion d'un matériau à changement de phase (MCP) contenu dans une cavité thermique en métal et parfaitement isolée. Les expériences sont menées au niveau du laboratoire de recherche énergétique et thermique appliquée ETAP de l'université de Tlemcen, faculté de technologie. L'objectif de ce chapitre est de décrire le principe de fonctionnement du banc d'essai, les méthodes utilisées dans la réalisation des différentes manipulations et le rôle de chaque équipement employé.

## 2. Description du dispositif expérimental



**Fig. 3.1. Photos de matériels utilisés dans les expériences.**

Le MCP liquide (paraffine) est versée dans une cavité thermique (de forme carrée 15,5 cm × 14cm et 6 cm de profondeur) fabriquée en métal. Les deux faces latérales (gauche et droite) de la cavité sont chauffées par un réchauffeur électrique. Pour diminuer au maximum les pertes thermiques, la cavité est isolée par la laine de roche et le tout est placé dans une enceinte en bois. Neufs thermocouples de type K sont immergés dans la paraffine et répartis uniformément (équidistance) afin de mesurer l'évolution thermique de la paraffine lors de la fusion. Une chaîne d'acquisition de type NI (National Instruments) est reliée à l'ordinateur (PC) par un câble USB pour enregistrer instantanément l'évolution de la température de la paraffine. Une

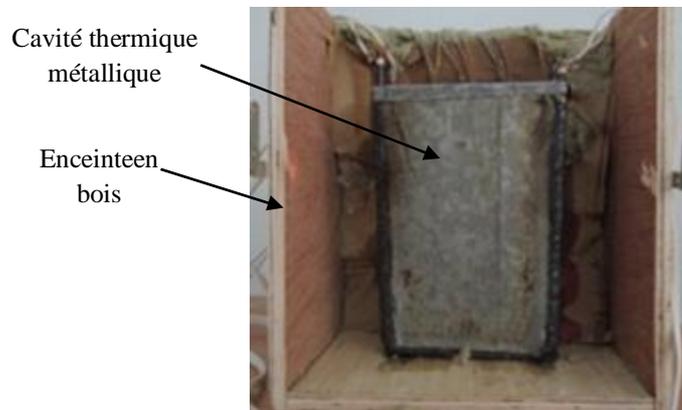
interface graphique est développée à l'aide du logiciel LabVIEW pour l'acquisition numérique des températures.

### 3. Méthodes de réalisation

#### 3.1. Préparation de l'enceinte MCP

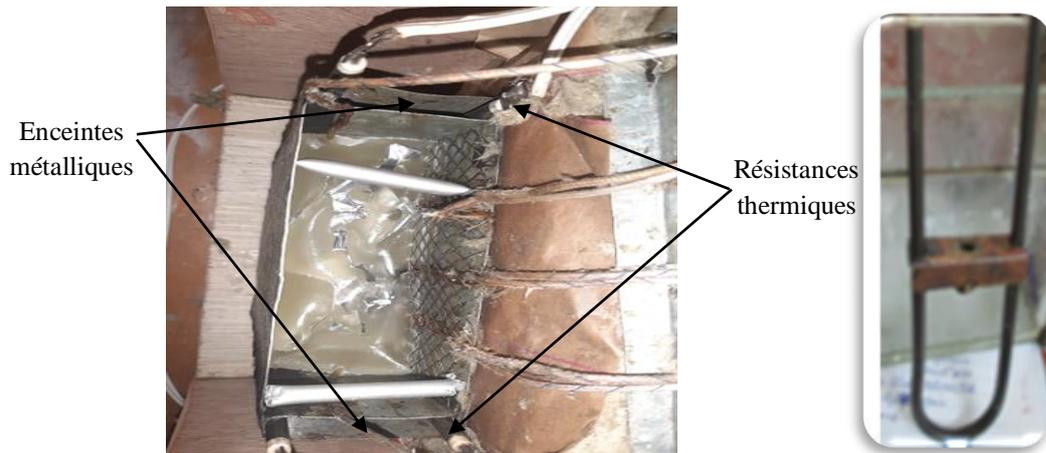
La cavité thermique est réalisée de la manière suivante :

1. Deux petites enceintes métalliques sont d'abord fabriquées pour héberger les deux résistances chauffantes.
2. Les deux (02) logements des résistances sont soudés avec une autre enceinte métallique (plus grande) afin de réaliser la cavité thermique de forme cubique (figure 3.2a)



**Fig. 3.2a. Cavité thermique**

3. Deux résistances électriques de 10 W de puissance sont coudées et logées à l'intérieur des deux petites enceintes métalliques (figure 3.2b). La résistance est forcée à l'intérieur des tôles pour assurer un meilleur contact et maximiser le transfert de chaleur par conduction.



**Fig. 3.2b. Résistance électrique**

4. La cavité thermique est isolée par de la laine de roche et placée ensuite dans une enceinte en bois afin de diminuer au maximum les pertes de chaleur (figure 3.3).



**Fig. 3.3. Isolation de la cavité thermique**

### 3.2. Matériau à changement de phase

Les cires de paraffine existent généralement sous forme de mélange d'hydrocarbures dont le changement de phase se fait sur un intervalle de température où les phases liquides et solides coexistent. Le choix de la cire de paraffine convenable repose sur plusieurs critères thermodynamiques dont les plus importants sont : la plage de température de fusion dans la gamme souhaitée, la chaleur latente par unité de masse élevée et la capacité calorifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.

Dans notre étude, le MCP utilisée est de type paraffine appelée Tétracosane, de formule chimique  $C_{24}H_{52}$  (Figure 3.4) et dont les propriétés thermo-physiques sont représentées sur le tableau 3.1.



**Fig. 3.4. Paraffine utilisée comme MCP.**

Tableau 3.1. Propriétés thermo-physiques de la paraffine (Tétracosane).

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	255	0,2	2

Pour remplir la paraffine dans la cavité thermique, d'abord, elle est initialement fondue sur un feu doux pour ne pas atteindre les grandes températures et perdre ses caractéristiques. Une fois la paraffine liquide, elle est versée dans la cavité thermique qui elle-même est placée dans de l'eau chaude tenue entre (50 ÷ 60 °C).

### 3.3. Positionnement des thermocouples

Il existe un grand nombre de types de thermocouples fabriqués de différents matériaux et alliages. Des matériaux différents vont entraîner une sensibilité différente et donc une tension générée différente à température égale. Cela influencera leurs caractéristiques comme la température maximale d'utilisation. On trouve plusieurs types à savoir : J, T, K, L, N, B, E, R, S.

Dans nos expériences, l'utilisation des thermocouples de type K permet une mesure dans une gamme de température large : -250 à 1 372 °C. Ils sont aussi bon marché, mais ne permettent pas une mesure à 0 °C.

Pour fixer les thermocouples à l'intérieur du MCP aux positions désirées, une grille métallique est plongée parallèlement à la surface arrière de la cavité (figure 3.5a). Les positions des thermocouples sont indiquées dans la figure 3.5b.

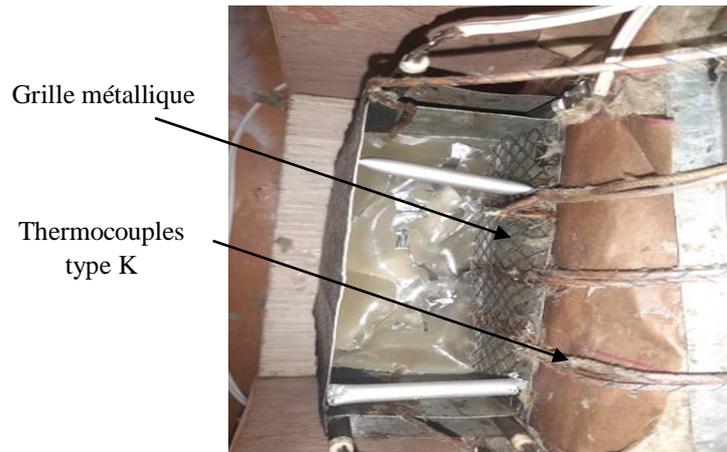


Fig. 3.5a. Fixation des thermocouples sur la grille à l'intérieur de la cavité thermique.

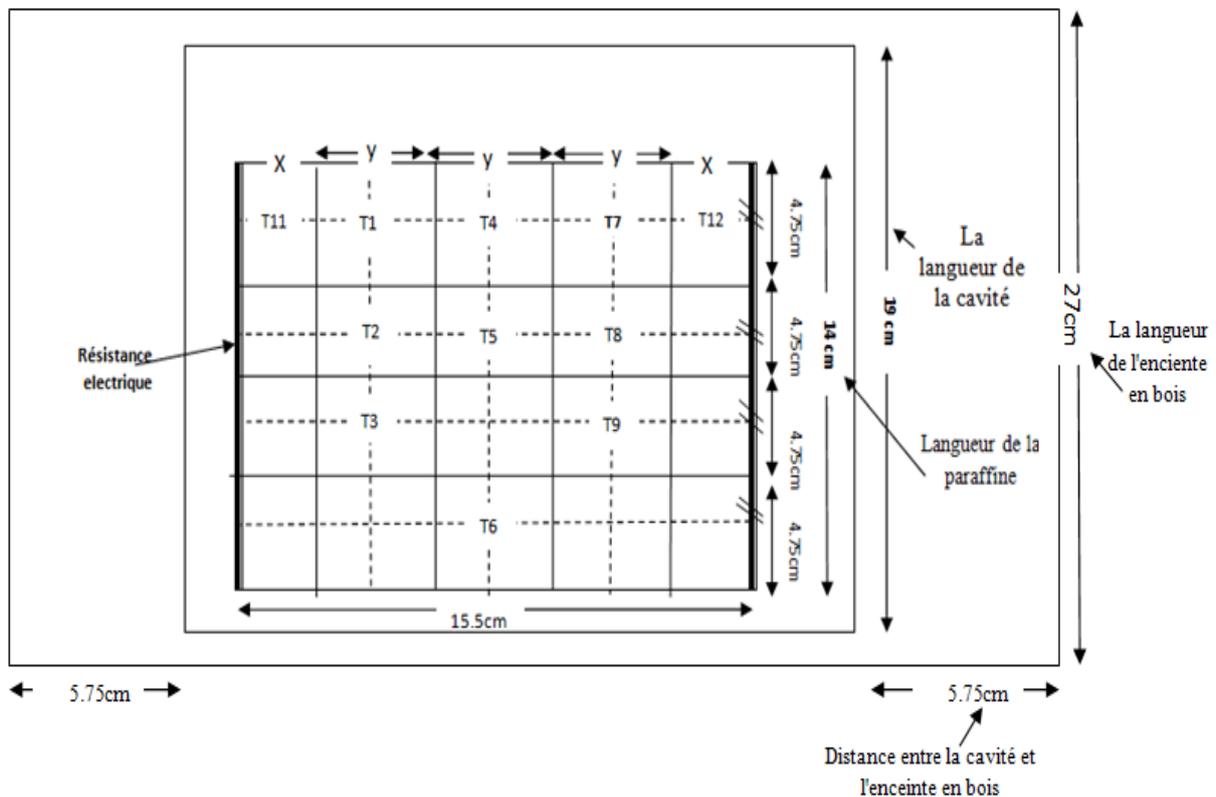


Fig. 3.5b. Positions des thermocouples à l'intérieur de la cavité thermique

Les thermocouples sont reliés de l'autre côté directement vers les modules de l'interface de mesure (LabView) (Fig. 3.6) pour enregistrer et afficher les valeurs des températures et pouvoir suivre directement l'évolution graphique des températures durant toute l'expérience.



**Fig. 3.6. Module d'acquisition NI avec les capteurs de température.**

#### **4. Logiciel utilisé (LabVIEW)**

**Labview** (**L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench) est un logiciel de la société National Instruments qui permet facilement de configurer des instruments, piloter des manipulations, recueillir et traiter des données. Toute application LabVIEW est appelée un instrument virtuel que nous noterons VI. Le mode de programmation est graphique (appelé langage G) mais il est basé sur la notion de programmation orientée objet. Le contrôle est effectué par un flux de données (les opérations contenues dans un bloc seront exécutées quand toutes les données seront présentes à l'entrée du bloc qui représente un nœud du graphe). Pour chaque instrument ou bus ou carte d'acquisition, il existe une bibliothèque de programmes de configuration qui fournit la face avant de l'instrument et convertit les commandes et les mesures. LabVIEW permet ainsi de commander par programmation des manipulations et de recueillir et traiter les données.

## 4.1. Présentation de l'interface d'une interface LabVIEW

### ✚ Face-avant (Interface utilisateur)

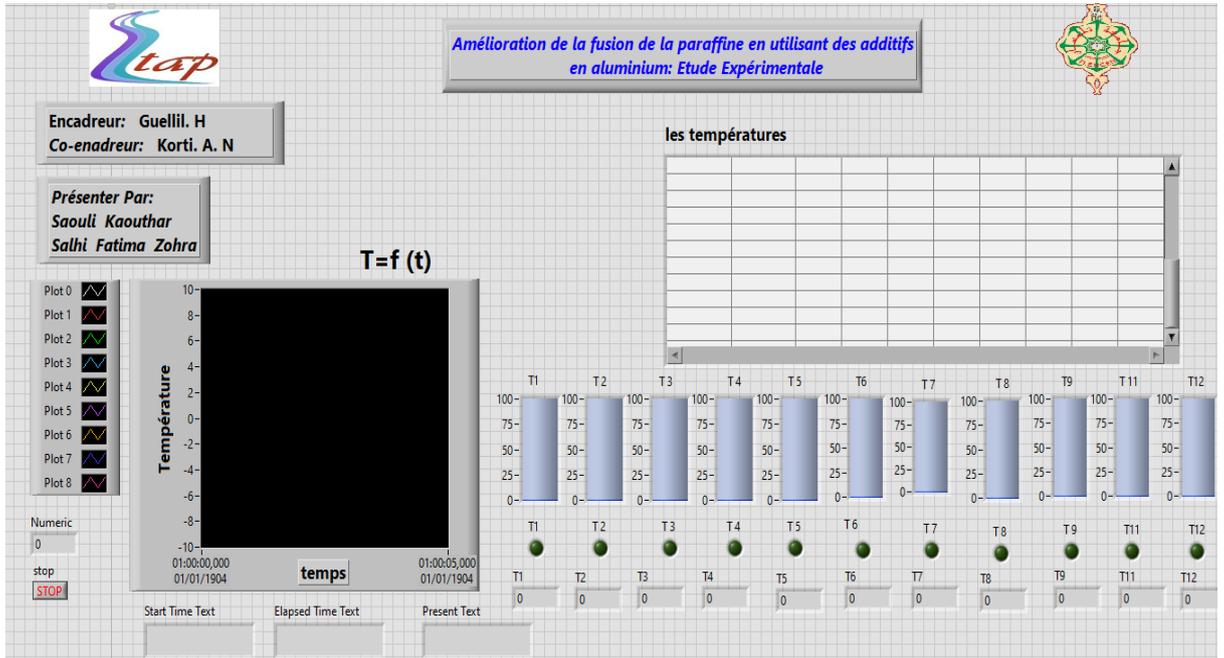


Fig. 3.7. Interface LabVIEW (face avant).

### ✚ Interface arrière (block diagram)

#### ❖ Diagramme

Le diagramme contient le code source graphique des instruments virtuels. On programme le VI pour contrôler et remplir les fonctions sur les entrées et sorties créées dans la face avant. Le diagramme peut contenir des fonctions et des structures issues des bibliothèques de Visintégrées à LabVIEW. Il peut aussi contenir des terminaux associés à des commandes et à des indicateurs créés dans la face avant.

## 4.2. Description du logiciel

### ▪ Boucle while

Comme les boucles Do et les boucles Repeat-Until des langages de programmation textuels, les boucles While, représentées ci-après, exécutent un sous-diagramme jusqu'à ce qu'une condition ait lieu. La boucle While exécute le sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition, un terminal d'entrée, reçoive une valeur booléenne particulière. Par défaut, le comportement et l'apparence du terminal de condition, représenté ci-après, correspondent à **Arrêter sur condition Vraie**. 

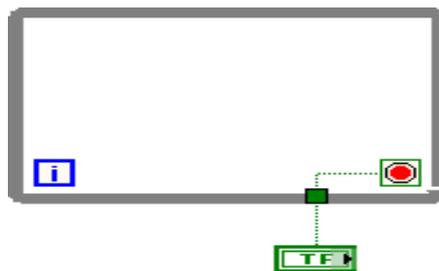


Fig. 3.8. Boucle while

Lorsqu'un terminal de condition est défini sur **Arrêter sur condition Vraie**, la boucle While exécute son sous-diagramme jusqu'à ce que le terminal de condition reçoive une valeur VRAI.

### ❖ Acquisition de données par LabVIEW

#### ▪ Interface DAQ ASSISTANT

DAQ Assistant est un système d'acquisition de données (DAQ) qui utilise un périphérique d'acquisition de données pour transmettre un signal électrique conditionné à un ordinateur à des fins d'analyse et d'enregistrement des données dans un fichier Excel. Cette interface comporte des indicateurs, DAQ assistant, boucle while, tableaux, et graphes.

#### ▪ Forme graphique

LabVIEW inclut le graphique pour afficher les données généralement acquises à une vitesse constante. Le graphique accepte également plusieurs types de données, ce qui minimise la nécessité de manipuler les données avant de les afficher.

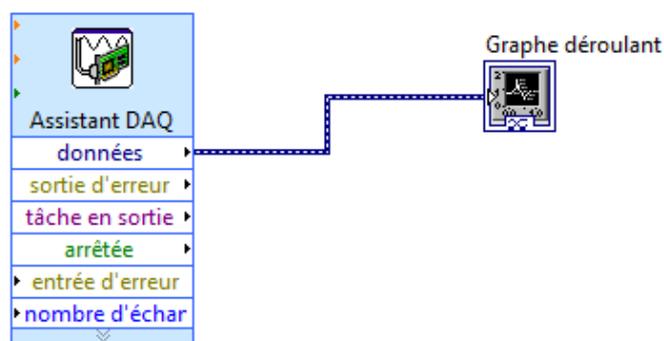


Fig. 3.9. Création du graphe.

▪ **Tableaux** : utilisés pour définir les entrées ou les sorties de données de type tableau. L'indicateur table affiche les données générées.

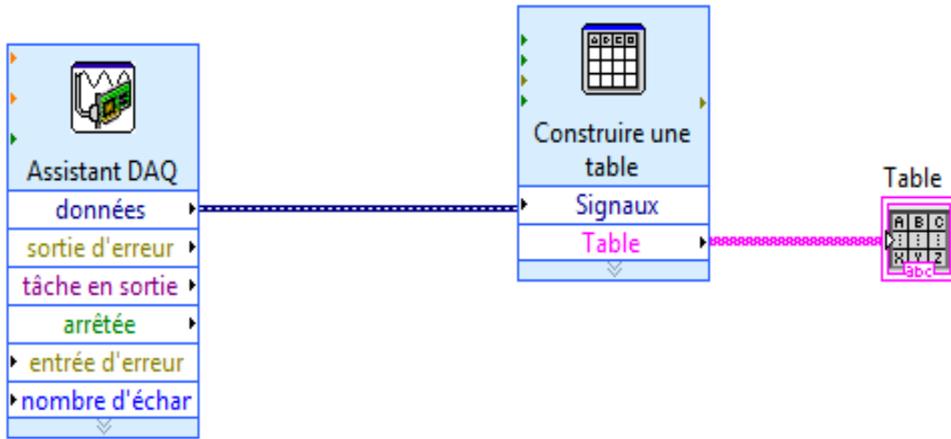


Fig. 3.10. Création d'un tableau de données.

- **Enregistrer les données sur un fichier Excel**

Les données générées et analysées par le VI sont enregistrées dans un fichier Excel.

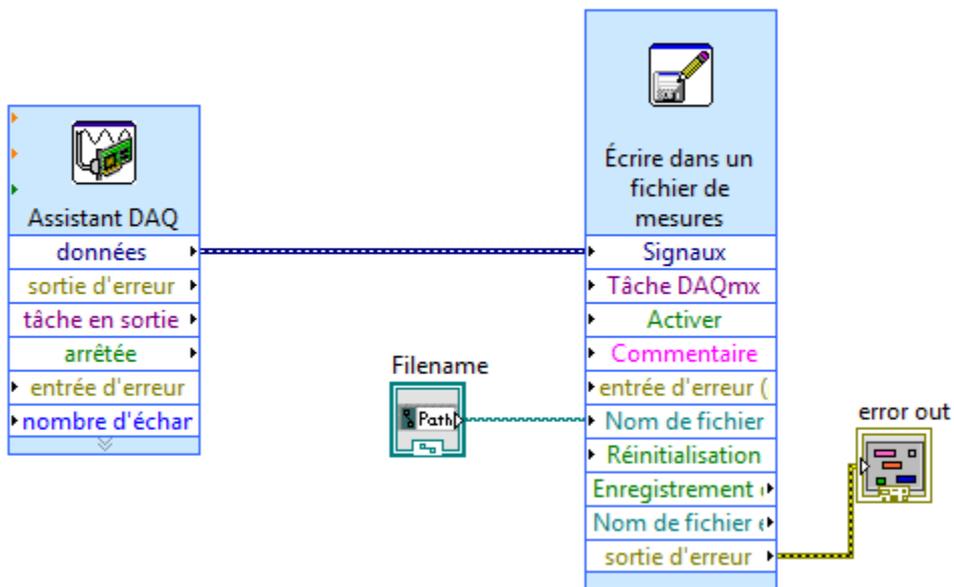


Fig. 3.11. Création d'un fichier d'enregistrement des mesures.

## 5. Expériences menées

### 5.1. Paraffine seule

La première partie des expériences consiste à étudier le comportement thermique durant la fusion de la paraffine seule. Les deux résistances électriques développent une puissance de  $2 \times 10$  W répartie uniformément sur les deux faces (gauche et droite) de la cavité pour faire fondre la paraffine. On suit alors l'évolution des températures dans les endroits sélectionnés précédemment.



Fig. 3.12. Paraffine seule (vue du haut)

### 5.2. Utilisation des additifs en aluminium

Pour accélérer la fusion de la paraffine, on propose intégrer des additifs en aluminium dans la paraffine. Au lieu d'intégrer des feuilles percées qui peuvent entraîner une répartition non homogène de la matière additive, le présent travail repose sur l'ajout de petites coupes (additifs) de ces feuilles en aluminium percées et à différents dosages 10 gr (1.24%) et 20 gr (2.45%). Les additifs sont réalisés à partir de feuilles minces percées en aluminium (Fig. 13) avec des dimensions assez identiques. Ils sont pesés et placés dans la cavité de manière à remplir tout l'espace occupé par la paraffine.



**Fig. 3.13. Additifs réalisées à partir de feuilles en aluminium.**



**Fig. 3.13. Pesage et intégration des additifs en aluminium dans la paraffine.**



---

***Chapitre IV***  
***Résultats et***  
***Interprétations***

---



### 1. Introduction

Ce chapitre représente les résultats obtenus au cours des expériences effectuées et discute les différents phénomènes remarqués afin d’obtenir des explications du comportement thermique de la fusion de la paraffine seule et associée avec l’aluminium. Trois expériences ont été réalisées durant l’élaboration de ce travail :

**Expérience n°1 :** étude de la fusion de la paraffine seule

**Expérience n°2 :** étude de la fusion de la paraffine avec 10 g des additifs d'aluminium.

**Expérience n°3 :** étude de la fusion de la paraffine avec 20 g des additifs d'aluminium.

### 2. Expérience n°1 : paraffine seule

#### 2.1. Evolution de la température de la paraffine

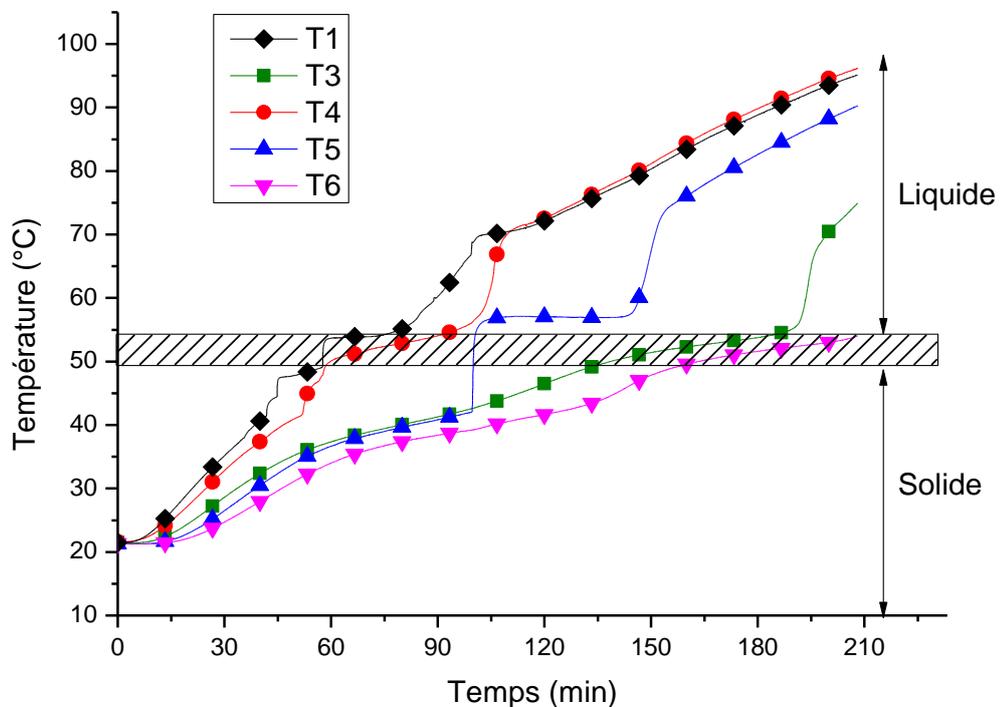


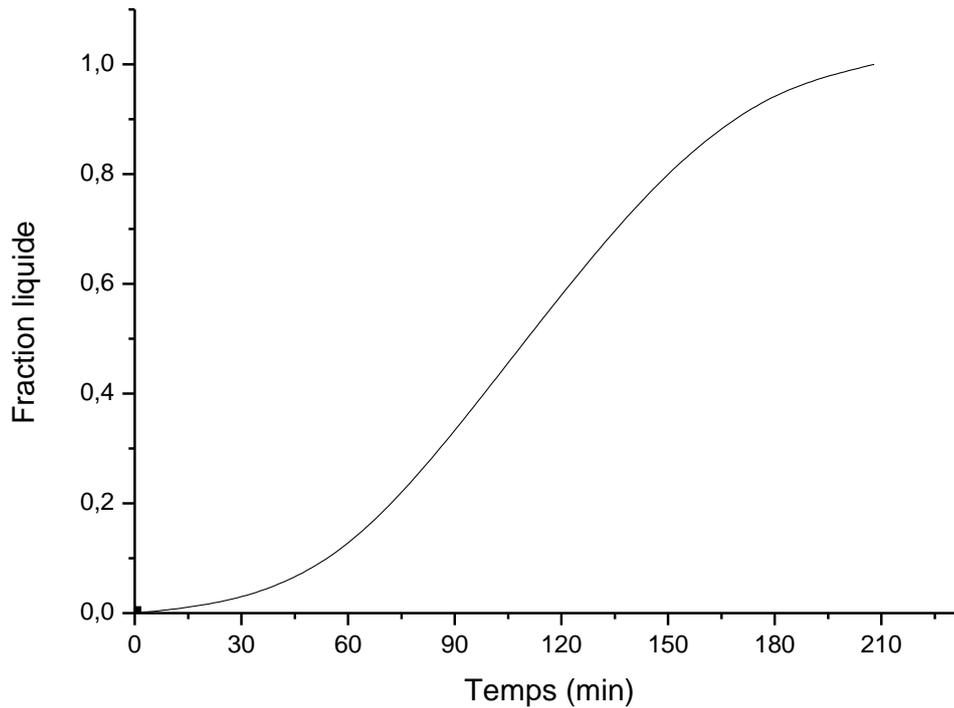
Fig. 4.1. Evolution temporelle de la température de la paraffine seule.

La figure 4.1 montre graphiquement l'évolution temporelle de la température de la paraffine durant la fusion. A  $t = 58$  min, la paraffine commence à fondre dans les positions  $T_4$  et  $T_7$  qui atteignent une température autour de  $49\text{ }^\circ\text{C}$ , température du début de la fusion. La fusion se termine à ces deux endroits après 78 et 90 min où les deux températures dépassent  $54\text{ }^\circ\text{C}$ , température de la fin de fusion. Ensuite, la fusion se propage vers  $T_5$  à 100 min et  $T_3$  à 134 min. Bien que la température  $T_3$  est plus proche de la source de chaleur que  $T_4$  et  $T_5$ , ces deux derniers atteignent la fusion avant  $T_3$ . Cela ne peut avoir lieu que si la convection naturelle prend place et domine le transfert de chaleur dans la partie liquide de la paraffine.

A  $t = 100$  min, la position  $T_5$  entre en fusion et la température augmente rapidement de  $42,5$  à  $55^\circ\text{C}$ . Ce phénomène ne peut être expliqué que par la présence des poches d'air à cet endroit. Ces poches d'air sont le résultat du phénomène de contraction de la paraffine lors de la solidification durant la fin des expériences précédentes. Le dernier point de fusion enregistré est  $T_6$  après autour 208 min.

## 2.2. Evolution de la fraction volumique

La figure 4.2 représente l'évolution temporelle du pourcentage de la paraffine fondu durant le processus de fusion. Ce pourcentage représente le rapport du volume de la paraffine liquide par le volume total de la paraffine. La courbe monte lentement puisque la fraction liquide atteint 12 % après 60 min. Après 120 min, la fraction liquide atteint 58 % indiquant une accélération importante de la fusion. En effet, le processus de la fusion est dominé par la conduction durant la première heure. Après, la convection naturelle commence à dominer le transfert de chaleur entraînant l'accélération du processus de fusion. La fin de fusion est atteinte après 208 min.



**Fig. 4.2. Evolution temporelle de la fraction liquide de la paraffine seule.**

### 2.3. Energie stockée

L'énergie stockée par la paraffine est sous forme d'énergies sensible et latente.

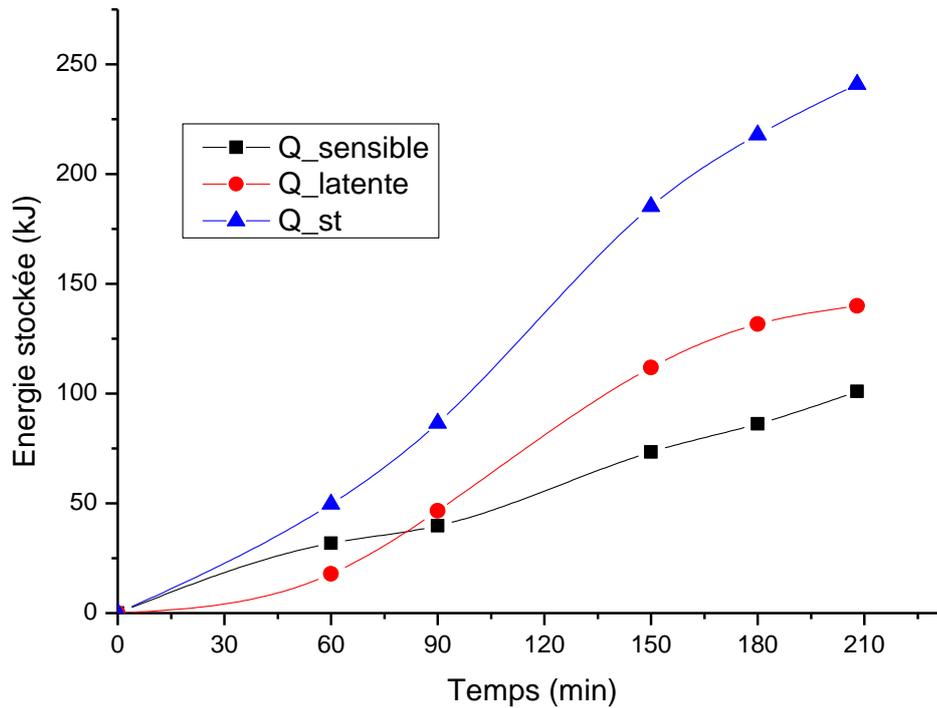
$$Q_{st} = \sum m C_p (T_s - T_i) + m L_f + \sum m C_p (T - T_i) \quad (4.1)$$

$m$  : masse de la paraffine (kg)

$C_p$  : capacité calorifique de la paraffine (kJ/(kg.°C))

$T_s$  et  $T_i$  : température de début et fin de fusion (°C)

$L_f$  : chaleur latente de fusion de la paraffine (kJ/kg).



**Fig. 4.3. Evolution temporelle de l'énergie stockée par la paraffine seule.**

La figure 4.3 représente l'évolution de l'énergie thermique stockée par la paraffine durant le processus de fusion. Jusqu'à  $t = 82$  min, l'énergie stockée par chaleur sensible est toujours plus importante que celle stockée par chaleur latente. La chaleur totale stockée atteint 76 kJ. Après, la fusion s'accélère et l'énergie stockée par chaleur latente devient plus importante. A la fin de la fusion, l'énergie totale stockée atteinte est autour de 240 kJ dont 140 kJ (58%) sont stockés par chaleur latente et 100 kJ (42%) sont stockés par chaleur sensible.

## 2.4. Energie perdue

L'énergie thermique perdue est la somme de l'énergie thermique stockée par la laine de roche et celle évacuée par conduction à travers l'isolant.

### *Pertes par conduction à travers la laine de roche*

$$\Phi_{pr\_cd} = \lambda S \frac{T_i - T_e}{e} \quad (4.2)$$

$S$  : surface de la laine de roche totale normale au flux thermique perdue ( $m^2$ )

$\lambda$  : conductivité thermique de la laine de roche ( $W/(m \cdot ^\circ C)$ )

$T_i$  et  $T_e$  : Température intérieure et extérieure de l'isolant ( $^\circ C$ )

$e$  : épaisseur de la laine de roche (m).

**Energie stockée par la laine de roche**

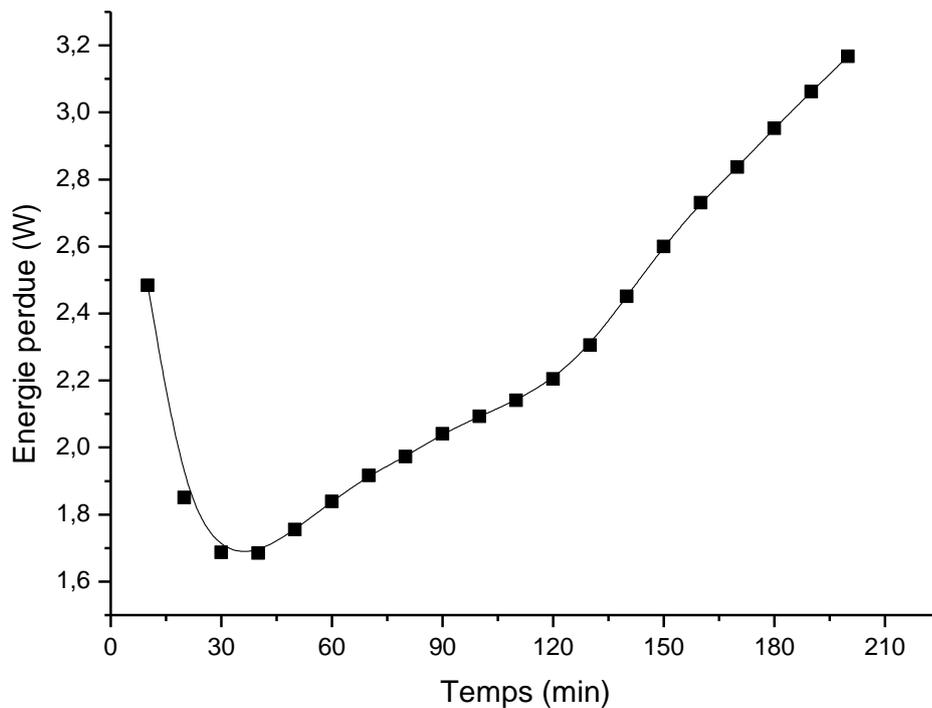
$$\Phi_{pr\_st} = m_{iso} Cp_{iso} \frac{T_{iso}^{t+\Delta t} - T_{iso}^t}{\Delta t} \tag{4.3}$$

$m_{iso}$  : masse de l'isolant (laine de roche) (kg)

$Cp_{iso}$  : capacité calorifique de la laine de roche (kJ/kg.°C)

$T_{iso}^{t+\Delta t}$  et  $T_{iso}^t$  : représentent les températures de l'isolant au temps actuel et le temps précédent.

$\Delta t$  : pas de temps (s)



**Fig. 4.1. Evolution temporelle de l'énergie perdue.**

La figure 4.4 représente l'évolution temporelle des pertes thermique à travers l'isolation durant la fusion de la paraffine seule. Initialement, les pertes thermiques sont assez importantes (2,5 W) et diminuent rapidement jusqu'à atteindre un minimum de 1,7 W après 35 min. C'est le régime transitoire où les gradients des températures sont assez importants entraînant (selon la loi de fourrier) l'augmentation des flux de chaleur. Passant le régime

transitoire, l'augmentation de la température de la source chaude entraîne l'augmentation des pertes thermique qui peuvent atteindre 3,2 W à la fin du processus de fusion.

### 3. Paraffine avec additifs d'aluminium.

#### 3.1. Comparaison entre l'évolution les températures

Pour accélérer la fusion de la paraffine, on propose d'intégrer des additifs en aluminium dans la paraffine à différentes dosages 10 gr (1.24%) et 20 gr (2.45%).

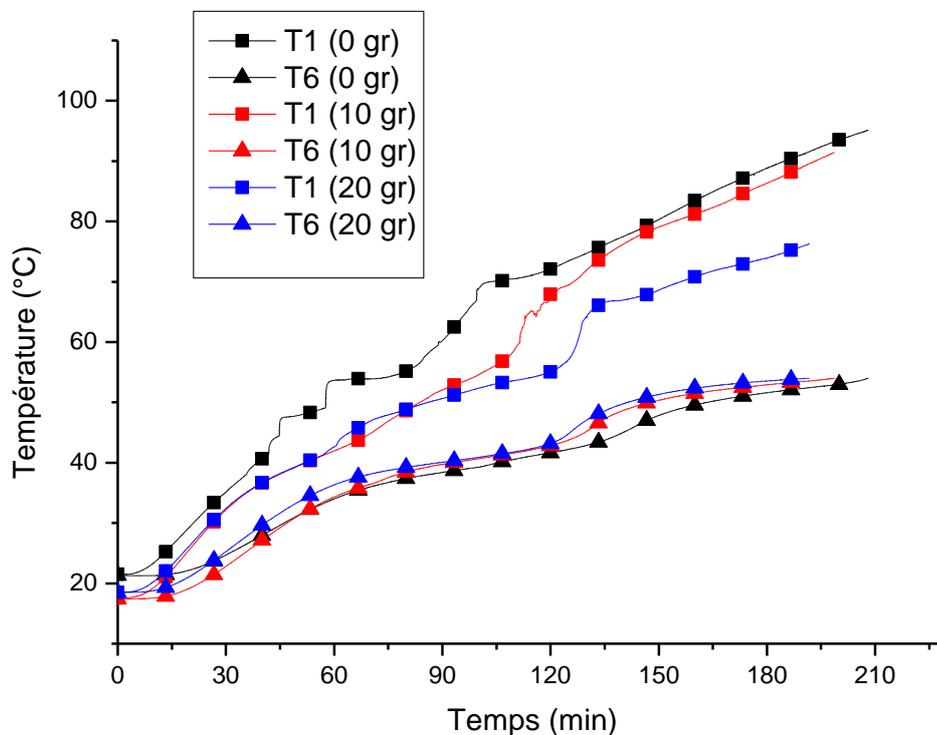


Fig. 4.5. Evolution de la température de la paraffine avec et sans Aluminium

La figure 4.5 montre l'évolution temporelle de la température de la paraffine seule et avec les additifs d'aluminium dans les deux positions extrêmes T<sub>1</sub> et T<sub>6</sub> (début et fin de fusion). Globalement, l'ajout des additifs métalliques en aluminium entraîne la diminution de la température de la paraffine. Après 100 min (mi-temps de fusion), les températures atteignent (68.8, 54.6 et 52.4 °C) à T<sub>1</sub> et (40.9, 40.7 et 39.3 °C) à T<sub>6</sub> pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 gr d'aluminium, respectivement. Après 190 min, les températures atteignent (91.2, 89.1 et 75.1) à T<sub>1</sub> et (53.9, 53.5 et 52.3) à T<sub>6</sub> pour la paraffine seule et la

paraffine avec 10 et 20 gr d'aluminium, respectivement. Ainsi, la température moyenne,  $(T_1+T_6)/2$ , atteint 63.65, 59.48 et 54.78 °C pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 g d'aluminium, respectivement. L'ajout de 10 et 20 g d'aluminium entraîne une diminution de la température de la paraffine par 7 et 14 %.

D'autre part, l'ajout de l'aluminium améliore l'homogénéisation de la température de la paraffine et les écarts moyens,  $T_1 - T_6$ , atteignent 32.6, 24.75 et 17.95 °C pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 g d'aluminium, respectivement. L'ajout de 10 et 20 g d'aluminium améliore l'homogénéisation de la température de la paraffine par 24 et 45 %.

### 3.2. Comparaison de la fraction volumique

La figure 4.6 montre la comparaison entre l'évolution de la fraction liquide de la paraffine avec et sans les additifs d'aluminium. Après 60 min, la fraction liquide atteint 14, 3 et 0 % respectivement pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 g d'aluminium. Cela indique une diminution importante de la vitesse de fusion avec l'ajout des additifs d'aluminium. Après 120 min, la fraction liquide atteint 63, 65 et 68 % respectivement pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 g d'aluminium. Cela indique une accélération remarquable de la vitesse de fusion avec l'ajout des additifs d'aluminium. La fin de fusion est atteinte après 208, 198 et 192 min respectivement pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 g d'aluminium. L'ajout de 10 et 20 g d'aluminium accélère le processus de fusion de la paraffine par 5 et 8 %.

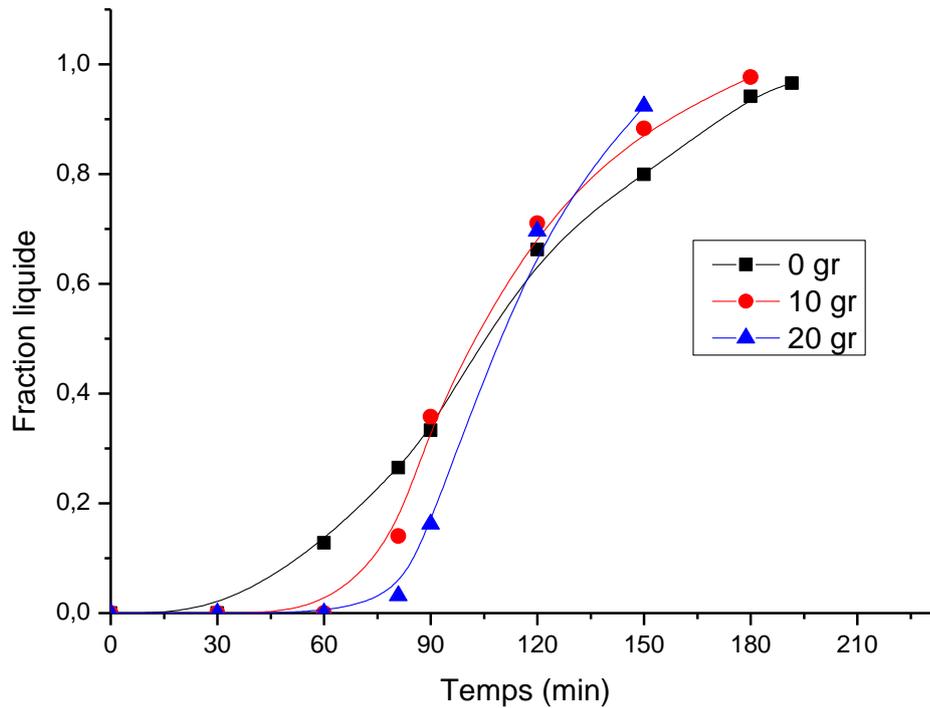


Fig. 4.6. Evolution fraction liquide de la paraffine seule et avec l'aluminium

### 3.3. Comparaison de l'énergie stockée

La figure 4.7 montre l'évolution de l'énergie stockée dans la paraffine avec et sans les additifs d'aluminium. Après 60 min, les résultats montrent que la chaleur stockée atteint 51, 39,5 et 35 kJ respectivement pour la paraffine seule et avec 10 et 20 g d'aluminium. Ainsi, l'ajout de l'aluminium a entraîné une baisse de l'énergie stockée par la paraffine qui a été stockée par chaleur sensible dans les additifs métallique. Après 190 min, la chaleur stockée atteint 225, 233 et 215 kJ respectivement pour la paraffine seule et la paraffine avec 10 et 20 g d'aluminium. Ainsi, l'ajout de 10g d'aluminium améliore le stockage thermique par 3.4 % et l'ajout de 20 g d'aluminium réduit le stockage thermique par 4.4 %.

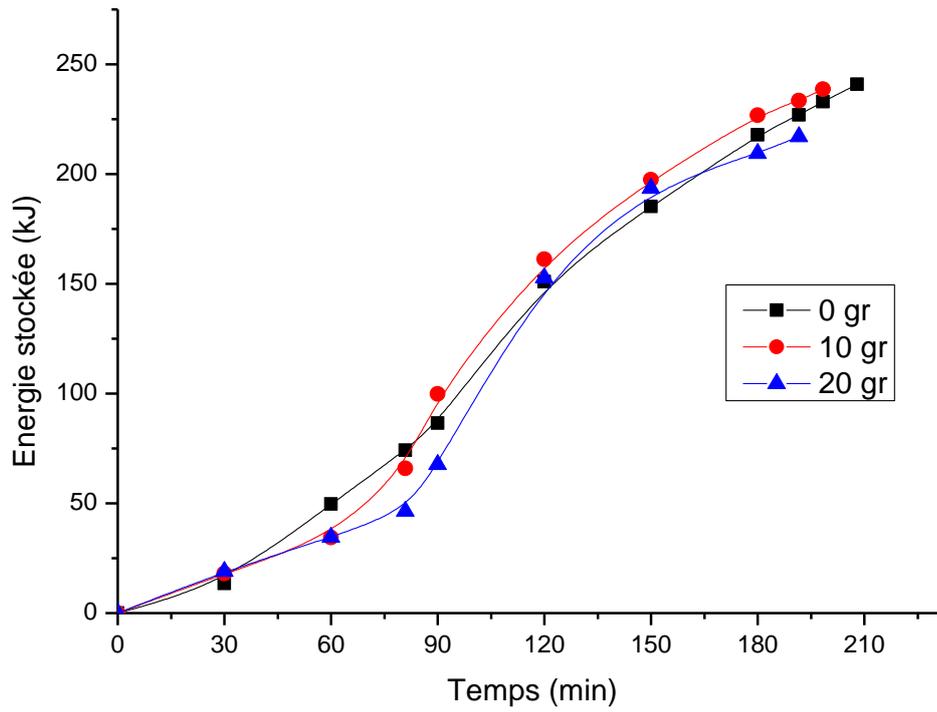


Fig. 4.7. Evolution de l'énergie stockée de la paraffine avec et sans aluminium



---

# *Conclusion Générale*

---



## Conclusion générale

Le stockage de chaleur est devenu aujourd'hui une nécessité qui s'impose au sein de l'industrie énergétique. Dans ce travail, nous avons présenté quelques techniques d'améliorer le système de stockage de chaleur utilisées au fil du temps dans les différents domaines. C'est en s'appuyant sur l'utilisation des matériaux à changement de phase MCP que le stockage par chaleur latente a vu le jour. Il est considéré comme le meilleur par rapport aux autres systèmes de stockage de chaleur, notamment grâce à la possibilité de restaurer la chaleur à température constante. Cependant la faible conductivité thermique des MCP conduit au développement de technologies visant à améliorer le transfert de chaleur au sein de ces matériaux.

Initialement, ce travail a étudié expérimentale l'évolution temporelle du processus de la fusion d'un matériau à changement de phase (la paraffine) dans une cavité isolée et chauffée par les deux côtés latérales. Dans une deuxième partie, la fusion a été améliorée par le rajout des différentes masses des déchets d'aluminium. Une chaîne d'acquisition de type NI a été utilisée pour enregistrer l'évolution thermique de la fusion. Une interface graphique a été développée par le logiciel LabVIEW. Les résultats obtenus montrent:

- ✓ A la fin de la fusion, l'énergie totale stockée par la paraffine seule atteint autour de 240 kJ, dont 140 kJ (58%) et 100 kJ (42%) sont stockée respectivement par voie latente et sensible ;
- ✓ Les pertes thermiques sont très variables et peuvent atteindre 3.2 W à la fin des expériences.
- ✓ L'ajout de 10 et 20 g d'aluminium entraîne une diminution de la température de la paraffine par 7 et 14 % et améliore l'homogénéisation de sa température par 24 et 45 % ;
- ✓ En comparant avec la paraffine seule, l'ajout des additifs en aluminium provoque initialement un retard dans la fusion de la paraffine. Ensuite, les déchets d'aluminium ont permis d'accélérer le processus de la fusion. L'ajout de 10 et 20 g d'aluminium accélère le processus de fusion de la paraffine par 5 et 8 % ;
- ✓ l'ajout de 10g d'aluminium améliore le stockage thermique par 3.4 % et l'ajout de 20 gr d'aluminium réduit le stockage thermique par 4.4 %.

Des perspectives sur de potentielles améliorations du dispositif expérimental et sur le futur général de l'étude de conductivité thermique sont proposées :

- ✓ Nous devons tester d'autres matériaux avec d'autres configurations afin d'obtenir de meilleurs résultats en moins de temps.
- ✓ Effectuer plusieurs simulations avec plusieurs types de MCP afin de déterminer la température de fusion optimale qui permet d'améliorer l'efficacité de la récupération de la chaleur.
- ✓ L'utilisation d'une connexion électrique sur les deux plaques d'une façon intermittente et nous comparons les résultats avec d'autres.
- ✓ Il est intéressant aussi de pouvoir simuler cette étude numériquement pour obtenir des résultats plus précis

## Référence bibliographique

---

- [1] **P. Lamberg, R. Lehtiniemi, A. Henell**, numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *Journal of Thermal Sciences* 43 (2004) pp : 277-284
- [2] **M. Serradj**. Contribution de la fusion des matériaux à changement de phase. Université des sciences et de la technologie MOHAMMED BOUDIAF d'Oran, Thèse de Doctorat, Spécialité: Energétique (2013).
- [3] **X. Xiao, P. Zhang, M. Li**, Preparation and thermal characterization of paraffin/ metal foam composite phase change material, *Appl. Energy* 112 (2013) 1357– 1366.
- [4] **X. Huang et al.**, Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change materials using myristyl alcohol/metal foam for solar thermal storage, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 170 (2017) 68–76.
- [5] **R. Olives, X. Py, Q. Falcoz, P. Neveu, and J. Mancaux**, “Intensification des transferts thermiques dans un module de stockage thermique : suivi du front de fusion par thermographie et simulation numérique,” in *Congrès Français de Thermique* (2014).
- [6] **C. Y. Zhao, W. Lu, and Y. Tian**, “Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs),” *Sol. Energy*, vol. 84, pp. 1402–1412, (2010).
- [7] **Xavier Py, Et Laurent Zalewski**, Caractérisation thermique d’un matériau à changement de phase dans une structure conductrice. Université de Perpignan.
- [8] **F.L. Tan**, Constrained and unconstrained melting inside a sphere, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 35 (2008) 466–475.
- [9] **F.L. Tan, S.F. Hosseinizadeh, J.M. Khodadadi, Liwu Fan**, "Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule" , *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol.52, (2009) 3464–3472.
- [10] **T. K. Aldoss and M. Rahman**, “Comparison between the single-PCM and multi-PCM thermal energy storage design,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 83, pp. 79–87, Jul. 2014.
- [11] **N. Calvet, X. Py, R. Olivès, J. Bédécarrats, J. Dumas, and F. Jay**, “Enhanced performances of macro-encapsulated phase change materials (PCMs) by intensification of the internal effective thermal conductivity,” *Energy*, vol. 55, pp. 956–964, 2013.

## Référence bibliographique

---

- [12] **Mehmet Esen and Teoman Ayhan** « Development of a model compatible with solar assisted cylindrical energy tank and variation of stored energy with time for different phase change materials », Department of Mechanical Education , Firat University, 1995 .
- [13] **P. A. Galione, C. D. Pérez-Segarra, I. Rodríguez, S. Torras, and J. Rigola**, “Multi-layered solid-PCM thermocline thermal storage for CSP. Numerical evaluation of its application in a 50MWe plant,” *Sol. Energy*, vol. 119, pp. 134–150, Sep. 2015.
- [14] **A. Valan Arasu et Arun S. Mujumdar**, Numerical study on melting of paraffin wax with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a square enclosure. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 8–16 (2012)
- [15] **E. Assis, G. Ziskind, R. Letan** « Numerical and Experimental Study of Solidification in a Spherical Shell Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Pearlstone Center for Aeronautical Studies » Ben-Gurion University of the Negev, P.O. Box 653, Beer-Sheva 84105, Israel
- [16] **Chen, Guijun, Sun, Guoxuan, Jiang, Dongyue, et al.** Experimental and numerical investigation of the latent heat thermal storage unit with PCM packing at the inner side of a tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (2020), vol. 152, p. 119480.
- [17] **Heyhat, Mohammad Mahdi, Mousavi, Sepehr, et Siavashi, Majid.** Battery thermal management with thermal energy storage composites of PCM, metal foam, fin and nanoparticle. *Journal of Energy Storage*, 2020, vol. 28, p. 101235.
- [18] **Madruga, Santiago, Haruki, Naoto, et Horibe, Akihiko.** Experimental and numerical study of melting of the phase change material tetracosane. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 98, p. 163-170.
- [19] **Bechiri, Mohammed et Mansouri, Kacem.** Study of heat and fluid flow during melting of PCM inside vertical cylindrical tube. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, vol. 135, p. 235-246.
- [20] **Elfeky, K. E., Ahmed, N et Wang, Qiuwang.** Numerical comparison between single PCM and multi-stage PCM based high temperature thermal energy storage for CSP tower plants. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 139, p. 609-622.

## Référence bibliographique

---

- [21] **K. Luo, F. J. Yao, H. Yi, H. Tan, Lattice Boltzmann** simulation of convection melting in complex heat storage systems filled with phase change materials, *Applied Thermal Engineering*, 86 (2015)238 250.
- [22] **I. Danaila, R. Moglan, F. Hecht et S. Le Masson**, A Newton method with adaptive finite elements for solving phase-change problems with natural convection, *J. Comp. Physics*, 274 (2014) 826-840.
- [23] **J.M. Khodadadi, S.F. Hosseinizadeh**, Nanoparticle-enhanced phase change materials (NePCM) with great potential for improved thermal energy storage, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 34 (2007) 534–543.
- [24] **Monsieur Jean-Pierre Bédécarrats Maitre de Conférences**(utilisation rationnelle de l'énergie par les techniques de stockage et de transport du froid par chaleur latente), université de pau et de pays de l'Adour. 2010
- [25] **R. Baetens,B.P.Jelle,A. Gustavsen**, Phase change materials for building applications; A state-of-the-art review,*Energy Build.*42 (2010) 1361-1368
- [26] **F.Agyenim, N.Hewitt, P.Eames et M.Smyth**, A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS), *Renew.Sustain. Energy Rev.*(2010)
- [27] **Serg Dlaise Ekomy Ango** (contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase) l'Ecole Nationale Supérieure d'Art et Métiers, 2011
- [28] **A. Soupart-Caron**. Stockage de chaleur dans les Matériaux à Changement de Phase. Thèse doctorat, Université Grenoble ALPES.2006.
- [29] **X. Py, R. Olives et 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.
- [30] **Amina Akrouche** ; étude de stockage et de déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase ; mémoire de magister, iniversité M'Hamed BOUGARA (Boumerdes),Ecole doctorale en Energétique et développement Durable 2011
- [31] **Serge Blaise Ekomy Ango** « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase» l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [32] **Boutaoui Meriem** « Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule Elliptique » Université M'Hamed Bougara BoumerdesFaculté des Sciences de L'Ingénieur , Mémoire de Master, page 45, 2016

## Référence bibliographique

---

- [33] **Cheik Seck** «analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat» intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois.
- [34] **Stéphanie Hongois (Ingénieur)** «Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle», L'Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon, 1<sup>er</sup> avril 2011
- [35] **Ahmad Maha**. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, super-isolation, apports solaires. 2004. Thèse de doctorat. Grenoble 1.
- [36] **L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A.D. Gracia et A.I. Fernandez** «  
Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews», Vol. 15, pp. 1675-1695, 2011.
- [37] **Boudali Errebai Farid**; Utilisation des Matériaux à Changement de Phase pour une meilleure efficacité énergétique dans le bâtiment, Thèse de Doctorat en Science, Université des Science et de Technologie HOUARI BOUMEDIENE, 2019 , p30-32-33.
- [38] **Telkes & Al (1978) Telks.M(1978)**. Trombe wall with phase change storage material. Proceedings of the 2nd national passive solar conference. Philadelphia, PA, USA
- [39] **T.Kousko, F.Strub, J.Castaing Lasvignottes, A. Jamil, J.P. Bédécarrats, Second law(2007)**. Analysis of latent thermal storage for solar system, Laboratoire de thermique e énergétique et Procédés, Avenue de l'Université.
- [40] **Milan Ostrya, Pavel Charval** « Materials for advanced Heat storage in buildings » 11<sup>th</sup> International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013.
- [41] **Berreksi Sara et Latarsa Samiha** Simulation numérique du stockage thermique par chaleur latente dans une capsule sphérique, 2016, p 27-28-29
- [42] **Ameri Safa**, "Etude comparative entre un capteur solaire sous vide avec matériaux à changement de phase et un capteur sous vide industriel " Institut Supérieur des Sciences et Technologies de l'Environnement de Borj-Cédria(2011).
- [43] **Salwa B**, Mémoire de mastère, Energétique et transferts, INSAT, 2010.