

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

**Par** :

**BENRAMDANE Mohammed et BELBACHIR Mohammed Walid**

**Sujet**

**Effet de l'inclinaison sur la fusion de la paraffine  
munie de plaques en aluminium**

Soutenu publiquement, le 30 /06/2022, devant le jury composé de :

M. SAIM.R

M. GUELLIL. H

M. KORTI.A.N

Mme. MISSOUM.K

Professeur

MCA

Professeur

Doctorante

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

# Remerciements



Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail. Nos vifs remerciements vont à nos promoteurs, Monsieur KORTI A.N, Mme Missoum.K pour leur support, leur aide, leurs critiques constructives, leurs explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de leurs orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Un grand merci à Monsieur GUELLIL.H, pour ses multiples interventions, ses précieux conseils et ses orientations pour le bon déroulement de cette étude.

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

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



# *Dédicace*



*Tout d'abord merci à Dieu de m'avoir donné la force pour  
terminer ce travail.*

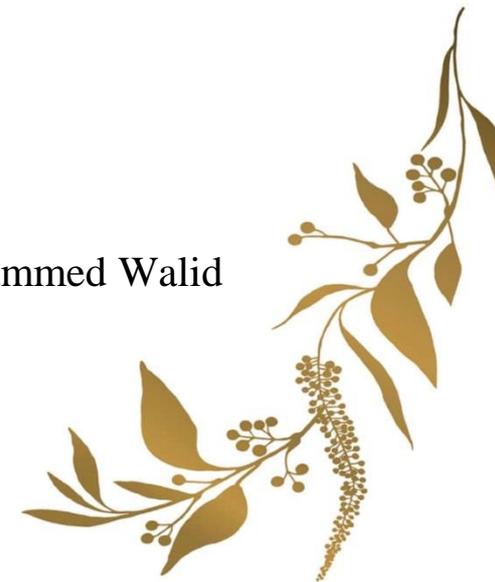
*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents qui ont toujours été derrière moi et qui m'ont  
toujours encouragé dans mon travail.*

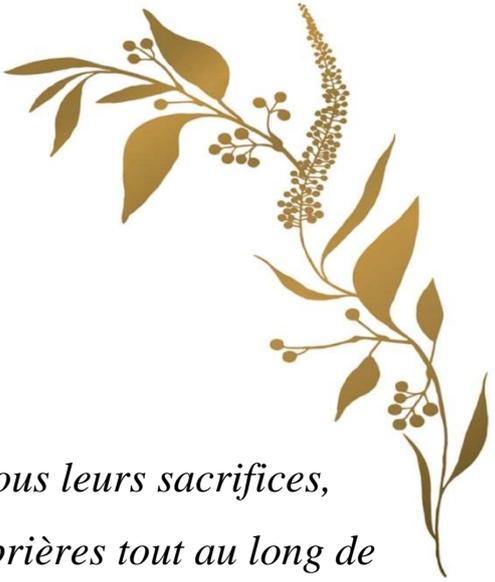
*Mes très chers frères et chères sœurs*

*Mon binôme pour son sérieux dans la réalisation de ce  
mémoire.*

*Mes toute familles et mes amis chacun son nom.*



BELBACHIR Mohammed Walid



# *Dédicace*



*A mes chers parents **Ahmed** et **Fatima**, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

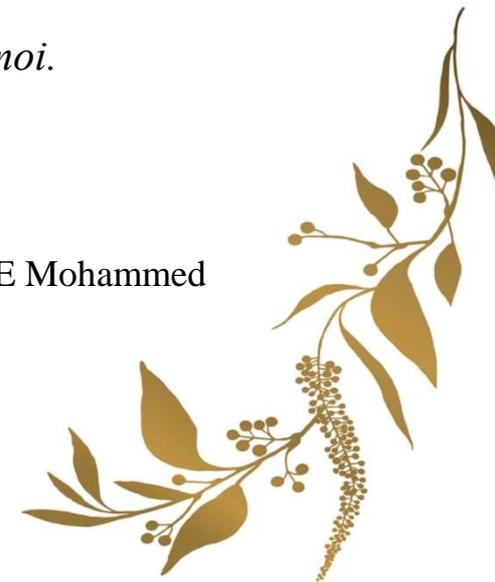
*A mes chères sœurs **Amina**, **Meriem**, **Hafsa**, et mes frères **Bader Eddine** et **Abdelmonaim** pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*

*A mon Binôme **Walid***

*A toute mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

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

*Merci d'être toujours là pour moi.*



BENRAMDANE Mohammed

## ملخص

يتعلق العمل الحالي بتحقيق طاولة اختبار للدراسة التجريبية للتطور الزمني لدرجة الحرارة أثناء عملية ذوبان البارافين المزودة بألواح ألمنيوم مثقبة (1% من الكتلة الكلية)، لفهم عملية الاندماج وظاهرة الحمل الحراري الطبيعي بشكل أفضل ، نستخدم تجويفًا مملوءًا ببارافين يدمج ألواح الألمنيوم كمادة مضافة. لمعرفة تأثير الحمل الحراري ، يتم تسخين التجويف من جانب واحد وتوجيهه في ثلاث زوايا ، وهي: من أسفل (0 درجة) ، مائل (45 درجة) ومن الجانب (90 درجة). لفهم وتصور السلوك الحراري ، استخدمنا كاميرا تعمل بالأشعة تحت الحمراء وبرنامج LabVIEW لالتقاط بيانات التشغيل.

**الكلمات المفتاحية:** مواد تغيير الطور ، الانصهار ، تغيير المرحلة ، لافيو ، كاميرا حرارية

## Abstract

The present work concerns the realization of a test bench for the experimental study of the temporal evolution of the temperature during the melting process of paraffin with perforated aluminium plates (1% of the total mass). To better understand the melting process and the phenomenon of natural convection, we use a cavity filled with paraffin with aluminium plates as an additive. To see the effect of convection, the cavity is heated from one side and oriented at three angles: from below (0°), inclined (45°) and from the side (90°). In order to understand and visualise the thermal behaviour an infrared camera and LabVIEW software were used to capture the operating data.

**Keywords:** PCM, Aluminum, Melting, Inclination, LabView , Infrared camera

## Résumé

Le présent travail porte sur la réalisation d'un banc d'essai pour l'étude expérimentale de l'évolution temporelle de la température durant le processus de fusion de paraffine munie de plaques d'aluminium perforées (1 % de la masse totale). Pour mieux comprendre le processus de la fusion et le phénomène de la convection naturelle, nous utilisons une cavité remplie par la paraffine intégrant des plaque d'aluminium comme additive. Pour voir l'effet de la convection, la cavité est chauffée d'un côté et orientée selon trois angles à savoir : par le bas (0°), incliné (45°) et par le coté (90°). Afin de comprendre et visualiser le comportement thermique ont utilisé une caméra infra-rouge et le logiciel LabVIEW pour capter les données de fonctionnement.

**Mots clés :** MCP, Aluminium, Inclinaison, Fusion, LabVIEW, Caméra infra-rouge

## Sommaire

Résumé .....	I
Sommaire .....	II
Liste des figures .....	IV
Liste des tableaux .....	V
Nomenclature et abréviation .....	IV
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 Stockage thermique et matériaux de changement de phase. ....</b>	<b>4</b>
1.1. Stockage thermique .....	5
1.2. Différents types de stockage.....	6
1.1.1. Stockage sensible .....	6
1.1.2. Chaleur latente .....	8
1.1.4. Stockage thermochimique.....	9
1.1.5. Comparaison entre les types de stockage thermique .....	10
1.2. Matériaux à changement de phase (MCP).....	11
1.2.1. Classification des MCP .....	13
1.3. Composants organiques .....	14
1.3.1. Paraffines .....	15
1.3.1.1. Avantages et inconvénients des paraffines.....	17
1.3.1.2. Différentes cires paraffiniques .....	18
1.3.1.3. Conditionnement des paraffines .....	19
1.3.2. Composés organiques non-paraffiniques .....	20
1.4. Composés inorganiques .....	22
1.4.1. Sels hydratés.....	22
1.5. Eutectiques .....	23
<b>Chapitre 2 Recherche bibliographique .....</b>	<b>24</b>
2.1. Introduction .....	25
2.2. Travaux antérieurs .....	25
<b>Chapitre 3 Procédure expérimentale.....</b>	<b>42</b>
3.1. Introduction.....	43
3.2. Description de l'installation .....	43
3.3. Méthodes de réalisation .....	46
3.3.1. Réalisation de l'enceinte MCP .....	46
3.3.2. Positionnement des thermocouples .....	46
3.3.3. Isolation de la cavité thermique .....	48

3.4	Chaine d'acquisition .....	50
3.5	Logiciel utilisé .....	51
3.6.	Procédure expérimentale.....	53
<b>Chapitre 4 Résultats et discussion .....</b>		<b>56</b>
4.1.	Introduction .....	57
4.2.	Evolution de la température de la paroi selon un régime transitoire .....	57
4.3.	Fusion de la paraffine chauffée par le bas .....	58
4.3.1.	Comportement de la fusion durant l'échauffement par le bas. ....	58
4.4.	Fusion de la paraffine chauffée par le côté.....	63
4.4.1.	Evolution du front de fusion et Evolution des isothermes de la paraffine chauffée par le côté .....	63
4.5.	Fusion de la paraffine chauffée par le côté inclinée .....	68
4.5.1.	Evolution du front de fusion et Evolution des isothermes de la paraffine chauffée par le côté inclinée.....	68
4.6.	Comportement de la fraction volumique du liquide pour les trois cas .....	73
4.7.	Comparaison avec la paraffine sans additifs .....	75
Conclusion générale .....		76
Références bibliographies .....		79

## Liste des figures

### Chapitre 1 Stockage thermique et matériaux de changement de phase.

Fig.1. 1.Principales techniques de stockage de l'énergie thermique.....	5
Fig.1. 2.Evolution de la température d'un corps pour homogène avec changement d'état .....	9
Fig.1. 3. Cycles de stockage par MCP. ....	12
Fig.1. 4.Classification des MCP.....	13
Fig.1. 5.Paraffine pure.....	16

### Chapitre 2 Recherche bibliographique

Fig. 2.1. Phase de fusion .....	25
Fig. 2.2. Phase de solidification .....	26
Fig. 2.3. Phase de fusion pour différents MCP .....	26
Fig. 2.4.Différents régimes lors de la fusion avec convection naturelle .....	27
Fig. 2.5.Schéma du Banc d'essai réalisé .....	28
Fig. 2.6. Régimes différents au cours de l'évolution du temps .....	28
Fig. 2.7. Contours de température de différents angles d'inclinaison de la paroi chaude. ....	30
Fig. 2.8. Schéma expérimentale : (a) chauffage vertical, (b) incliné et (c) par le bas.....	31
Fig. 2.9. Evolutions du front de fusion pour PHS et WHS .....	32
Fig. 2.10.Évolutions du front de fusion pour le DHS. ....	32
Fig. 2.11.Schéma de l'installation expérimentale.....	33
Fig. 2.12.Plaques perforées en aluminium. ....	33
Fig. 2.13.Interface de fusion dans l'étude expérimentale .....	34
Fig. 2.14. Fibre de cuivre .....	34
Fig. 2.15.Exemples de CPCPM.....	35
Fig. 2.16. Installation expérimentale.....	36
Fig. 2.17.Structure du filet en aluminium (a) , image du tube enveloppé (b). ....	36
Fig. 2.18.Schéma de l'installation expérimentale.....	37
Fig. 2.19.Photos de la paraffine, du MCP3' et du MCP3 sur une scène chaude à (a) .....	38
Fig. 2.20. Installation expérimentale.....	39
Fig. 2.21. Développement de la fraction liquide et les lignes de courant. ....	39
Fig. 2.22.Modèle hypothétique du système expérimental.....	40
Fig. 2.23.Processus de changement de phase avec et sans mousse de cuivre à 20 W. ....	41

### Chapitre 3 Procédure expérimentale

Fig.3. 1. Matériels et banc expérimental. ....	43
Fig.3. 2. Schéma technique de la cavité utilisée.....	44
Fig.3. 3. Résistance électrique et son emplacement à l'intérieure des tôles en cuivre.....	46
Fig.3. 4. Position des capteurs dans la cavité thermique.....	46
Fig.3. 5. Plaque d'aluminium perforée.....	47
Fig.3. 6.Forme de la feuille d'aluminium dans le chauffage par inclinaison.....	47
Fig.3. 7. joint d'étanchéité collé sur un plaque de bois .....	47

Fig.3. 8. Laine de roche (épaisseur de 7 cm).....	48
Fig.3. 9. Enregistreur de température OQ600 .....	48
Fig.3. 10. Capteur de température de type K .....	49
Fig.3. 11. Camera canon IXUS 95 IS.....	49
Fig.3. 12. Caméra infrarouge testo 875-2i .....	50
Fig.3. 13. Chaîne d'acquisition y compris les modules. ....	50
Fig.3. 14. Interface LabVIEW .....	51
Fig.3. 15. Logiciel TestoIRSoft.....	52
Fig.3. 16. Méthode de chauffage de la paraffine.....	53
Fig.3. 17. Fusion de la paraffine chauffée par le bas .....	54
Fig.3. 18. Fusion de la paraffine chauffée par le côté (90°).....	54
Fig.3. 19. Fusion de la paraffine chauffée inclinée (45°).....	55

## **Chapitre 4 Résultats et discussions**

Fig.4. 1. Evolution temporelle de la température de paroi.....	57
Fig.4. 2. Evolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine chauffée par le bas.....	60
Fig.4. 3. Evolution temporelle de la température de la paraffine par le bas. ....	61
Fig.4. 4. Evolution temporelle de la chaleur latente, chaleur sensible et le stockage d'énergie pour le chauffage par le bas.....	62
Fig.4. 5. Evolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine chauffée par le côté .....	65
Fig.4. 6. Evolution temporelle de chaleur latente, chaleur sensible et le stockage d'énergie chauffée par le côté 90° .....	66
Fig.4. 7. Evolution temporelle de chaleur latente, chaleur sensible et le stockage d'énergie chauffée par le côté 90° .....	67
Fig.4. 8. Représentation de la poche d'air formée par la paraffine après la solidification.....	68
Fig.4. 9. Evolution de l'interface solide/liquide durant la fusion de la paraffine chauffée par le côté 45°.....	71
Fig.4. 10. Evolution temporelle de la température de la paraffine.....	71
Fig.4. 11. Evolution temporelle de chaleur latente, chaleur sensible et le stockage d'énergie chauffée par le côté 45° .....	72
Fig.4. 12. Evolution de la fraction volumique du liquide. ....	73
Fig.4. 13. Évolution temporelle de l'énergie stockée par la paraffine pour différentes inclinaisons.....	74

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre 1 Stockage thermique et matériaux de changement de phase.**

Tab 1.1. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible .....	7
Tab 1.2. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur .....	11
Tab 1.3. Propriétés thermophysiques des paraffines .....	16
Tab 1.4. Exemples de propriétés physiques de paraffines .....	19

Tab 1.5. Propriétés thermophysiques des matières organiques non paraffiniques.....	20
Tab 1.6. Propriétés thermophysiques des acides gras .....	21
Tab 1.7. Récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques. ....	22
Tab 1.8. Quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique. ....	23
Tab 3.1. Propriétés thermo physiques du tétracosane .....	45
Tab 3.2. Propriétés thermo physiques de l'aluminium.....	45
Tab 3.3. Propriétés thermo physiques du verre .....	45
Tab 3.4. Propriétés thermo physiques du bois .....	45
Tab 3.5. Propriétés thermo physiques de laine de roche .....	45

## Nomenclature et abréviation

### Abréviation

<b>MCP</b>	Matériaux à changement de phase
<b>DHS</b>	Dissipateur thermique double PCM
<b>PHS</b>	Dissipateur de chaleur Paraffine
<b>WHS</b>	Dissipateur de chaleur en alliage de bois

### Symboles

$\rho_s$	Masse volumique de la paraffine à l'état solide ( $kg/m^3$ )
$\rho_l$	Masse volumique de la paraffine à l'état liquide ( $kg/m^3$ )
$L_f$	Chaleur latente ( $kJ/kg$ )
$\lambda$	Conductivité thermique ( $W/m.K$ )
$C_p$	Chaleur spécifique à pression constante ( $kJ/kg.K$ )
$T$	Température ( $^{\circ}C$ )
$I_f$	Fraction volumique (%)
$t$	Temps (min)

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en des lieux donnés pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. Mieux stocker l'énergie est nécessaire pour valoriser les énergies douces, sûres et renouvelables telles que l'éolien ou le solaire qui sont aussi intermittents.

Le sujet de la fusion des MCP dans l'enceinte a fait l'objet d'une attention particulière ces dernières années en raison de sa large gamme d'ingénierie applications dans des domaines tels que la gestion thermique des composants électroniques et des bâtiments, les systèmes de stockage thermique, etc.

Les MCP sont utilisés dans différents domaines tels que, la construction des bâtiments, le stockage d'énergie solaire, le refroidissement des composants électroniques, les systèmes de climatisation, l'industrie textile etc. Mais leur utilisation est freinée par la complexité du phénomène de changement de phase solide-liquide, qui est lié à la dynamique des transferts de chaleur et de masse, à la distribution spatiotemporelle des évolutions et au comportement particulier des MCP lors du changement de phase qui introduit une singularité importante au sein du modèle de transfert thermiques. Une compréhension et une analyse de ces phénomènes de transfert et de changement de phase se révèlent donc indispensable pour la conception d'un système de stockage d'énergie sous forme de chaleur latente. L'utilisation des MCP est par ailleurs pénalisée par leur faible conductivité thermique. La conductivité thermique de cires de paraffine est d'environ  $0.15-0.4 \text{ W/(m.K)}$ . Afin d'améliorer la conductivité thermique, il est nécessaire d'ajouter à ce matériau des charges conductrices de chaleur. Dans notre cas nous utilisons les plaques d'aluminium perforé

Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement les comportements dynamique et thermique de la paraffine dans une cavité chauffée par différents côtés (par le bas, inclinée et par le côté) lors de la fusion. Ce mémoire s'articule selon les points suivants :

1→ Le premier chapitre donne un aperçu sur les types principaux de stockage d'énergie, les méthodes de stockage d'énergie, les matériaux à changement de phase et les matériaux utilisés pour ce type de stockage.

2 → Le deuxième chapitre est rayonné par une recherche bibliographique présentant les travaux expérimentaux et numériques effectués dans le domaine du stockage thermique par les matériaux à changement de phase à diverses configurations et différentes méthodes pour la simulation numérique.

3→ Le troisième chapitre est consacré à la réalisation expérimentale. Dans ce contexte, nous présenterons les expériences réalisées en indiquant les dispositifs et les appareils de mesure utilisés au laboratoire de recherche ETAP. De plus, une interface créée par le logiciel LabVIEW permet de suivre et d'enregistrer l'évolution de température à l'intérieur de la paraffine durant le processus de la fusion.

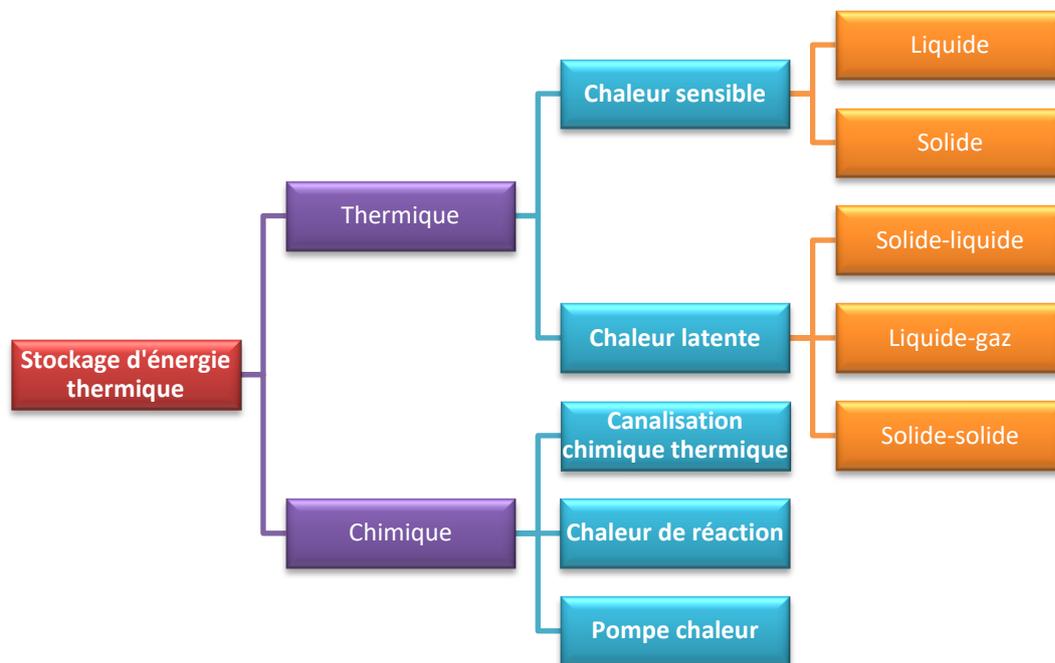
4→Le quatrième chapitre présente les résultats de l'ensemble des essais expérimentaux traités dans une cavité carrée pour différentes inclinaisons variable et chauffée par l'un de ses côtés. Ainsi, comprendre le comportement thermique du MCP utilisé (Paraffine) lors de la fusion pour arriver à sélectionner la meilleure position pour un bon comportement.

# **Chapitre 1 Stockage thermique et matériaux de changement de phase.**

## 1.1. Stockage thermique

L'énergie thermique est la somme du potentiel et des énergies cinétiques des atomes et des molécules qui composent la substance. À la suite de vibrations atomiques et moléculaires, l'énergie thermique se produit dans la substance.

Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que chaleur sensible, chaleur latente, et chaleur thermochimique, ou en combinaison de ces derniers [1]. Un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est illustré à (Fig.1.1)



**Fig.1. 1.Principales techniques de stockage de l'énergie thermique**

Parmi les applications usuelles du stockage thermique on peut citer :

- la récupération dans les installations industrielles de la chaleur perdue pendant la durée de leur fonctionnement pour l'utiliser ultérieurement pour d'autres besoins.
- Le stockage sous forme thermique du surplus d'énergie électrique produite pendant les heures creuses pour couvrir des besoins qui auraient nécessités le

recours à la consommation d'énergie pendant les heures de pointes où les appels en puissance peuvent dépasser les capacités des centrales.

- Le stockage de l'énergie frigorifique en froid industriel et en climatisation quand la capacité libre de production de froid en heures creuses peut être utilisée pour couvrir les besoins lors de pointes de consommation, comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.
- Le stockage de l'énergie produite dans les systèmes solaires passifs pendant le jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.
- Le refroidissement des circuits électroniques ou le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à surdimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement. L'utilisation d'une unité de stockage d'énergie associée à ces circuits permet de faire face aux appels téléphoniques transitoires sans surdimensionnement.
- Gérer le confort thermique des bâtiments, qui dépend non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant, mais aussi de la température des murs. C'est l'une des raisons pour lesquelles, dans ce cas, le stockage de chaleur latente est intéressant [2].

### 1.2 Différents types de stockage

#### 1.1.1. Stockage sensible

Parmi l'ensemble des techniques d'accumulation de chaleur, le stockage par chaleur sensible est la solution la plus ancienne pour stocker la chaleur. Il s'agit d'apporter de la chaleur à un matériau pour faire évoluer sa température sans changement d'état. Le matériau est caractérisé par sa capacité calorifique, notée  $C_p$  et exprimée en  $(J/kg.K)$ , qui traduit sa capacité à emmagasiner de la chaleur  $(J)$  par unité de masse  $(kg)$  et de température  $(K)$ . L'énergie stockée répond alors à la formule suivante [3]:

$$E = m\Delta H = mC_p \Delta T \quad (1.1)$$

Avec  $m$  la masse du matériau soumis au changement de température,  $H$  l'enthalpie massique,  $C_p$  la capacité calorifique du matériau, et  $\Delta T$  la différence de température de

## Chapitre 1 stockage thermique et matériaux de changement de phase

fonctionnement du stockage ( $T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}$ ). Le stockage sensible se retrouve régulièrement dans notre vie courante. Il est possible de stocker du froid, comme dans un réfrigérateur par exemple, ou du chaud, comme dans un ballon d'eau chaude sanitaire domestique. La géothermie est un domaine qui utilise l'énergie du sol qui reste quasiment à la même température toute l'année. La terre est alors un matériau de stockage utile et disponible. On y puise tantôt de la chaleur en hiver et tantôt de la fraîcheur en été. Ainsi, le stockage « actif » se distingue du stockage « passif par le déplacement du matériau de stockage. Il est distingué visuellement dans le CSP (Concentrated Solar Power), car il est généralement doté de deux gros réservoirs (l'un froid et l'autre chaud), dans lequel le fluide de transfert circule. La géothermie est un exemple de stockage passif. Le stockage un l'on souhaite développer pour la protection du récepteur est aussi de type passif. Dans le stockage thermique à hautes températures, Gil et al, Proposent une liste très complète de matériaux permettant le stockage thermique en chaleur sensible dans le cas de la production d'énergie à grande échelle. Une sélection de quelques-uns de ces matériaux est indiquée dans le Tableau (1.1) :

**Tab 1.1. Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible [4]**

Matériau	Température (°C)		Etat	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (W/(m.K))	Capacité thermique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (kWh/m <sup>3</sup> )	Coût US\$/kg
	Basse	Haute						
<b>Béton armé</b>	200	400	Sol	2500	1,5	850	118	<b>0,05</b>
<b>NaCl (sel)</b>	200	500	Sol	2160	7	850	153	<b>0,15</b>
<b>Acier trempé</b>	200	700	Sol	7800	40	600	650	<b>5</b>
<b>Briques réfractaires</b>	200	1200	Sol	3500	5	1150	958	<b>2</b>
<b>Cofalit</b>	200	1200	Sol	3000	2	1000	833	-
<b>Eau liquide</b>	0	100	Liq	1000	0,6	1180	32	-
<b>Sels de carbonate</b>	450	850	Liq	2100	2	2000	420	<b>1,9</b>
<b>Vapeur surchauffée</b>	<b>100</b>	<b>300</b>	<b>Gaz</b>	<b>0,4</b>	<b>0,04</b>	<b>2</b>	<b>4x10-5</b>	-

Le tableau 1.1, montre qu'il est possible de stocker la chaleur sensible dans un matériau solide, liquide, ou gazeux. La vapeur surchauffée, unique gaz présenté, est un très mauvais matériau conducteur et stockeur de la chaleur en plus d'être très corrosif sous pression. En revanche les huiles minérales ont la meilleure capacité de stockage. Les sels fondus ont l'avantage d'être bon marché et présentent une conductivité thermique et une capacité thermique acceptable comparés aux métaux et bétons. Cela explique leur large utilisation dans les centrales solaires commerciales actuelles. Pour les températures élevées (supérieures à 600°C), les bétons réfractaires, le Cofalit (déchets industriels rendus inertes par vitrification), et les sels de carbonates sont des matériaux candidats. Le stockage thermique par chaleur sensible est donc très facile à mettre en œuvre mais requiert des volumes et des masses importants de matériau afin de stocker une grande quantité d'énergie. Pour s'affranchir des dimensions importantes, une autre solution est de stocker la chaleur sous une gamme de température très grande conformément à la relation 1

### 1.1.2. 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 :

$$Q_{\text{latente}} = m L_s \quad (1.2)$$

Avec  $m$ , la masse du matériau de stockage ( $kg$ ).  $L_s$  la chaleur massique de changement d'état du matériau ( $J.kg^{-1}$ ). Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée sous la forme d'un changement d'état du matériau de stockage (fusion ou vaporisation). L'énergie stockée dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau de stockage qui change d'état. La capacité du stockage de systèmes du stockage de la chaleur latente est influencée par : [4]

- 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.

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée ci dessous Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

$$Q = \int_{initial}^{fusion} m \cdot C_{ps} \cdot dT + m\Delta H_{sl} + \int_{fusion}^{final} m \cdot C_{pl} \cdot dT \quad (1.3)$$

$c_{S(T)}$  : chaleur spécifique du corps à l'état solide

$c_{L(T)}$ :chaleur spécifique du corps à l'état liquide

$L$  : chaleur latente de changement de phase

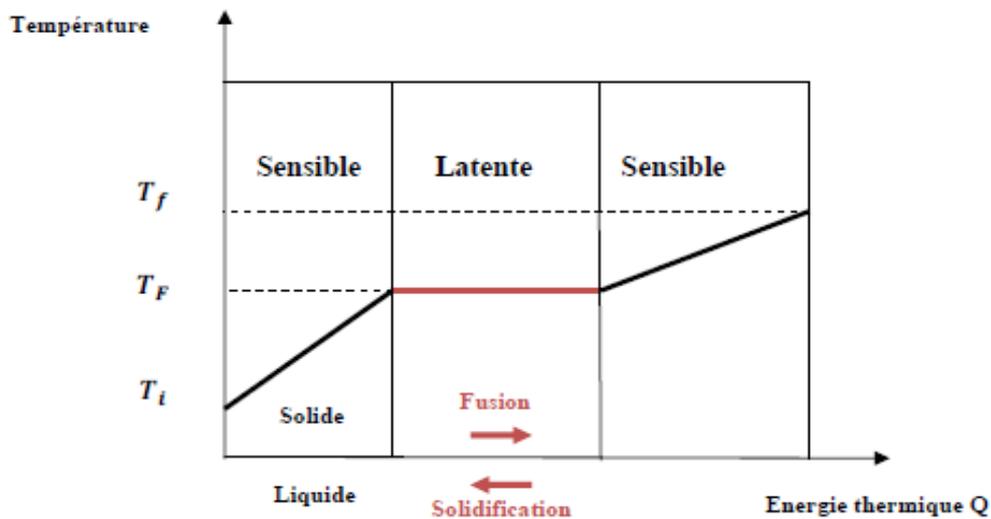


Fig.1. 2.Evolution de la température d'un corps pour homogène avec changement d'état

#### 1.1.4. Stockage thermochimique

L'une des trois approches possibles du stockage de l'énergie thermique consiste à utiliser des réactions thermochimiques réversibles. L'avantage le plus important du procédé de stockage thermochimique est que l'enthalpie de réaction est considérablement

plus grande que la chaleur spécifique ou la chaleur de fusion. Par conséquent, la densité de stockage est bien meilleure. Dans les réactions chimiques, l'énergie est stockée dans les liaisons chimiques entre les atomes qui composent les molécules. Stockage d'Energie au niveau atomique inclut l'énergie associée aux états orbitaux des électrons. Qu'une réaction chimique absorbe ou libère de l'énergie, il n'y a pas de changement global de la quantité d'énergie au cours de la réaction. C'est à cause de la loi de la conservation de l'énergie, qui stipule que:

- L'énergie ne peut être ni créée ni détruite. L'énergie peut changer de forme lors d'une réaction chimique.
- Un exemple de système de stockage expérimental basé sur l'énergie de réaction chimique est la technologie de l'hydrate de sel. Le système est particulièrement avantageux pour le stockage saisonnier d'énergie thermique. Le système utilise l'énergie de réaction créée lorsque les sels sont hydratés ou déshydratés. Il fonctionne en stockant la chaleur dans un récipient contenant une solution à 50% d'hydroxyde de sodium (NaOH). La chaleur (par exemple en utilisant un capteur solaire) est stockée en évaporant l'eau dans une réaction endothermique. Lorsque de l'eau est ajoutée à nouveau, la chaleur est libérée dans une réaction exothermique à 50 ° C. Les systèmes actuels fonctionnent à 60% d'efficacité. [5]

### **1.1.5. Comparaison entre les types de stockage thermique**

La modélisation d'un stockage de glace inspiré des travaux de Braun a permis d'évaluer les performances énergétiques pouvant être atteintes avec le système étudié ainsi que la configuration nécessaire à son fonctionnement. Bien que cette étude soit uniquement une étude préliminaire et que des améliorations puissent être apportées au système, elle permet de comparer entre les deux types de stockage thermique (stockage sensible de type BTES et stockage latent sous forme de glace). Des premières conclusions ont été tirées de cette étude préliminaire, mettant en évidence les avantages et inconvénients potentiels de ces deux technologies. Devant la grande quantité de méthodes de stockage existant à l'heure actuelle, il est intéressant de connaître les choix qui s'offrent au concepteur lors du design du système. Une étude plus approfondie serait

à effectuer afin de confirmer les tendances obtenues et par exemple proposer des recommandations quant au choix des systèmes de stockage à l'échelle résidentielle [6].

**Tab 1.2. Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [8]**

	<b>Sensible (eau chaude)</b>	<b>Sensible (sels fondus)</b>	<b>Latent (paraffine)</b>	<b>Thermochimique (lit de zéolithe)</b>
<b>Densité énergétique</b>	Faible 35 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 60- 70 kWh/m <sup>3</sup>	Moyenne 50-60 kWh/m <sup>3</sup>	Élevée 150 kWh <sub>th</sub> /m <sup>3</sup>
<b>Prix du matériau de stockage</b>	Faible CAPEX : - 2-12 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : - 0,05€/kWh <sub>th</sub> /an	Faible CAPEX : - 20€/kWh <sub>th</sub> OPEX : - 0,3€/kWh <sub>th</sub> /an	Elevé CAPEX : 220- 320 €/kWh <sub>th</sub> OPEX : ~0,7 €/kWh <sub>th</sub> /an	Moyen CAPEX : ~40 €/kWh <sub>th</sub> OPEX: ~0,4 €/kWh <sub>th</sub> /an
<b>Température de stockage</b>	< 100°C	200°C - 350°C	- 20°C - 90°C	Jusqu'à 250°C
<b>Durée de stockage</b>	Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Limitée (pertes thermiques)	Théoriquement illimitée
<b>Transport de l'énergie</b>	Faible distance	Faible distance	Faible distance	Distance théoriquement illimitée
<b>Durée de vie</b>	20 - 30 ans	20	20 000 - 100000 cycles	5000 à 10000 cycles
<b>Maturité (récupération de chaleur fatale)</b>	Commercialisé	Commercialisé	Échelle pilote laboratoire	Échelle pilote industriel
<b>Technologie</b>	Simple	Simple	Moyenne	Complexe

Le tableau 1.2 représente les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis : la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise en œuvre du système.

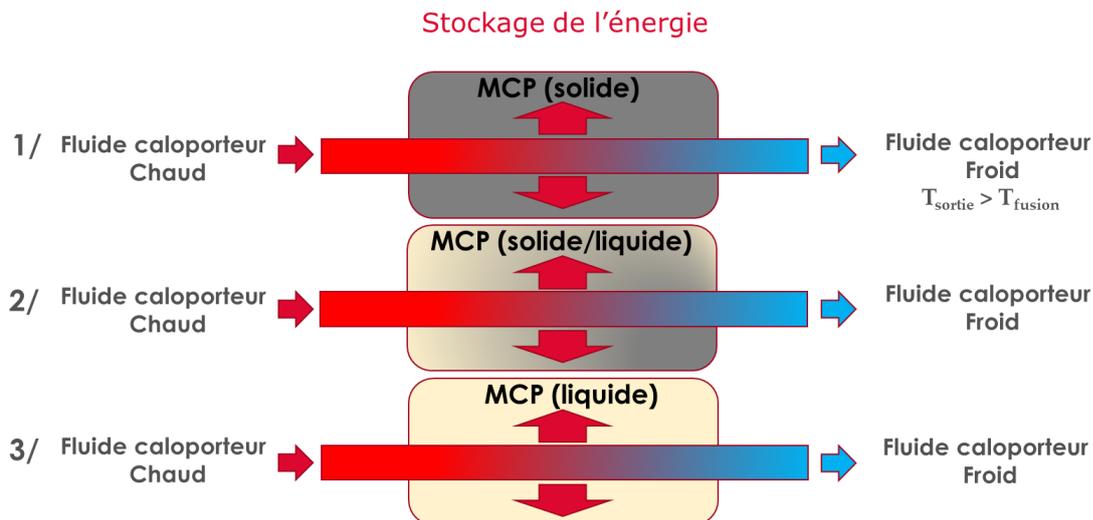
### **1.2. Matériaux à changement de phase (MCP)**

Depuis le premier choc pétrolier des années 70, des études sur les MCP ont été entreprises avec les sels hydratés. Ils étaient testés au début pour stocker l'énergie solaire. Or, de nombreux problèmes se sont présentés et la communauté scientifique se rendit

rapidement compte que ce type de MCP ne pouvait être utilisé à cause des principaux problèmes rencontrés [7]:

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

Durant la procédure de changement de phase des MCP (solide-liquide, solide-gaz, liquide-gaz) de grandes quantités de chaleur peuvent être stocké ou libéré (Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur et les libèrent lorsque le chute de température).



**Fig.1. 3. Cycles de stockage par MCP.**

Lorsqu'un fluide chaud entre en contact (indirect) avec le MCP, le MCP passe de l'état solide à l'état liquide (fusion) captant la chaleur du fluide. A l'inverse si le fluide est froid, le MCP en se solidifiant restitue sa chaleur au fluide caloporteur.

Il existe différents types de MCP :

- Les MCP organiques, comme les paraffines, les acides gras et les mélanges organiques,
- Les MCP inorganiques, les sels hydratés et mélanges de sels hydratés.

Pour des applications industrielles dont la température de stockage est supérieure à 100 - 150 °C, ce sont principalement les paraffines, les acides gras et des sels hydratés qui sont considérés. Les enthalpies de fusion de ces composés varient de 150 à 600  $\text{kJ.L}^{-1}$

Les MCP peuvent jouer un rôle important dans ces circonstances, car la puissance excédentaire disponible pendant les périodes creuses peut être stockée dans des dispositifs MCP pour une utilisation ultérieure. En raison des avantages de la durabilité des propriétés physiques et chimiques et du phénomène de refroidissement, les MCP organiques ont été couramment choisis pour l'application du stockage d'énergie à changement de phase dans les travaux antérieurs. [8]

Cependant, la plupart des MCP organiques ont une faible conductivité thermique, ce qui retarde la durée de la charge et de la décharge thermiques.

Les chercheurs ont exploité différentes méthodes pour résoudre ce problème, notamment l'ajout de tubes à ailettes de différentes configurations, l'insertion d'une matrice métallique dans le MCP, l'injection de nano-conducteurs, la distribution de différents matériaux à haute conductivité et la micro-encapsulation de MCP et de multitubes. [9]

### 1.2.1. Classification des MCP

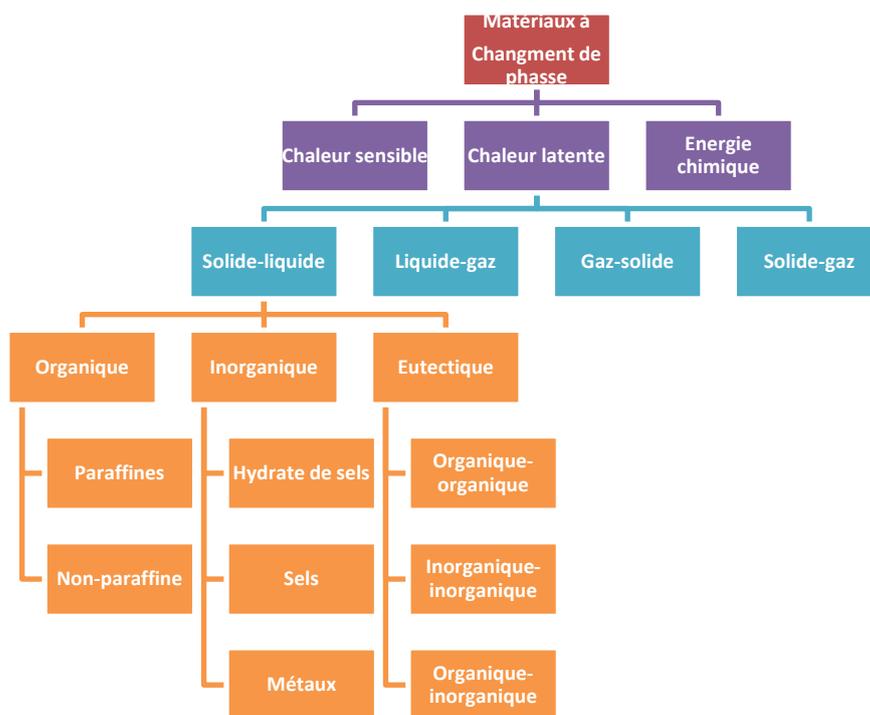


Fig.1. 4. Classification des MCP

Il existe un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiées comme MCP en fonction de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion. Cependant, à l'exception du fait que le point de fusion se situe dans la plage de températures de fonctionnement requise, la majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères requis pour servir de supports appropriés pour le stockage de la chaleur.

En effet, aucun matériau ne peut avoir toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermique idéal. Aussi ces matériaux sont utilisés en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriées adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été utilisées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être interrompue en ajoutant un agent de nucléation au matériau de stockage, et la fusion incongruente est désactivée en ajoutant un agent de nucléation au MCP. Épaississant ou un agent gélifiant approprié.

Les MCP couramment utilisés peuvent être classés en trois catégories :

1. Composés organiques : paraffines, corps non paraffiniques, polyalcools.
2. Composés inorganiques : hydrates salins, sels, métaux, alliages.
3. Eutetique des corps inorganiques et/ou organiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques aux propriétés thermiques et chimiques très différentes qui présentent de manière significative la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée sont détaillés dans ce qui suit.

### **1.3. Composants organiques**

Les MCP organiques sont des matériaux organiques, constitués de mélanges d'hydrocarbures saturés de la famille des alcanes de formule générale  $C_nH_{2n+2}$ .

Ils sont soit extraits du pétrole brut, soit synthétisés par un procédé chimique impliquant la catalyse du monoxyde de carbone et de l'hydrogène pour les transformer en hydrocarbures.

Les paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbures saturés linéaires ou parfois ramifiés avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne. Les

paraffines pures constituées uniquement d'alcane peuvent être caractérisées par leur point de fusion.

Cependant, les paraffines existent généralement sous forme de mélange, de sorte qu'on ne peut pas parler de point de fusion mais plutôt de zone de fusion.

Pour les applications de stockage thermique, les n-paraffines sont les plus utilisées en raison de leur plus grande capacité de stockage.

Les paraffines d'intérêt pour le stockage thermique sont celles qui se présentent sous forme solide aux températures usuelles et sont qualifiées de « cires paraffiniques ».

Le point de fusion des alcanes augmente avec l'augmentation du nombre d'atomes de carbone. Outre certaines caractéristiques favorables des paraffines telles que la fusion congruente et de bonnes propriétés de nucléation, elles ont montré certaines propriétés indésirables telles que :

- Faible conductivité thermique,
- Sont incompatibles avec les récipients en plastique et sont
- Modérément inflammables.

Tous ces effets indésirables peuvent être éliminés en partie en modifiant légèrement la cire et l'unité de stockage.

Certaines paraffines sélectionnées sont désignées dans le tableau ci-dessous avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion. [10]

### 1.3.1. Paraffines

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute  $C_nH_{2n+2}$ , aux propriétés très similaires. Parmi les MCP solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application. Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ( $T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$ ), n-Nonacosane ( $T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$ ) ou encore le n-Triacontane ( $T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$ ) [11]



**Fig.1. 5.Paraffine pure**

**Tab 1.3Propriétés thermophysiques des paraffines [12]**

<b>Nombre d'Atoms de Carbone</b>	<b>Point de fusion(°C)</b>	<b>Chaleur latente de fusion(kJ/kg)</b>
<b>14</b>	5.5	<b>228</b>
<b>15</b>	10	<b>205</b>
<b>16</b>	16.7	<b>237.1</b>
<b>17</b>	21.7	<b>213</b>
<b>18</b>	28	<b>244</b>
<b>19</b>	32	<b>222</b>
<b>20</b>	36.7	<b>246</b>
<b>21</b>	40.2	<b>200</b>
<b>22</b>	44	<b>249</b>
<b>23</b>	47.5	<b>232</b>
<b>24</b>	50.6	<b>255</b>
<b>25</b>	49.4	<b>238</b>
<b>26</b>	56.3	<b>256</b>
<b>27</b>	58.8	<b>236</b>
<b>28</b>	61.6	<b>253</b>
<b>29</b>	63.4	<b>240</b>
<b>30</b>	65.4	<b>251</b>
<b>31</b>	<b>68</b>	<b>242</b>

### 1.3.1.1. Avantages et inconvénients des paraffines

#### ➤ Avantages

- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230  $\text{kJ/kg}$ . Cette valeur est élevée par rapport à celle d'autres matières organiques dont la capacité calorifique spécifique est de 2,1  $\text{kJ/kg.K}$ . En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on a une haute densité d'énergie de stockage. La capacité volumétrique de stockage de chaleur est 4 à 5 fois supérieure à celle de l'eau.
- La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement élevées.
- Ils sont chimiquement stables mais doivent être protégés de l'air pour éviter l'oxydation. Surtout lorsqu'ils sont chauds, leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- Il n'y a pas de séparation de phase.
- Les cires de paraffine sont chimiquement inertes (d'où le nom de paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certains plastiques ou le cuivre). Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur contenant. En effet, les cires de paraffine sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).
- Les cires de paraffine ne présentent aucun danger écologique. Ils n'ont aucun effet négatif sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Ils sont non toxiques et 100% recyclables.
- Certaines paraffines commerciales conviennent aux applications d'énergie solaire. Pour les applications bâtiment, un mur contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'un mur en béton de 40 cm.
- La densité de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850  $\text{kg/m}^3$ , et celle de la phase solide de 800 à 900  $\text{kg/m}^3$ . L'expansion volumique est donc d'environ 15 % lors du processus de changement de phase. Ce problème peut être évité ou au moins réduit par un conditionnement approprié.
- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et sont d'un prix raisonnable. Selon leur composition, ils ont des points de fusion différents. En

revanche, les cires paraffiniques pures sont très chères.

➤ **Inconvénients**

- Les cires de paraffine ont une très faible conductivité thermique (0,18 – 0,25 W/m K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage/élimination de la chaleur pendant les cycles de fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien qu'elle soit un avantage dans le transport des aliments, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un emballage adapté.
- Les cires de paraffine sont facilement inflammables. [13]

**1.3.1.2. Différentes cires paraffiniques**

Dans ce paragraphe sont donnés quelques exemples de cires paraffiniques soit pures soit en mélange.

- **noctadecane(C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>):**cette cire fond à T=28°C et a une chaleur de fusion de 244 kJ/kg.
- **neicosane(C<sub>20</sub>H<sub>42</sub>):**sa fusion est congruente à T=36,7°C, la chaleur de fusion est de 247 kJ/kg.

Le neicosane et le noctadecane sont très inflammables quand ils sont exposés à une flamme. Ils s'oxydent fortement. Ils ne sont ni toxiques, ni corrosifs. Ils ont relativement une bonne conductivité thermique.

- **112/118 white scale cires:** ces cires paraffiniques sont issues du raffinage du pétrole brut. «Pennsylvania-Grade ». Elles font apparaître deux transitions de phase solides avant leur domaine de fusion (42 – 48°C). Ces cires ont été soumises à un cyclage thermique (jusqu'à 1743 pour un échantillon) sans changement ni de la température de la transition, ni du profil de la transition.

- **P116** : cette cire a une chaleur latente de 210  $\text{kJ/kg}$  et sa solidification se produit à  $T=45 - 48^\circ\text{C}$ . En forme de capsules sphériques, elle a subi 2600 cycles thermiques sans se détériorer. [14]

Le tableau 1.4 permet d'apprécier les variations des propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire.

**Tab 1.4.Exemples de propriétés physiques de paraffines**

	<b>Paraffines</b>			
	Tétradécane	Héxadécane	Octadécane	Eicosane
<b>Formule</b>	$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$	$\text{C}_{16}\text{H}_{34}$	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}$
<b>Température de fusion [<math>^\circ\text{C}</math>]</b>	5.5	16.7	28	<b>36.7</b>
<b>Enthalpie de fusion [<math>\text{kJ/kg}</math>]</b>	226	237	244	<b>247</b>
<b>Conductivité thermique [<math>\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}</math>]</b>	0.15	0.15	0.15	<b>0.15</b>
<b>Capacité thermique massique [<math>\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}</math>]</b>	2.07	2.11	2.16	<b>2.21</b>
<b>Masse volumiques solide [<math>\text{Kg/m}^3</math>]</b>	825	835	814	<b>856</b>
<b>Masse volumique liquide [<math>\text{Kg/m}^3</math>]</b>	771	776	74	<b>778</b>
<b>Retard à la solidification [<math>^\circ\text{C}</math>]</b>	aucun	Négligeable	Négligeable	<b>Aucun</b>
<b>Pression de vapeur [Pa]</b>	133à $75^\circ\text{C}$	133à $105^\circ\text{C}$	133à $75^\circ\text{C}$	<b>133à <math>100^\circ\text{C}</math></b>
<b>Tension super ficelle [<math>\text{N/m}</math>]</b>	$27.4 \cdot 10^{-3}$	3.4	$27.4 \cdot 10^{-3}$	
<b>Viscosité [<math>\text{Cp}</math>]</b>	<b>2.1</b>	-	<b>3.4</b>	-

### 1.3.1.3. Conditionnement des paraffines

Les paraffines aient les propriétés faibles fournies par le MCP, leur conductivité ne permet pas la cinétique de charge/décharge de l'énergie thermique.

Pour résoudre ce problème plusieurs types d'emballages ont été proposés :

- ❖ Les nodules.
- ❖ Les cylindres avec ailettes ou non.

❖ La micro-encapsulation. [15]

### 1.3.2. Composés organiques non-paraffiniques

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

Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Dans le tableau 1.5 des composés organiques non-paraffiniques sont donnés à titre d'exemple avec des propriétés thermophysiques [16]

**Tab 1.5. Propriétés thermophysiques des matières organiques non paraffiniques [12]**

<b>Matériaux</b>	<b>Point de fusion(°C)</b>	<b>Chaleur latent de fusion (kJ/kg)</b>
<b>Acide formique</b>	7.8	<b>247</b>
<b>Acide caprylique</b>	16.3	<b>149</b>
<b>Glycérine</b>	17.9	<b>198.7</b>
<b>Acide D-lactic</b>	26	<b>184</b>
<b>Méthyle palmitate</b>	29	<b>205</b>
<b>Camphenilone</b>	39	<b>205</b>
<b>Docasylbromide</b>	40	<b>201</b>
<b>Caprylone</b>	40	<b>259</b>
<b>Phénol</b>	41	<b>120</b>
<b>Heptadécane</b>	41	<b>201</b>
<b>Cyclohexylo octadécane</b>	41	<b>218</b>
<b>Heptadécane</b>	<b>41</b>	<b>197</b>

## Chapitre 1 stockage thermique et matériaux de changement de phase

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques [17]

La formule chimique générale des acides gras est  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$  et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs.

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- forte chaleur de fusion.
- inflammabilité.
- faible conductivité thermique.
- faible point d'éclair.
- niveau variable de toxicité
- instabilité à haute température.

Les acides gras ont de fortes chaleurs de fusion comparables à celles des paraffines. Les acides gras (Tab.1.6) montrent également un processus de fusion/cristallisation réversible avec aucune surfusion [18]

**Tab 1.6. Propriétés thermophysiques des acides gras**

Matériaux	Formule	Point DE FUSION (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acide Acétique	$\text{CH}_3\text{COOH}$	16.7	184
Acide caprique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{-COOH}$	36	152
Acide elaidique	$\text{C}_8\text{H}_7\text{C}_9\text{H}_{16}\text{-COOH}$	47	218
Acide laurique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{-COOH}$	49	178
Acide pentadécanoïque	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{13}\text{-COOH}$	52.5	178
Tristéarine	$(\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO})\text{C}_3\text{H}_5$	56	191
Acide myristique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{-COOH}$	58	199
Acide palmitique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{-COOH}$	55	163
Acide stéarique	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{-COOH}$	69.4	199
Acétamide	$\text{CH}_3\text{CONH}_2$	8.1	241
Fumarate de méthyle	$(\text{CHCO}_2\text{CNH}_3)$	102	242

## 1.4. Composés inorganiques

### 1.4.1. Sels hydratés

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale  $AB_nH_2O$ . [16]

Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes:

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

Tab 1.7. Récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques. [14]

Hydrates Salins	Température de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [KJ/kg]
Sel de Glauber ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ )	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate $CaCl_2 \cdot 6H_2O$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $Na CH_3COOH \cdot 3H_2O$	58	170 à 264
Hydroxyde de Barium octa hydrate $Ba (OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	301
$NH_4 \cdot Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate $Na_3 \cdot PO_4 \cdot 12H_2O$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules (Calotherm70)	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	40-43	140

### 1.5.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 pour 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.

Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques –inorganiques. [16]

**Tab 1.8. Quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique. [19]**

<b>Eutectiques Inorganiques</b>	<b>Point de fusion [°C]</b>	<b>Chaleur latente de fusion [kJ/kg]</b>
<b>49.3%MgCl.6H<sub>2</sub>O+50.7%Mg(NO<sub>3</sub>).6 H<sub>2</sub>O</b>	58	<b>132.3</b>
<b>61.5%Mg(NO<sub>3</sub>).6H<sub>2</sub>O+38.5%NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub></b>	51	<b>131.1</b>
<b>58.3%Mg(NO<sub>3</sub>).6H<sub>2</sub>O+41.7%MgCl<sub>2</sub>.6 H<sub>2</sub>O</b>	58	<b>106</b>
<b>CaCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O+CaBr<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O</b>	14	<b>140</b>
<b>Eutectique Organique</b>		
<b>Acides Caprique - Laurique</b>	18	<b>120</b>
<b>Acides Palmitique - Laurique</b>	33	<b>145</b>
<b>Acides Stéarique Laurique</b>	34	<b>150</b>

# **Chapitre 2 Recherche bibliographique**

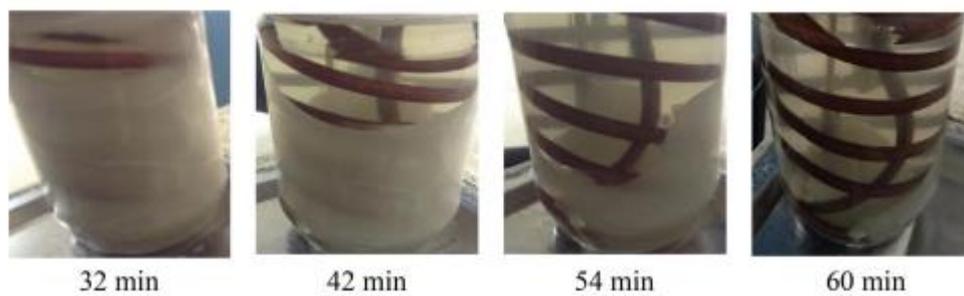
## Chapitre 2 Recherche bibliographique

### 2.1.Introduction

Certaines recherches s'orientent vers les méthodes d'économie d'énergie en utilisant des moyens moins coûteux et facilement accessibles. L'un de ces moyens d'économie se montre comme une solution particulièrement intéressante est : le stockage de l'énergie thermique. La technologie des échangeurs ainsi que la récupération par chaleur latente présentent plusieurs difficultés. Pour cela, de nombreux travaux se développent rapidement dans ce domaine.

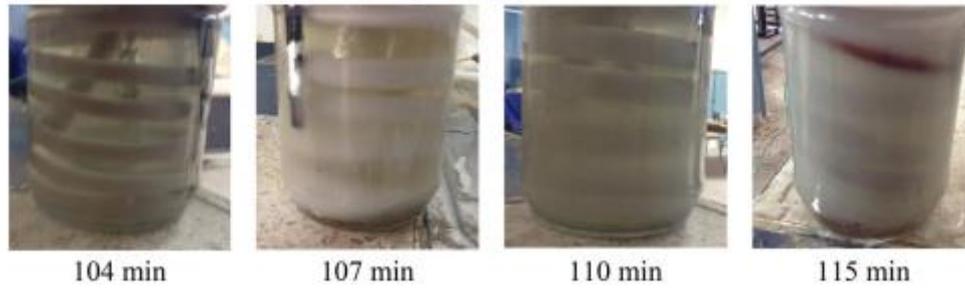
### 2.2.Travaux antérieurs

**A.N. KORTI ET AL [20]** ont étudié le comportement d'un MCP durant les deux processus charge (fusion) et décharge (solidification) dans un stockeur l'énergie thermique par chaleur latente. Après, trois différents types de paraffines en tant que matériau à changement de phase (MCP) ont été étudié afin de traiter les effets de la température d'entrée HTF (L'eau est utilisée comme fluide caloporteur), débit et du type de MCP durant les deux processus de charge et de décharge. Ils ont conclu que la température d'entrée à un effet significatif sur les exhibitions de l'échangeur de telle que la phase de charge est accélérée de 54,5% et la phase de décharge est retardée de 48,5 %. L'ajout de l'huile de moteur à la paraffine an amélioré la vitesse du processus de charge et de décharge respectivement de 42,4 et de 66 %



**Fig. 2.1. Phase de fusion**

## Chapitre 2 Recherche bibliographique



**Fig. 2.2. Phase de solidification**



**Fig. 2.3. Phase de fusion pour différents MCP**

**JANY et AL. [21]** ont présenté une étude qui a identifié les régimes les plus fondamentaux du phénomène de fusion avec convection naturelle dans une enceinte chauffée latéralement. L'évolution du processus est comme suit : Au début, lorsqu'une petite couche de liquide se forme, les transferts sont dominés par la conduction, et le front de fusion se déplace parallèlement à la paroi chauffée (Fig.2.4), ensuite, du fait de la variation de masse volumique, le fluide chaud remonte et apporte la chaleur au solide via l'interface entre les deux. Cela entraîne une distribution non uniforme de la chaleur, et par conséquent une légère déformation du front de fusion. À ce moment, les transferts de chaleur sont mixtes alliant transfert par conduction et convection (Fig.2.4) Au fur et à mesure que les températures augmentent, le mouvement du fluide est plus important, le liquide donne davantage de chaleur à l'interface et se refroidit en descendant, par conséquent, les transferts de chaleur sont plus importants en haut qu'en bas de l'interface, entraînant une forme irrégulière de celle-ci. La déformation du front de fusion est plus importante et les transferts convectifs dominent. Le processus continue jusqu'à l'arrivée du front de fusion à la paroi froide. Ces quatre régimes sont représentés sur la (Fig.2.4)

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

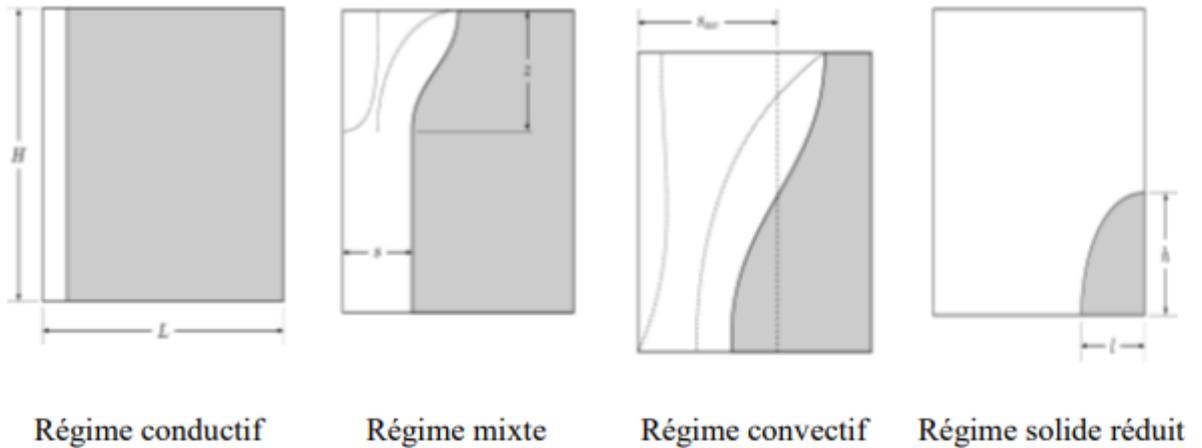


Fig. 2.4. Différents régimes lors de la fusion avec convection naturelle

H. Guellil et AL. [22] ont réalisé étude expérimentale pour analyser la performance d'une nouvelle unité de stockage d'énergie thermique de chaleur latente (LHTES) pendant les deux processus charge et décharge. Un échangeur de chaleur d'air à tube à ailerons est rempli de MCP en matériau à changement de phase et enfermé dans une unité de stockage isolante. Ils ont étudié l'effet de l'alimentation électrique, du débit-masse d'air et de l'utilisation des ailettes plates sur le comportement thermique et l'efficacité. Les expériences ont montré que les ailettes peuvent accélérer le temps de début et de fin de fusion d'environ 55 et 72%, respectivement. La phase de charge peut être prolongée à 94% en augmentant l'alimentation de 32 %, ce qui leur a également permis pour stocker et récupérer plus de 5 fois l'énergie thermique. Les résultats montrent que pour une puissance fixe, la réduction du débit de 54 % accélère la phase de charge, augmente la température maximale jusqu'à 18,3 % et prolonge la phase de décharge.

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

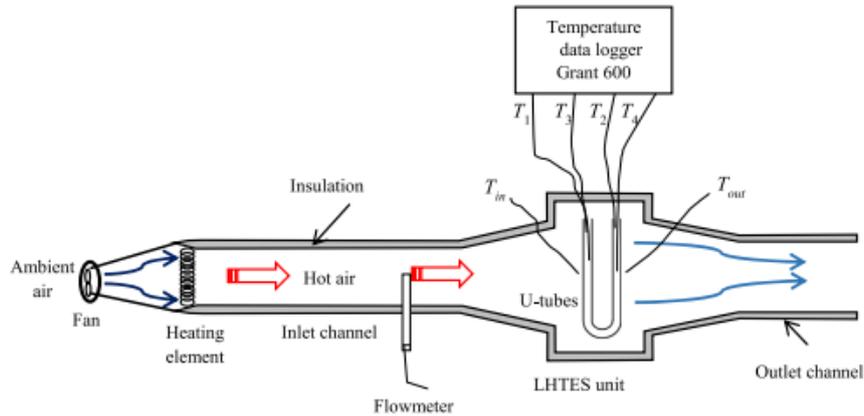


Fig. 2.5. Schéma du Banc d'essai réalisé

**Santiago M [23]** ont identifié et décrit les principaux régimes dynamiques se produisant lors de la fusion du MCP noctadecane dans des couches horizontales de plusieurs tailles chauffées par le bas. Cette configuration permet de couvrir une large gamme de nombres de Rayleigh effectifs sur la phase liquide du MCP, jusqu'à  $10^9$ , sans modifier le contrôle des paramètres externes. Ils ont identifié quatre régimes différents au cours de l'évolution du temps : (i) le régime conducteur, (ii) le régime linéaire, (iii) le régime de grossissement et (iv) le régime turbulent.

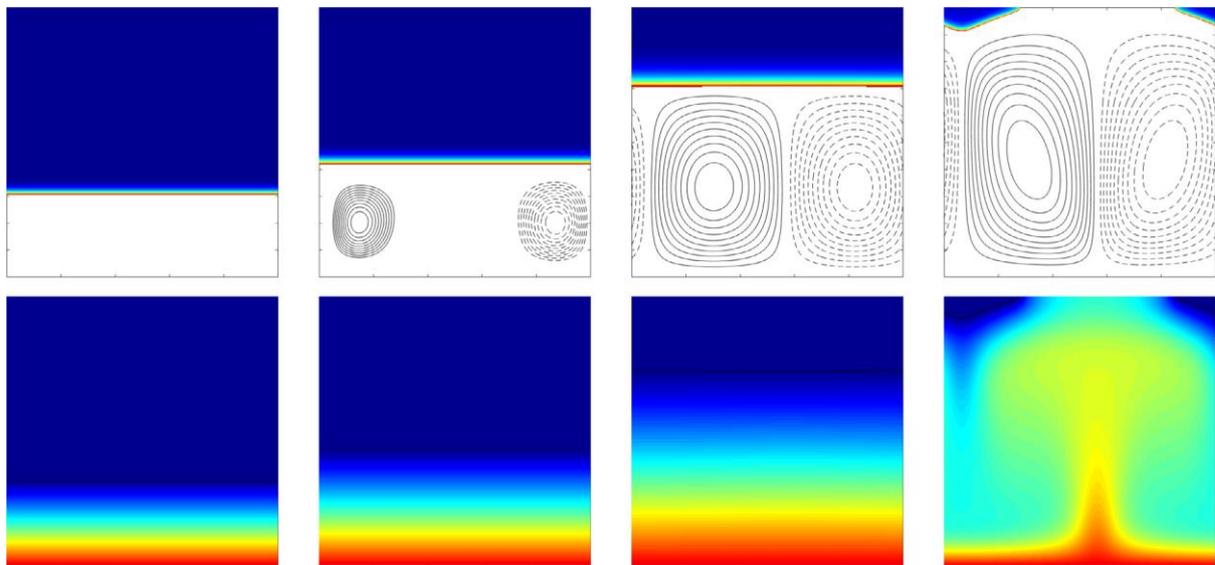


Fig. 2.6. Régimes différents au cours de l'évolution du temps

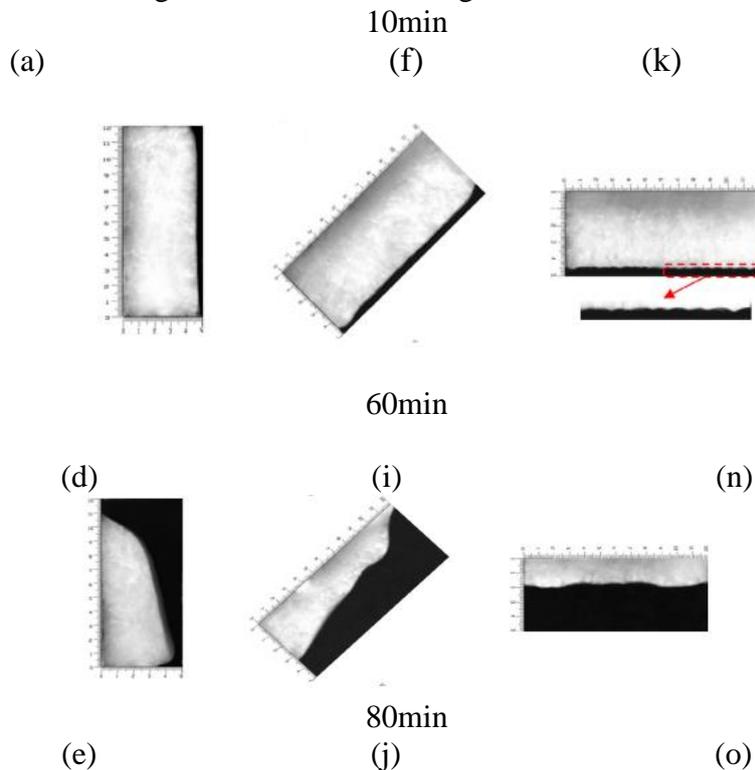
**Kamkari et al. [24]** ont fait une étude expérimentale qui a été menée pour examiner l'effet de l'angle d'inclinaison sur le comportement thermique et dynamique des matériaux à changement de phase (MCP) dans une enceinte à différents angles d'inclinaison. L'enceinte est chauffée de manière isotherme d'un côté tandis que les autres parois sont

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

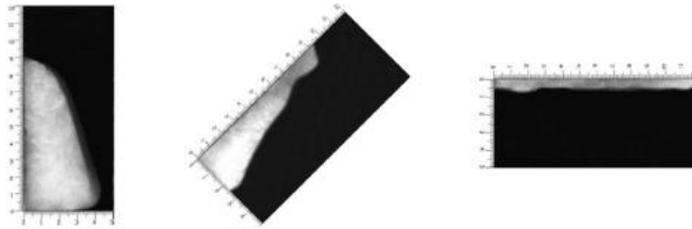
isolées thermiquement. Des expériences ont été réalisées pour différentes températures de paroi de 55, 60 et 70 °C et différents angles d'inclinaison de 0°, 45° et 90°. Cette étude montre que :

- La Diminution de l'angle d'inclinaison de la verticale à l'horizontale produit des formes d'interface irrégulières.
- Les formes des interfaces solide-liquide pendant le chauffage dans l'enceinte horizontale démontrent la génération de Bénard les cellules de convection et le développement de la structure cellulaire dans le liquide MCP à mesure que la fusion progresse.
- Les taux de fusion dans les enceintes de 45° et 90° diminuent à mesure que la hauteur du MCP solide diminue, tandis que la fusion dans l'enceinte horizontale reste presque constant jusqu'à ce que la fin du processus de fusion.
- Pour les enceintes de 45° et 0° étaient, en moyenne, de 35 % et 53% de moins que l'enceinte verticale, respectivement.

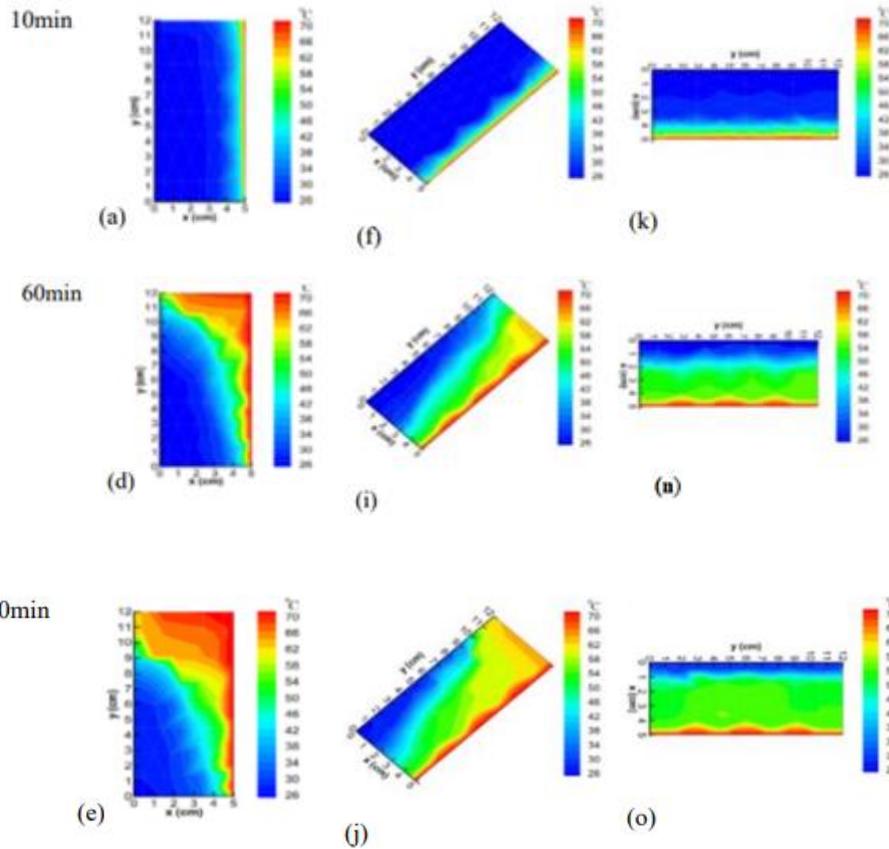
Inclination angle= 90°    Inclination angle= 45°    Inclination angle= 0



## Chapitre 2 Recherche bibliographique



Inclination angle= 90° Inclination angle= 45° Inclination angle= 0



**Fig. 2.7. Contours de température de différents angles d'inclinaison de la paroi chaude.**

**Korti et al [25]**, Une étude expérimentale est menée pour étudier l'effet de l'inclinaison sur le comportement thermique pendant la fusion du MCP contenu dans une cavité carrée. La gamme d'angle d'inclinaison de 0° (verticale), 45° (inclinée) et 90° (fond) est considérée. La paraffine avec une plage de fusion de 49-54°C est utilisée comme MCP. Le rétrécissement volumétrique du MCP pendant la solidification précédant les expériences de fusion entraîne le développement d'un grand vide dans la surface libre MCP-air. Les effets de l'inclinaison et du phénomène de rétrécissement sont analysés en visualisant l'interface solide-liquide et en mesurant les températures par des

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

thermocouples et une caméra infrarouge. Les résultats montrent que l'angle d'inclinaison a une grande influence sur le comportement de la convection naturelle, et affecte la progression du front de fusion et le taux de transfert de chaleur. Le temps de fusion total pour les cas des cavités inférieures et inclinées était, en moyenne, 56% et 48% inférieur à celui de la cavité verticale, respectivement. Le rétrécissement volumétrique perturbe significativement le processus de fusion dans les cas verticaux et inclinés. La convection naturelle est plus intense dans le cas du fond et le nombre de Nusselt moyen global augmente pendant la forte convection d'environ 10% et 21% par rapport aux cas inclinés et verticaux, respectivement.

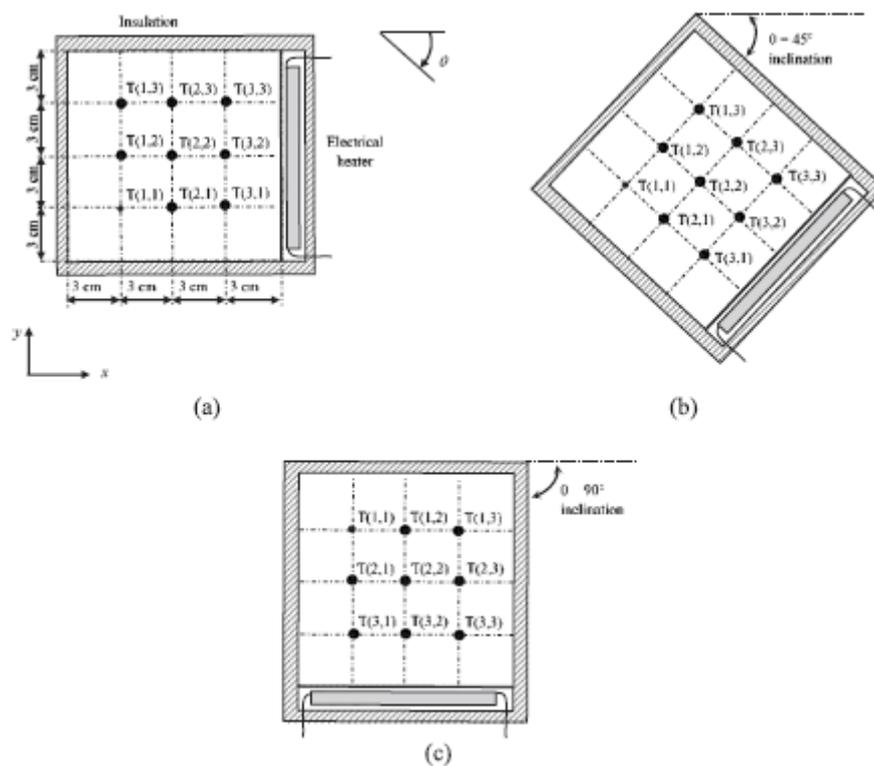


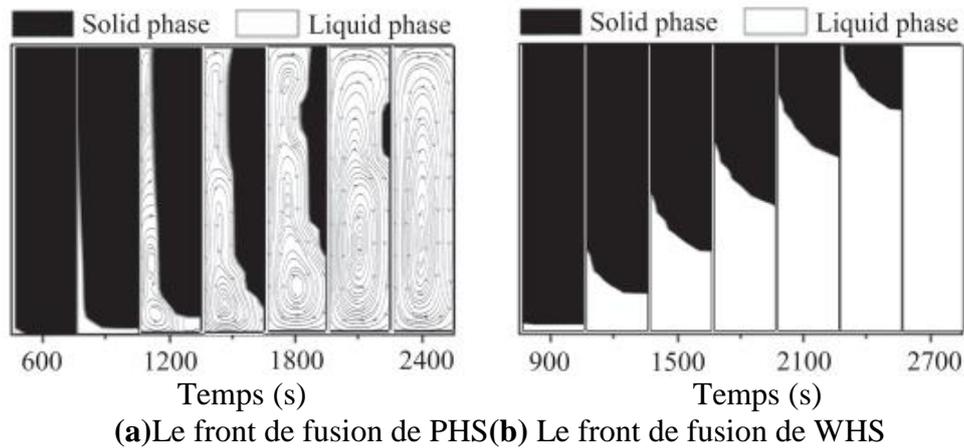
Fig. 2.8. Schéma expérimentale : (a) chauffage vertical, (b) incliné et (c) par le bas.

**Pingrui Huang, et al [26]** Les matériaux à changement de phase (MCP) peuvent libérer/absorber de l'énergie thermique dans une plage de température très étroite lors de la solidification/fusion processus.

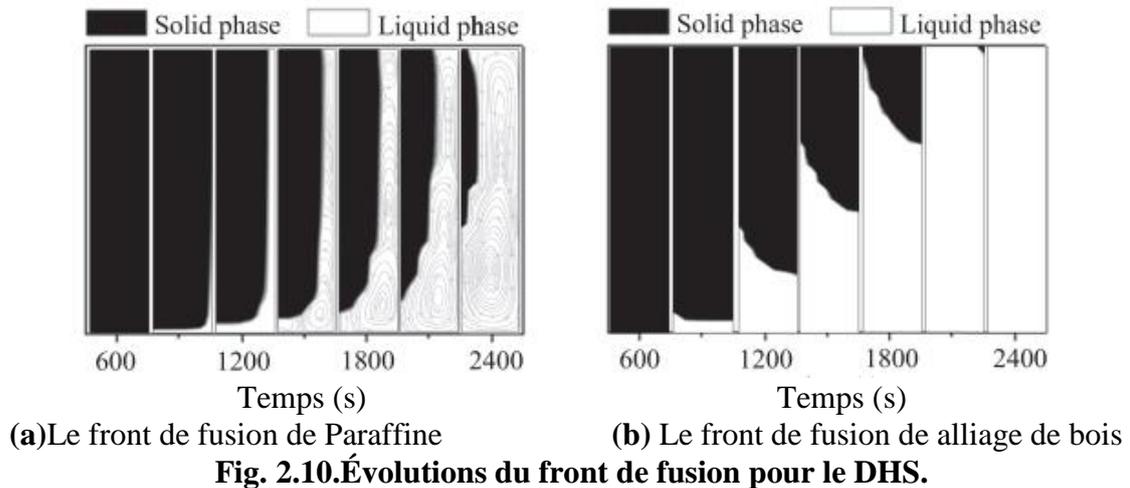
Les MCP peuvent être divisés en deux catégories, métalliques et non métalliques.

Les MCP non métalliques, tels que la paraffine, sont plus largement utilisés en raison de leurs densités de stockage d'énergie élevées et du prix bas.

## Chapitre 2 Recherche bibliographique



**Fig. 2.9. Evolutions du front de fusion pour PHS et WHS**



**Fig. 2.10.Évolutions du front de fusion pour le DHS.**

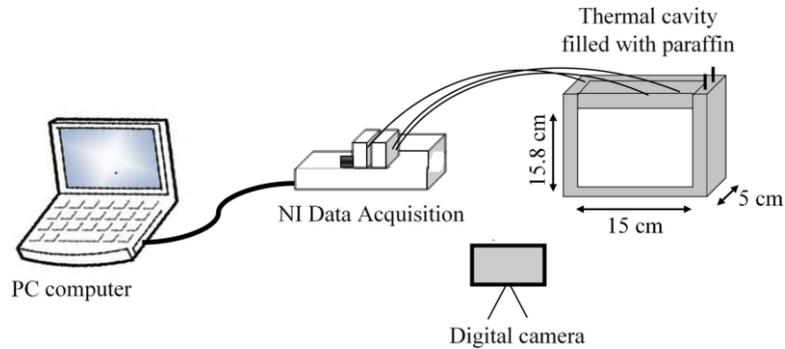
L'article de **Missoum et al. [27]** concerne l'analyse thermique et l'accélération du processus de fusion de la paraffine par l'ajout d'additifs métalliques (Zamak, aluminium et cuivre). A travers les différentes expériences, ils ont observé ce qui suit :

(1) La conductivité thermique effective devient 0,174, 0,272 et 0,798  $W/mK$  en intégrant le Zamak, l'aluminium et le cuivre dans la paraffine pure. Ainsi, la grille de Zamak diminue la conductivité thermique de la paraffine d'environ 13%. Cependant, les plaques d'aluminium et de cuivre ont augmenté la conductivité thermique de la paraffine jusqu'à environ 36% et 300%.

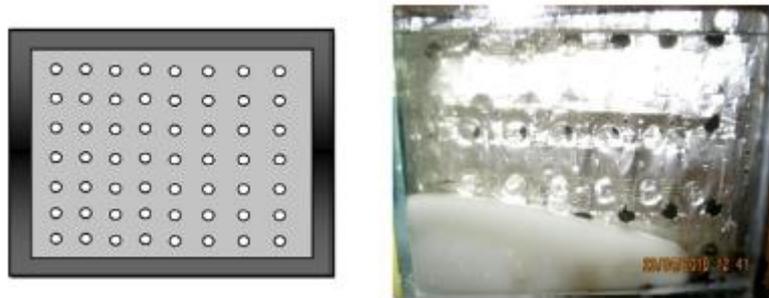
(2) La bonne capacité thermique de l'aluminium et la bonne conductivité thermique effective de l'aluminium-paraffine accélère le transfert de chaleur et augmente la quantité de chaleur stockée. Ainsi, l'aluminium augmente l'énergie stockée de 3,1%, mais le

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

Zamak diminue l'énergie stockée d'environ 3,5%. Pour la paraffine de cuivre, l'énergie globale stockée est presque la même que pour la paraffine pure.



**Fig. 2.11. Schéma de l'installation expérimentale.**

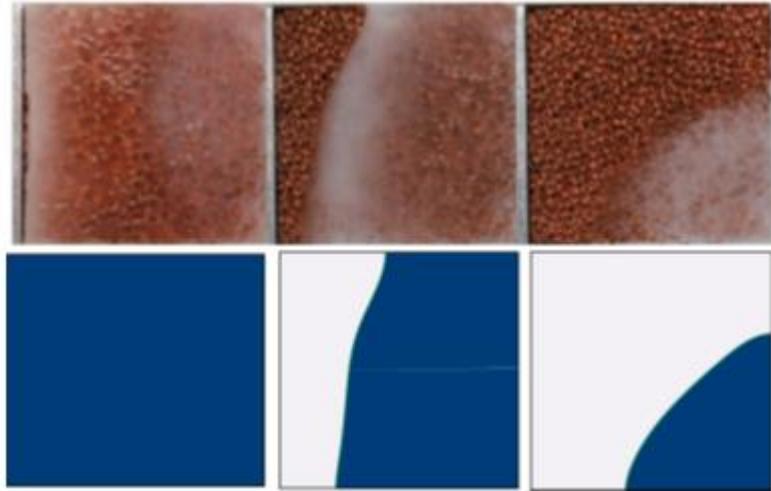


**Fig. 2.12. Plaques perforées en aluminium.**

**Veismoradi [28]** traite la simulation numérique des performances de transport d'énergie dans un système de stockage d'énergie à coquille et tube, incluant l'insertion de cire de paraffine ou de mousse de cuivre avec la cire de paraffine. La description mathématique du problème considéré consiste en des équations de base fondées sur les lois de conservation avec des conditions initiales et limites appropriées. Ces équations ont été résolues par la méthode des éléments finis. Le code développé a été vérifié en utilisant l'analyse de sensibilité du maillage et les données numériques d'autres auteurs. Les effets de la porosité, du nombre de Rayleigh, de la température de fusion, de l'emplacement des caloducs sur les structures d'écoulement de fusion et le transport d'énergie, ainsi que le nombre de Nusselt et la fraction volumique de fusion ont été examinés pour les modes de charge et de décharge. Il a été constaté que dans le cas de la mousse métallique poreuse, l'intensité du changement de phase augmente pour les deux

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

régimes mentionnés par rapport à la cire de paraffine pure. Le placement vertical des tubes de chauffage permet d'obtenir le meilleur temps de charge.

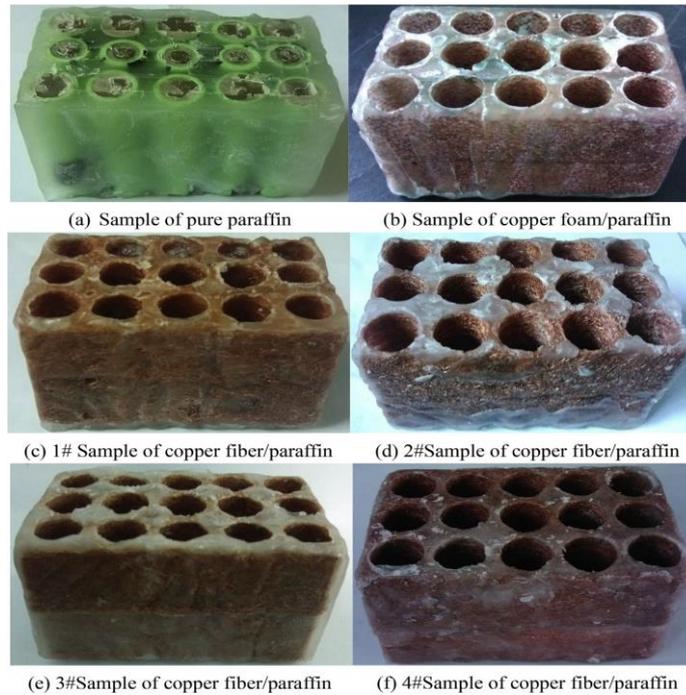


**Fig. 2.13.**Interface de fusion dans l'étude expérimentale



**Fig. 2.14.** Fibre de cuivre

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

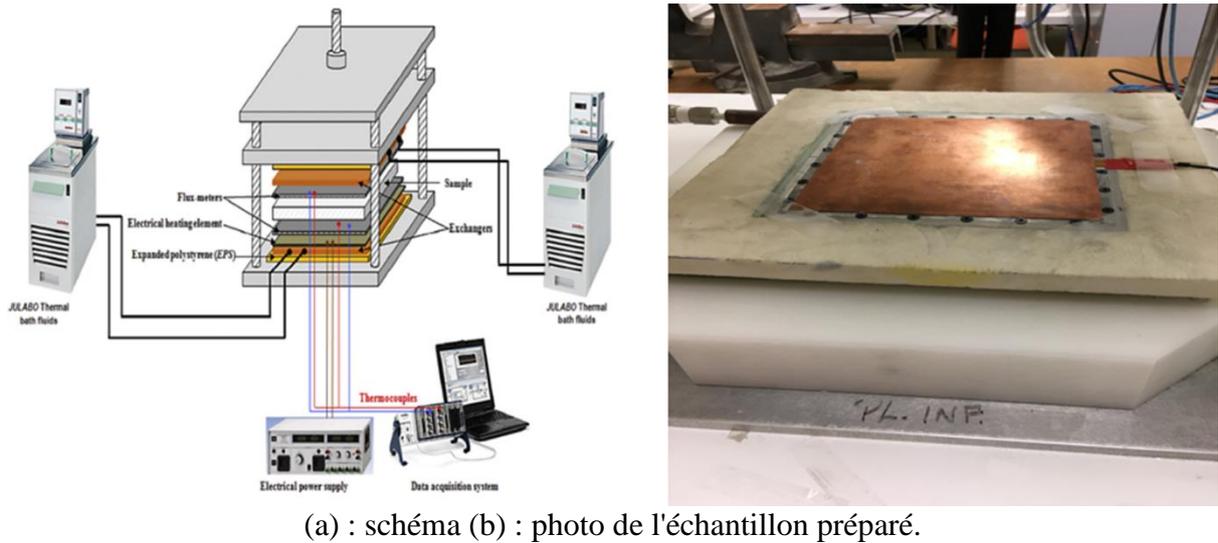


**Fig. 2.15.Exemples de CPCM.**

**Moussa EL IDI [30]**, utilise dans ce travail, une composite paraffine mousse d'aluminium et de nickel ont été utilisées. Le but de cette étude est de caractériser le comportement thermique de ces composites en vue de leur utilisation pour la gestion thermique des batteries Li-ion. Tout d'abord, les conductivités et diffusivités thermiques à l'état solide ont été évaluées ils ont utilisé un analyseur de constantes thermiques à disque chaud (TPS 2500S) et le Transient Guarded Hot Plate Technique (TGHPT) a été utilisée pour déterminer la conductivité thermique à l'état liquide. Ensuite, la conductivité thermique effective du composite a été modélisée en fonction de la structure de la mousse, de la conductivité thermique de la mousse métallique et de la conductivité thermique du MCP.

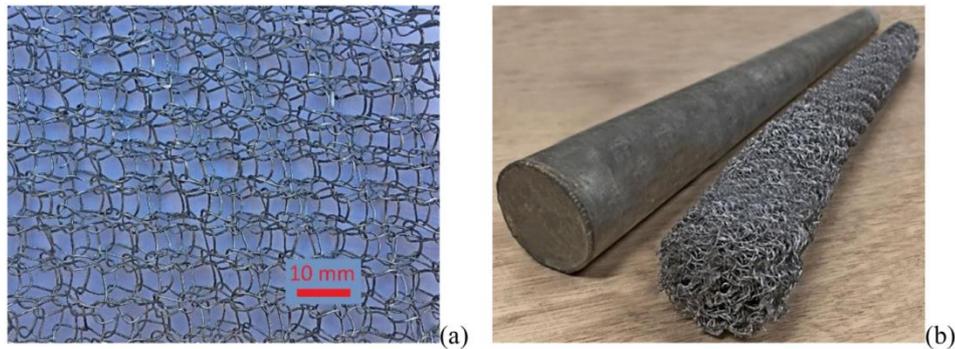
Les résultats montrent un impact élevé de la conductivité thermique de la mousse métallique et un impact mineur de la taille des pores sur la conductivité thermique effective sur la conductivité thermique effective.

## Chapitre 2 Recherche bibliographique



**Fig. 2.16. Installation expérimentale.**

**Giulia Righetti [31]** a étudié dans son travail expérimentale les effets de six mousses d'aluminium à alvéoles ouvertes et d'une structure d'aluminium périodique en 3D pendant le processus de changement de phase d'une cire de paraffine avec des températures de fusion de  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans une unité de stockage thermique hybride à eau. Les résultats obtenus à l'état liquide et à l'état solide ont montré que l'utilisation d'une mousse métallique augmente jusqu'à 19 fois la conductivité thermique d'un MCP pure. L'amélioration de la conductivité thermique intensifie.



**Fig. 2.17. Structure du filet en aluminium (a) , image du tube enveloppé (b).**

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

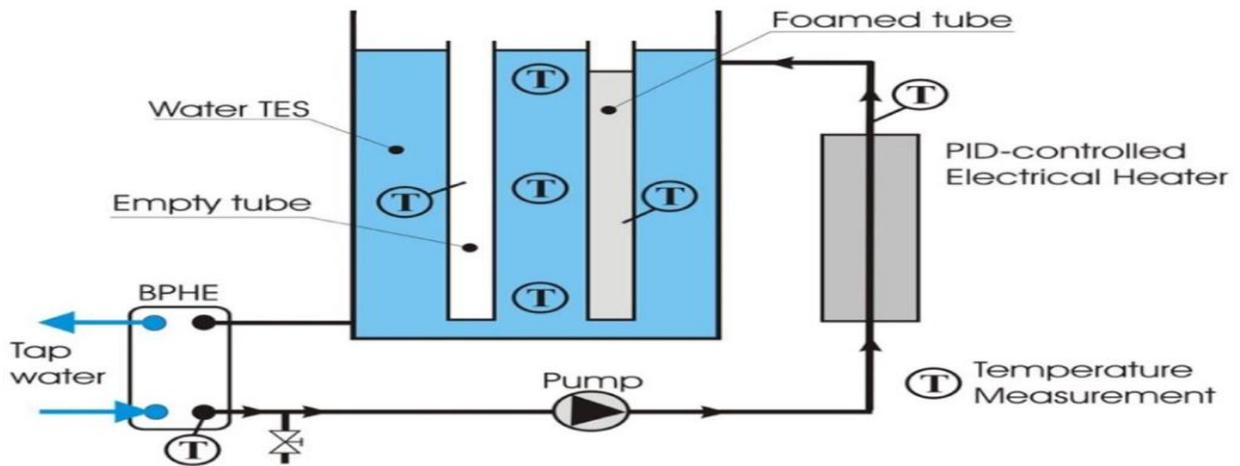


Fig. 2.18. Schéma de l'installation expérimentale.

**Zhenchao Qian [32]** afin d'améliorer la conductivité thermique et d'empêcher les fuites après fusion, des MCP ont été fabriqués en infiltrant de la paraffine dans des échafaudages poreux de h-BN avec des voies conductrices thermiques continues. La chaleur latente de fusion des MCP résultants contenant 18 % en poids de h-BN était de  $165,4 \pm 1,7 \text{ J/g}$ , et la conductivité thermique atteignait  $0,85 \text{ W/mK}$ . La conductivité thermique a augmenté d'environ 600 % par rapport à la paraffine pure, et était plus de deux fois supérieure à celle des composites fabriqués par mélange conventionnel de paraffine et de h-BN. La conductivité thermique améliorée a évidemment raccourci le processus de changement de phase, ce qui indique un stockage et une libération d'énergie plus efficaces. En outre, les échafaudages en h-BN ont conféré aux MCP une stabilité de forme à l'état fondu et ont empêché la fuite de la paraffine fondue. Cette approche pour fabriquer des MCP de forme stable avec une conductivité thermique élevée peut s'étendre à d'autres applications de gestion thermique.

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

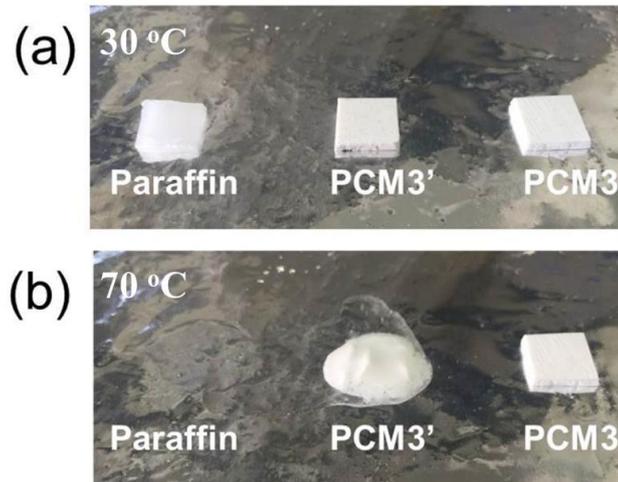


Fig. 2.19. Photos de la paraffine, du MCP3' et du MCP3 sur une scène chaude à (a)

**Bouzennada [33]** ce travail met en évidence les caractéristiques apportées par la convection libre au cours du processus de chargement thermique du MCP (fusion) à l'intérieur d'une enceinte à ailettes ou non. La simulation numérique est réalisée dans une géométrie 2D-rectangulaire pour deux cas. Dans le premier cas, une ailette de séparation centrale est utilisée, et dans le second cas, il n'y a pas d'ailette. La discussion des résultats met en évidence les points suivants :

- Le transfert de chaleur s'est amélioré grâce à l'amélioration de la distribution de la chaleur résultant de l'ajout d'une ailette à l'intérieur du MCP.
- L'énergie de stockage par rapport au taux de fusion est améliorée tant que le transfert de chaleur par mode de convection libre est dominant.
- La présence d'une ailette conduit à une diminution du temps de fusion de 1,28%, 12,82% et 20,52% respectivement pour les cas 90°, 45° et 0°.

De plus, le taux de stockage de l'énergie thermique a été accéléré de 14,75%, 19,67% et 36,88 respectivement pour les cas 60°, 45° et 0°.

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

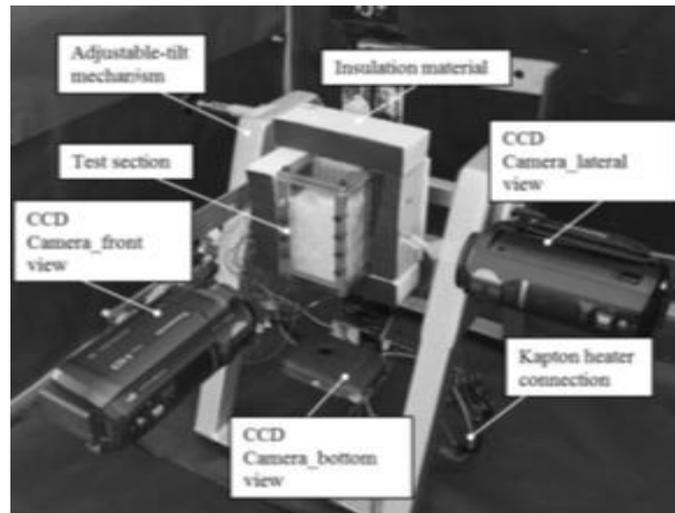


Fig. 2.20. Installation expérimentale.

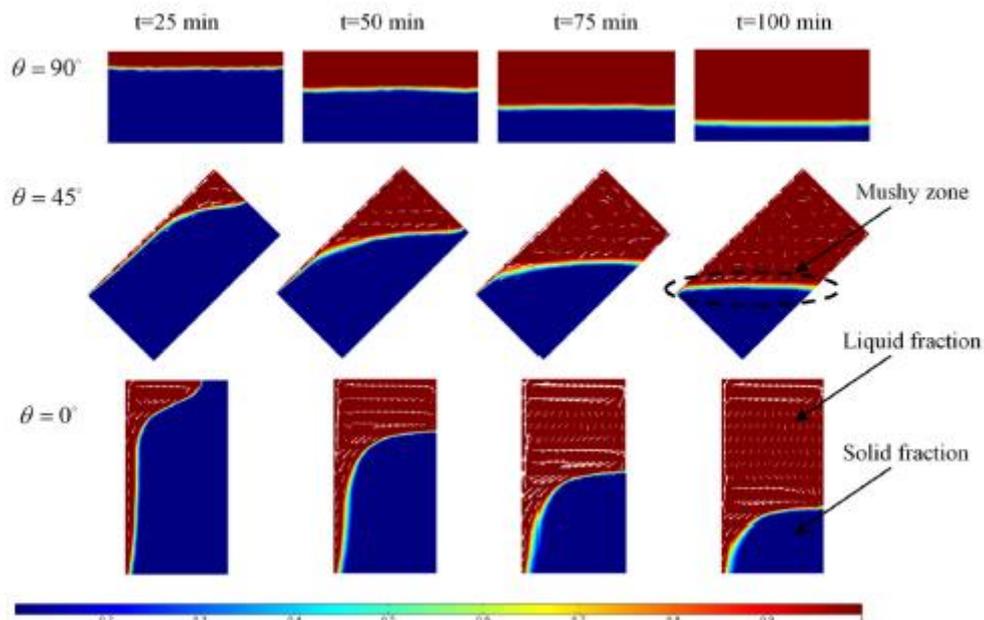


Fig. 2.21. Développement de la fraction liquide et les lignes de courant.

**Linyang [34]** ce travail étudie théoriquement l'identification inverse des propriétés spectrales des matériaux à changement de phase de la paraffine. Un modèle multi-épaisseur est développée pour déterminer les constantes optiques (indice de réfraction spectrale et indice d'absorption) du matériau paraffineux à l'état solide et liquide sur la base des données de transmittance. Ce modèle permet de surmonter les problèmes mal posés et les solutions multiples des problèmes inverses. Un algorithme amélioré d'optimisation par essais de particules quantiques est adopté pour déterminer l'indice de réfraction spectrale et l'indice d'absorption des matériaux paraffineux avec une grande

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

précision. Une série d'expériences numériques sont mises en œuvre pour étudier en profondeur les problèmes de récupération et les résultats montrent que la stratégie inverse que nous développons est une technique prometteuse pour obtenir les propriétés spectrales des matériaux en paraffine.

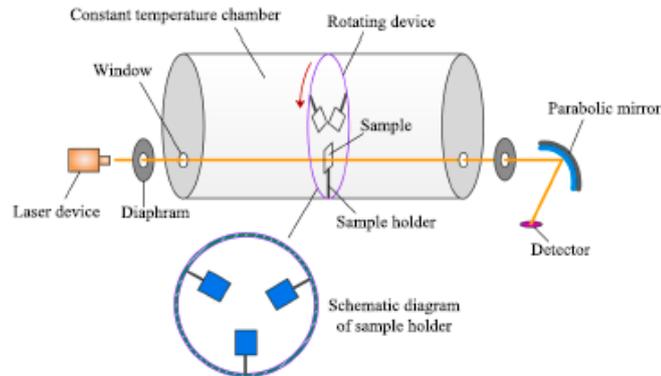


Fig. 2.22. Modèle hypothétique du système expérimental.

**Mancin [35]** cet article présente une étude expérimentale du processus de changement de phase solide-liquide de trois cires de paraffine naturelle, qui présentent des températures de fusion légèrement différentes : 53 C, 57 C, et 59 C, à trois flux de chaleur : 6,25, 12,5 et 18,75 kW/m<sup>2</sup> . En outre, l'utilisation de mousses de cuivre pour améliorer le processus de changement de phase est étudiée expérimentalement en employant trois échantillons différents avec 5, 10 et 40 PPI et une porosité constante égale à 0,95. Les résultats expérimentaux montrent clairement que la présence de la matrice de mousse améliore les capacités de transfert de chaleur du système passif, permettant une température de surface plus faible par rapport au cas sans mousse, pour le même flux de chaleur imposé. Une visualisation vidéo directe du processus a également permis de montrer les effets du milieu poreux sur les processus de fusion et de solidification.

## Chapitre 2 Recherche bibliographique

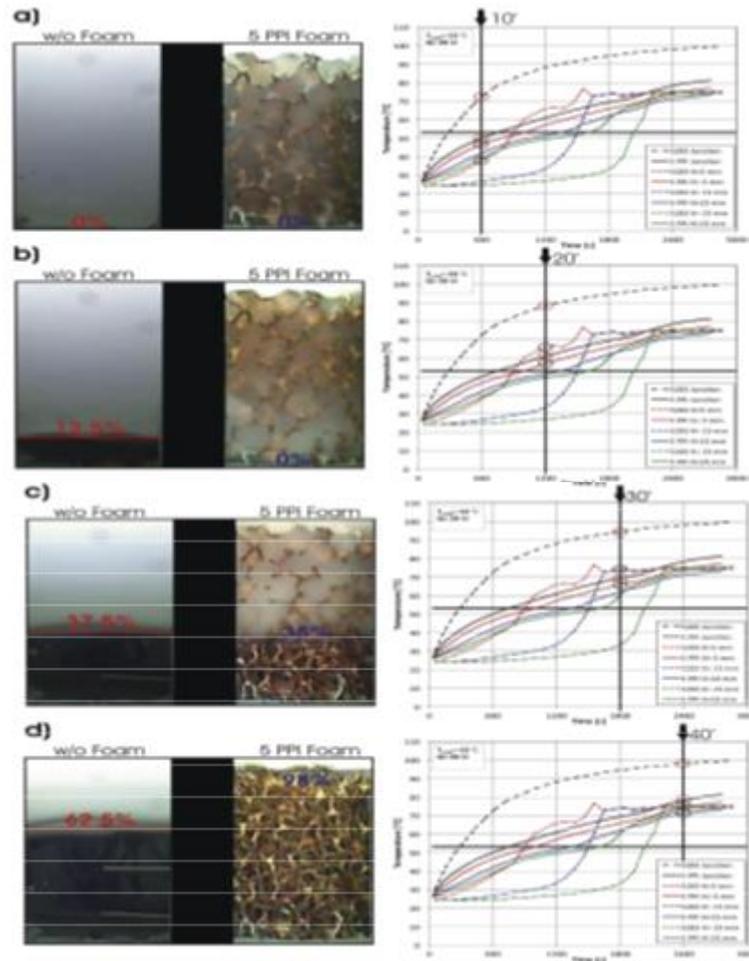


Fig. 2.23. Processus de changement de phase avec et sans mousse de cuivre à 20 W.

# **Chapitre 3 Procédure expérimentale**

## Chapitre 3 Procédure expérimentale

### 3.1.Introduction

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de l'inclinaison sur la fusion de la paraffine munie de plaques en aluminium et le comportement thermique du changement de phase du MCP dans une cavité transparente fabriquée en verre.

Pour répondre à ceci, ce troisième chapitre est consacré à la réalisation expérimentale. Nous présentons les expériences et les procédures expérimentales réalisées en indiquant les dispositifs et les matériels de mesure utilisés au niveau du laboratoire de recherche ETAP de l'université de Tlemcen, faculté de technologie.

### 3.2. Description de l'installation

Le paraffine est contenu dans une cavité thermique de forme cubique de dimensions  $12 \times 12 \times 4,5$  cm fabriquée en verre pour permettre de visualiser la fusion par une caméra simple (Fig.3.10) et une caméra infra-rouge (Fig.3.11) placées en face. Les parois latérales sont isolées par la laine de roche (Fig.3.7) pour diminuer au maximum les pertes thermiques qui peuvent être estimées par les températures prélevées par l'enregistreur (Fig.3.8). Le tout (cavité et isolation) est placé dans une enceinte en bois. La paraffine est chauffée par une résistance thermique dont la tension est contrôlée par un régulateur de puissance. L'évolution de la température est enregistrée à l'aide de thermocouples de type K (Fig.3. 1) (répartis sur neuf endroits espacés uniformément sur la face arrière de la cavité (Fig.3. 3)) reliés par une chaîne d'acquisition type NI (National Instruments) (Fig.3.2) à l'ordinateur (PC). Une interface est développée à l'aide du logiciel LabVIEW pour l'acquisition numérique des températures.

Le matériau à changement de phase (MCP) utilisé dans les expériences est de la paraffine dont le point fusion varie entre 49 et 54°C. Les propriétés thermo physiques de la paraffine sont représentées sur le tableau 3.1. La masse totale de la paraffine versée dans la cavité est de 410g gardée constante dans toutes les expériences :

## Chapitre 3 Procédure expérimentale

**Tab 3.1. Propriétés thermo physiques du tétracosane [8]**

Symbole	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$L_f$ (kJ/Kg)	$\lambda$ (W/m.K)	$C_p$ (kJ/kg.K)
valeur	912	769	176	0.2	2

**Tab 3.2. Propriétés thermo physiques de l'aluminium**

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	2.699	2.357	397	220	9.102*10 <sup>-3</sup>

**Tab 3.3. Propriétés thermo physiques du verre**

Symbole	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$C_p$ (kJ/kg.K)
valeur	2500	1.05	0.8

**Tab 3.4. Propriétés thermo physiques du bois**

Symbole	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$C_p$ (kJ/kg.K)
valeur	600	0.13	1.6

**Tab 3.5. Propriétés thermo physiques de laine de roche**

Symbol	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$ (W/m.K)	$C_p$ (kJ/kg.K)
Valeur	40	0.04	1.03

## **Chapitre 3 Procédure expérimentale**

### **3.3.Méthodes de réalisation**

#### **3.3.1. Réalisation de l'enceinte MCP**

La cavité thermique utilisée est en verre transparent chauffée d'un côté par une résistance électrique coudée (220V, 350W). Cette cavité a été réalisée dans le cadre d'un projet de fin d'étude **Gadiri [8]**

#### **3.3.2. Positionnement des thermocouples**

Les thermocouples sont placés sur la face arrière de la cavité à travers des trous percé et espacés uniformément (horizontalement et verticalement).

Les feuilles en aluminium utilisées contiennent 10 trous et sont 10 cm de longueur, 3 cm largeur. Trois feuilles sont rassemblées par un fil mince en cuivre pour former une plaque de masse de 2g. Deux plaques sont placées dans la cavité et espacées de manière équidistante.

Un joint d'étanchéité collé sur une plaque en bois est placé en haut de la cavité pour assurer l'étanchéité lors de la fusion de la paraffine durant l'inclinaison de la cavité.

#### **3.3.3. Isolation de la cavité thermique**

Afin de minimiser les pertes, la cavité thermique en verre est isolée sur les deux côtés latéraux par la laine de roche (Fig. 3.8). Nous avons utilisé une plaque en bois mobile pour l'isolation de la face avant et faciliter la prise des photos numérique et thermique chaque 10 minutes. Six thermocouples (Fig. 3.2) sont placés sur les quartes parois latérales de la cavité pour mesurer les pertes de chaleurs qui sont reliées aussi à l'enregistreur de température OQ600 (Fig. 3.9).

## Chapitre 3 Procédure expérimentale



**Fig.3. 3. Laine de roche (épaisseur de 7 cm)**



**Fig.3. 4. Enregistreur de température OQ600**

### Chapitre 3 Procédure expérimentale



**Fig.3. 5. Capteur de température de type K**

Un appareil photo numériques (10 mégapixels de précision, de marque Canon Digital IXUS 95 IS) est utilisé pour prendre les photos durant les expériences.



**Fig.3. 6. Camera canon IXUS 95 IS**

Une caméra infrarouge type IRSoft Testo i875 (marque testo 875-2i, résolution IR  $160 \times 120$  pixels, technologie Super Résolution  $320 \times 240$  pixels) permet de tracer la thermographie des évolutions thermiques de la paraffine.

## Chapitre 3 Procédure expérimentale



Fig.3. 7. Caméra infrarouge testo 875-2i

### 3.4 Chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition utilisée est de type NI (national instruments) (Fig. 3.12). Elle est constituée de l'unité principale (NI c-DAQ 9174), de deux modules de températures (NI9211) et un module universel (NI 9219). Cette chaîne permet de mesurer la température à l'intérieur de la cavité thermique.

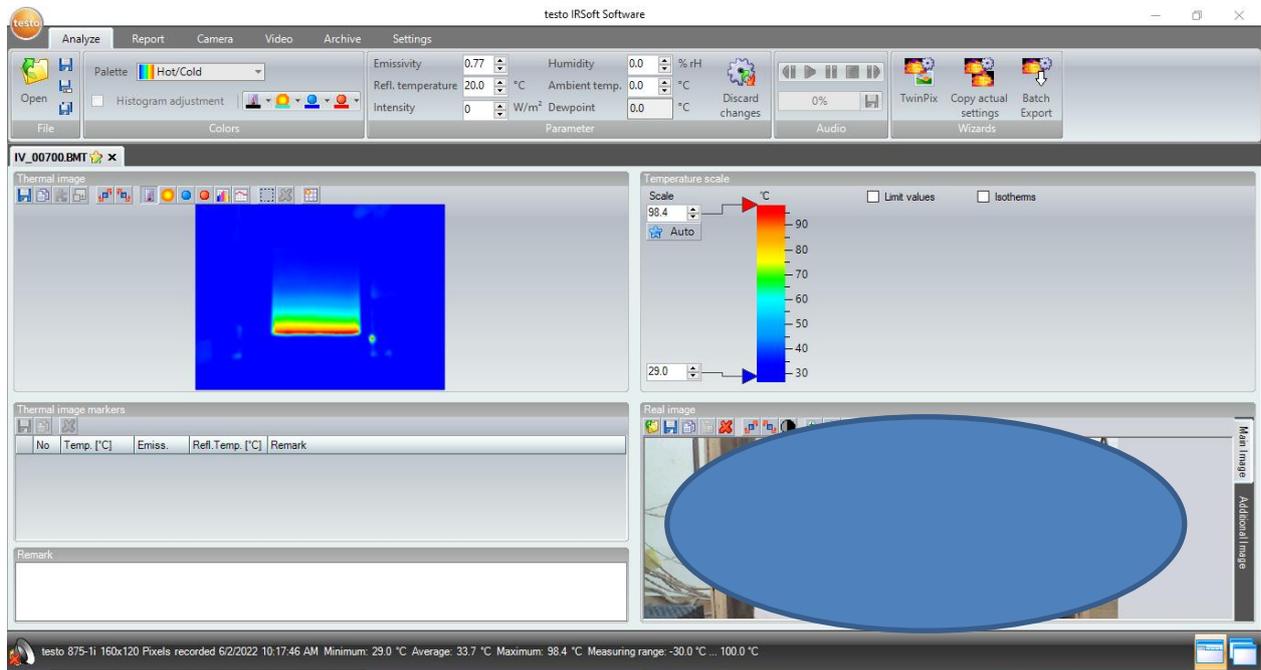
### 3.5 Logiciel utilisé

L'interface LabVIEW permet de contrôler en temps réel toutes les données de fonctionnement du banc expérimental. Cela comprend les températures relevées au sein de la cavité, la température délivrée par le thermocouple et le traçage directement des graphes.

LabVIEW (Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench) est un environnement de programmation graphique utilisé par les ingénieurs pour développer des systèmes automatisés de recherche, de validation et de test de production. il permet de gérer des flux d'informations numériques ou analogiques et de créer ou de simuler des instruments de mesures (oscilloscope, compteur, multimètre, etc.)

## Chapitre 3 Procédure expérimentale

- **IR Soft (Testo i875)** : utilisé pour traiter et analyser des images infrarouges et Images réelles obtenues par la caméra thermique.



**Fig.3. 8. Logiciel TestoIRSoft**

Ce programme thermique permet de visualiser la répartition de la température sur les images capturées lors des expériences et l'approximation time-lapse de la fusion

- **OriginPro** : utilisé pour tracer les courbes à partir des points enregistrés sur le fichier Excel (obtenus par la programmation LabVIEW) et pouvoir les approximer par des fonctions mathématiques.
- **GetData Graph Digitizer**: Utilisé pour tracer des espaces numériques [(cm)] qui détermine la surface de pâte (étendue de fusion) pour des photos ont été prises pendant les expériences.
- **Autocad** : utilisé pour approximer la fraction volumique du liquide à chaque moment de l'expérience.

## Chapitre 3 Procédure expérimentale

### 3.6. Procédure expérimentale

Dans une casserole, la paraffine à l'état solide est fondue par une résistance électrique pour éviter les hautes températures et la modification de ses caractéristiques thermophysiques (Fig. 3.16). La paraffine liquide sera versée dans la cavité.

Durant nos expériences, nous avons essayé de voir l'effet de l'inclinaison sur la fusion de la cavité en présence des additifs sous formes de plaques d'aluminium. La cavité est chauffée ainsi de trois côtés : par le bas ( $0^\circ$ ) (Fig. 3.17), par le côté ( $90^\circ$ ) (Fig. 3.18) et d'une inclinaison de  $45^\circ$  (Fig. 3.20). Les plaques d'aluminium perforées sont ajoutées pour améliorer la conductivité thermique et réduire l'effet de l'inclinaison.

Afin de comparer les résultats, nous avons essayé d'assurer des conditions initiales identiques et une masse de paraffine constante en ajoutant la paraffine en cas de fuites. Afin de maintenir ces conditions, nous avons mené plus d'une vingtaine d'expériences dont certaines ont été annulées pour plusieurs raisons dont les plus importantes sont :

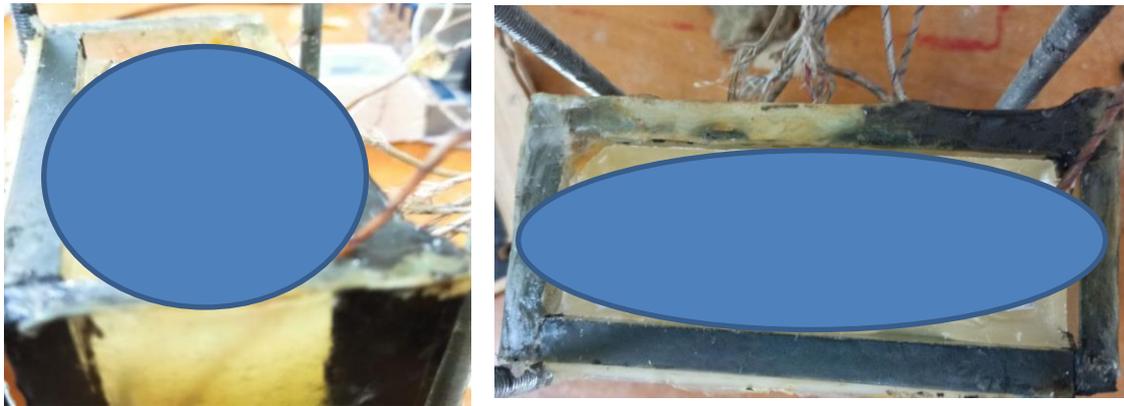
- La variation brutale de la valeur de puissance due au travail dans les autres laboratoires durant les expériences
- Les coupures d'électricité.
- Le changement de la température ambiante
- La présence des fuites dans la cavité.
- La non disponibilité de matériels nécessaire.

# Chapitre 4 Résultats et discussion

## Chapitre 4 Résultats et discussion

### 4.1.Introduction

Pour mieux comprendre le processus de la fusion et le phénomène de la convection naturelle, nous utilisons une cavité remplie par la paraffine intégrant des plaque d'aluminium comme additive (1% de la masse totale). Pour voir l'effet de la convection, la cavité est chauffée d'un côté et orientée selon trois angles à savoir : par le bas ( $0^\circ$ ), incliné ( $45^\circ$ ) et par le côté ( $90^\circ$ ).



**Fig.4. 1. Représentation de la poche d'air formée par la paraffine après la solidification.**

### 4.2.Comparaison avec la paraffine sans additifs

Les expériences menées sur la paraffine seule [8] révèlent un retard de 25 min pour une inclinaison de  $45^\circ$  et un retard de 3heures pour une inclinaison de  $90^\circ$  par rapport à un chauffage par le bas, cela correspond respectivement à un retard de 18% et 128%. En ajoutant des plaques d'aluminium, ces deux retards deviennent 46% et 64%, ainsi les additifs peuvent réduire considérablement l'effet de l'inclinaison sur la fusion de paraffine.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

Le présent travail porte sur la réalisation d'un banc d'essai pour l'étude expérimentale de l'évolution temporelle de la température durant le processus de fusion de paraffine munie de plaques d'aluminium perforées (1 % de la masse totale).

Le banc d'essai est une enceinte de forme carrée fabriquée en verre, isolée et chauffée par l'un de ses côtés. 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 pour la gestion numérique des résultats. Une caméra infra-rouge a été exploitée pour observer et enregistrer la carte thermique de l'enceinte durant le processus de fusion. L'étude expérimentale que nous avons réalisé, nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats montrent que l'introduction d'un matériau dans la paraffine absorbe de la chaleur et retarde la fusion durant les premiers instants. Ensuite, une accélération de la fusion est enregistrée. Plus la conductivité thermique des plaque d'aluminium ajouté est importante plus l'accélération qui en résulte est importante.
- Deux modes de transfert de chaleur dominant le processus de fusion, à savoir la conduction et la convection naturelle. La conduction régit la fusion au début du processus et contrôle la propagation de la fusion dans le MCP encore solide. Au fur et à mesure que le temps passe, le volume de la fraction de fusion augmente et la fusion est dominée progressivement par la convection naturelle.
- La gestion et la réalisation du chauffage par le côté est plus facile à gérer et à réaliser que le chauffage incliné à 45°.
- En comparaison avec le travail [8], l'effet de l'inclinaison sur la convection a fortement diminué en ajoutant des additifs sous forme de plaques d'aluminium

En perspective, il est intéressant d'estimer les pertes thermiques à l'aide de la température mesuré au niveau de l'isolation, calculé le coefficient de transfert de chaleur

H, le nombre de Nusselt, l'effet de nombre de plaque ajouté, la nature et la forme géométrique des additifs ....

## Références bibliographies

- [1] Lane, Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1:, Background and Scientific Principles. USA: CRC., 1983.
- [2] M. (. Telkes, Thermal storage for solar heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings., Charlottesville, Virginia, USA, (1975).
- [3] D. Verdier-Gorcias, Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé ; thèse de doctorat., Université de Perpignan via domitia, France., 2016.
- [4] Milan Ostrya, «Materials for advanced Heat storage in buildings,» 2013.
- [5] Quest-ce-que-le-stockage-thermochimique-definition, «quest-ce-que-le-stockage-thermochimique-definition,» thermal-engineering., 10 04 2022. [En ligne]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-le-stockage-thermochimique-definition/.2022>
- [6] Bakker, «Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump. Solar Energy, 78(2), 331-339.,» 2005.
- [7] S. G. Modélisation, Expérimentation et Évaluation de la performance énergétique globale. Thèse doctorat, spécialité : Physique du bâtiment, 2013..
- [8] Gadiri. DRAOU Fadia, Effet de l'inclinaison sur le processus de la fusion de la paraffine dans une cavité carrée, Tlemcen, 2019.
- [9] K. H. e. al, Macro-Encapsulated PCM Cylinder Module Based on Paraffin and Float Stones, Materials.p, 12. 2016..
- [10] M. Khawla, Amélioration du processus de la fusion des matériaux à changement de phase par voie expérimentale .Tlemcen.
- [11] K. P. e. K. Pielichowski, «Phase change materials for thermal energy storage,» *Progress in Materials Sciences*, vol. 65, pp. 67-123, 2014.
- [12] A. SHARMA, « Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materails and Applications.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 318-345, 2009.

- [13] A. MAHA, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material, *Energy and building*, 2005.
- [14] C.K. Jotshi, Solar thermal energy storage in phase change materials, in proc, USA: ASES Annual Conf, 1992.
- [15] S. M. R. Olives, «Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage materia,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, pp. 2727- 2737, 2001.
- [16] A. Akrouch, Etude de stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase ,mémoire de magister, Boumerdes: Université M'Hamed BOUGARA Ecole doctorale en Energétique et Développement Durable, 2011.
- [17] H. ÖZTÜRK, The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD Thesis, Ç.Ü. I, Adana. (In Turkish): nstitute of Natural and Applied Sciences,, 1997. .
- [18] I.O. Salyer and A. K., «Sircar, Phase change materials for heating and cooling of residential buildings,,» chez *Proceedings of the 28th intersociety energy conversion engineering conference*, Reno, Nevada, 12-17 Août 1990.
- [19] S. Hasnain, «Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques,» *Energy research*, vol. 39, n° %111, p. 1127 – 1138, 1997.
- [20] F. T. A.N. Korti, «Experimental investigation of latent heat storage in a coil in PCM storage unit,» *Journal of Energy Storage*, pp. 177-186, 2016.
- [21] P. Jany and A. Bejan, «Scalingtheory of meltingwithnatural convection in an enclosure,» *Int J Heat Mass Transfer*, vol. vol. 31, p. 1221–1235, 1988.
- [22] A. K. S. A. H. Guellil, «Experimental study of the performance of a novel latent heat charging unit on charging and discharging processes,» *Heat and Mass Transfer*, vol. Vol. 55, pp. 855-866, 2019.
- [23] J. C. Santiago Madruga, «Dynamic of plumes and scaling during the melting of a Phase Change Material heated from below,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 126, pp. 206-220, 2018.
- [24] BabakKamkari, «investigation of the effect of inclination angle on convection-drivenmelting of phase change material in arectangularenclousure,» *Heat and Mass Transfer*, vol. vol 72, pp. 186-200, 2014.

- [25] A. K. e. G. Guellil, «Journal of Energy Storage 32 journal home page: [www.elsevier.com/locate/est](http://www.elsevier.com/locate/est),» *Effet de l'orientation de la surface chauffante d'une cavité carrée sur la fusion de la paraffine*, pp. 11-12, 2020.
- [26] G. W. Pingrui Huang, «School of Energy, Power and Mechanical Engineering, Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System of Ministry of Education,» chez *Applied Thermal Engineering*, North China Electric Power University, Beijing, 102206, 2021.
- [27] Khaoula Missoum Hocine Guellil and Abdel Illah Nabil Korti, «Additives, Improvement of Thermal Conductivity and Energy Stored by Paraffin with Diferent Metallic,» *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 2020.
- [28] Ali Veismoradi, «Study of paraffin-based composite-phase change materials for a shell and tube energy storage system: A mesh adaptation approach,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 190, 2021.
- [29] M. K. Mohamed Moussa, «Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/ Metal,» *Journal of Energy Storage*, vol. 33, 2021.
- [30] R. L. Giulia Righetti, «Phase change materials embedded in porous matrices for hybrid,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 106, pp. 266-277, 2019.
- [31] F. Zhenchao Qian, «Phase Change Materials of Paraffin in h-BN Porous,» *Energy and buildings*, 2017.
- [32] F. Tarek Bouzennada a, «Heat transfer and fluid flow in a PCM-filled enclosure: Effect of inclination angle and mid-separation fin,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 124, 2021.
- [33] G. S. Linyang Wei, «Theoretical investigation on inverse identification of spectral properties of paraffin phase change materials based on multi-thickness model,» *Solar Energy*, vol. 225, pp. 266-274, 2021.
- [34] L. R. Simone Mancin, «Experimental analysis of phase change phenomenon of paraffin waxes embedded in copper foams,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 90, pp. 79-89, 2015.
- [35] W. L. Minqiang Pan, «Cutting copper fiber/paraffin composite phase change material discharging experimental study based on heat dissipation capability of Li-ion battery,» *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 408-422.