

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الميكانيك  
Département de mécanique



## Mémoire de Fin d'Études

présenté par

SALMA ZAKARIA

pour l'obtention du diplôme master en génie mécanique  
**option** : systèmes énergétiques et thermiques (appliquées)

---

### Thème

---

**Analyse du transfert de chaleur dans un système de  
stockage mixte (chaleur sensible et chaleur latente)**

---

**Proposé et dirigé par :**

**Dr HAMID**

**Promoteur**

**Mr. Lafri**

**Co-Promoteur**

**Année Universitaire 2012-2013**

**CHAPITRE I :**  
**ETAT DE L'ART**

**CHAPITRE II :**  
**GÉNÉRALITÉ SUR**  
**LE STOCKAGE THERMIQUE**  
**ET LES MCP**

**CHAPITRE II :**  
**MODÉLISATION**

**CHAPITRE IV :**  
**ETUDE EXPÉRIMENTAL**  
**DU MODELÉ**

**CHAPITRE V :**  
**RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION**

# CONCLUSION GÉNÉRALE

RÉFÉRENCE

BIBLIOGRAPHIQUE



# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# ANNEXES



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma chère maman qui m'a accompagné durant tout ce parcours laborieux,*

*A mon cher papa Mohammed à qui je souhaite une longue vie, et qui a fait de  
moi un homme*

*à mes frères et mes sœurs et à mes cousins et cousines.*

*Sans oublier mes oncles et à tous mes tantes,*

*ainsi tous mes collègues et ce qui a partagé avec moi cette période de la réalisation  
et ont créé la joie et la bonne Entente*

*et tous mais amies sans exception.*

*SALMA ZAKARIA*

## Remerciement

*Je tiens à remercier louange à ALLAH qui m'a donnée le courage, la patience et la capacité de mener ce travail à terme.*

*J'exprime mes vifs remerciements à mon promoteur Dr HAMID et mon co-promoteur Mr DJ-Lafri, pour m'avoir encadré durant mon travail.*

*Je tiens également à remercier tous les enseignants qui m'ont aidé le long de mon travail.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur le chef département De Génie Mécanique Mr BRAHIMI et tous les employé de la scolarité.*

*Mes vifs remerciement vont également à tous mes collègues, à Wissam qui m'a aidé à réaliser ce projet, et à mes chers parents pour leur soutien et leur éducation.*

## Résumé :

Le stockage de l'énergie thermique, et particulièrement par chaleur latente, représente l'un des moyens les plus prometteurs pour l'économie d'énergie. Ces systèmes de stockage ne sont pas très répandus car leur conception est freinée par la complexité des phénomènes de transferts thermiques qui se déroulent au niveau de l'interface solide-liquide.

Donc le but de ce travail est consacré à l'analyse expérimentale de transfert de chaleur dans un système de stockage de chaleur mixte (chaleur latente, chaleur sensible). Par la réalisation d'un élément de stockage thermique d'une géométrie cylindrique avec une intégration de MCP (paraffine 36.7°C) dans un cylindre de 53cm de hauteur et de 8cm de diamètre immergé dans une cuve de stockage cylindrique avec échangeur de chaleur type serpentin.

Mots clés : Stockage d'énergie thermique. Chaleur sensible, chaleur latente, les matériaux à changement de phase.

## المخلص:

تخزين الطاقة الحرارية, خاصة عن طريق الحرارة المتمددة, تمثل أحد السبل الأكثر اعتماد في اقتصاد الطاقة. هذه الأنظمة غير شائع و هذا راجع إلى تصاميمها المعرقله بتعدد ظواهر انتقال الحرارة التي تحدث على مستوى الطبقة البينية بين السائل و الصلب.

الهدف من هذا العمل هو الدراسة التجريبية لانتقال الحرارة داخل نظام تخزين الحرارة مختلط (حرارة متمددة, حرارة حساسة) عن طريق إنشاء وحدة تخزين حرارية أسطوانية الشكل و هذا بإضافة مادة قابلة للتمدد (شمع 36.7م) داخل أسطوانة ذات 53سم علو و 8سم قطر داخل وحدة تخزين أسطوانية الشكل مضاف إليها ناقل حرارة ملولب الشكل.

كلمات البحث: تخزين الطاقة الحرارية, الحرارة الحساسة, الحرارة المتمددة, المواد القابلة للتمدد.

## Abstract:

The storage of heat energy, especially latent heat, is one of the most promising for energy storage. These storage systems are not widely used because their design is hampered by the complexity of the phenomena of heat transfer accruing at the solid-liquid interface.

The objective of this work is devoted to experimental analysis of heat transfer in a system of mixer heat storage (heat latent, heat sensible). With a fabrication of an element of heat storage cylinder geometer with including a cylinder of PCM (wax 36.7°C) of 36cm diameter and 53cm of hauteur in element of storage cylinder geometer with a heat exchanger.

KEY WORDS: Storage of Heat Energy, Latent Heat, Sensible Heat, Materials Change Phases.



---

# *Sommaire*

---

## **1<sup>er</sup> Partie**

---

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<hr/>	
<b>Chapitre I Etude bibliographique</b>	
<hr/>	
<b>1.1 Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Travaux portant sur le stockage d'énergie thermique par changement de phase</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Conclusion</b>	<b>13</b>
<hr/>	
<b>Chapitre II Théorie générale sur le stockage thermique et les MCP</b>	
<hr/>	
<b>2.1 Introduction</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Le stockage d'énergie</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Intérêt de stockage d'énergie</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Les différentes techniques de stockage thermique</b>	<b>15</b>
2.4.1 <i>Le stockage thermochimique</i>	<i>16</i>
2.4.2 <i>Le stockage par chaleur sensible</i>	<i>16</i>
2.4.3 <i>Le stockage par chaleur latente</i>	<i>20</i>
<b>2.5 Les matériaux à changement de phase</b>	<b>21</b>
<b>2.6 Le choix des matériaux à changement de phase</b>	<b>22</b>
2.6.1 <i>Critères thermodynamiques</i>	<i>21</i>
2.6.2 <i>Critères Cinétiques</i>	<i>22</i>
2.6.3 <i>Critères chimiques</i>	<i>22</i>
2.6.4 <i>Critères économique</i>	<i>22</i>
<b>2.7 Classification des matériaux à changement de phase</b>	<b>22</b>
2.7.1 <i>Les composés organiques</i>	<i>23</i>
2.7.2 <i>Les composés inorganiques</i>	<i>27</i>
2.7.3 <i>Eutectique</i>	<i>31</i>
<b>2.8 Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage</b>	<b>32</b>



<b>2.9 Conclusion</b>	<b>34</b>
-----------------------	-----------

---

### **Chapitre III Modélisation numérique**

---

<b>3.1 Introduction</b>	<b>35</b>
-------------------------	-----------

<b>3.2 Model mathématique</b>	<b>35</b>
-------------------------------	-----------

<i>3.2.1 Schéma de principe</i>	<i>35</i>
---------------------------------	-----------

<i>3.2.2 Hypothèse</i>	<i>36</i>
------------------------	-----------

<i>3.2.3 Formulation des équations régissant le champ thermique de la cuve</i>	<i>36</i>
--	-----------

<i>3.2.4 Conclusion</i>	<i>39</i>
-------------------------	-----------

---

## **2<sup>eme</sup> Partie**

---

### **Chapitre IV Etude expérimentale du model**

---

<b>4.1 Introduction</b>	<b>40</b>
-------------------------	-----------

<b>4.2 Les équipements de module expérimental</b>	<b>40</b>
---	-----------

<i>4.2.1 Le choix de MCP</i>	<i>40</i>
------------------------------	-----------

<i>4.2.2 Conditionnement du MCP</i>	<i>41</i>
-------------------------------------	-----------

<i>4.2.3 Le fluide stockeur par chaleur sensible</i>	<i>42</i>
--	-----------

<i>4.2.4 Le module de stockage thermique</i>	<i>43</i>
--	-----------

<i>4.2.5 L'échangeur de chaleur</i>	<i>42</i>
-------------------------------------	-----------

<i>4.2.6 Isolation thermique</i>	<i>43</i>
----------------------------------	-----------

<i>4.2.7 Mesure de température</i>	<i>43</i>
------------------------------------	-----------

<i>4.2.8 Mesure du débit</i>	<i>43</i>
------------------------------	-----------

<i>4.2.9 Acquisition des données</i>	<i>44</i>
--------------------------------------	-----------

<b>4.3 Montage expérimental</b>	<b>44</b>
---------------------------------	-----------

<b>4.4 Procédure de l'expérimentation</b>	<b>49</b>
---	-----------

---

### **Chapitre V R résultats et interprétation**

---

<b>5.1 Introduction</b>	<b>50</b>
-------------------------	-----------

<b>5.2 Validation de système</b>	<b>50</b>
----------------------------------	-----------

<b>5.3 Résultats de la phase de stockage</b>	<b>52</b>
--	-----------



<b>5.4 Résultats de la phase de relaxation</b>	<b>56</b>
<b>5.5 Etude paramétrique</b>	<b>60</b>
<b>5.6 Conclusion</b>	<b>65</b>
<hr/> <b>Conclusion générale</b>	<b>66</b>
<hr/> <b>Référence bibliographique</b>	<b>67</b>
<hr/> <b>Annexes</b>	<b>69</b>
<hr/>	



### Conclusion générale

Cette étude expérimentale a apporté à l'analyse des phénomènes de transfert de chaleur à l'intérieur de l'élément de stockage (fluide, paraffine) dans un cycle complet de charge et relaxation de la chaleur pendant une durée d'environ de 9 heures de stockage et de même pour la relaxationsans viser une application précise qui aurait nécessité en plus d'une étude des performance du système.

L'analyse des mesures expérimentales a montré que le processus de transfert de chaleur dans le système de stockage se fait principalement en monodimensionnel dans le fluide, bidimensionnel dans la paraffine. Et que l'augmentation de débit volumique de fluide caloporteur influe sur la capacité d'énergie thermique stockée dans le matériau à changement de phase ainsi que l'intégration des matériaux à changement de phase dans les systèmes de stockage par chaleur sensible a un effet directe sur la capacité d'énergie thermique stockée malgré que la quantité de la paraffine (MCP) n'est pas suffisante pour montre bien l'importance de l'intégration à partir de l'écart de la température entre le stockage mixte et le stockage par chaleur sensible à la fin de la phase de déstockage de notre expérience.

En perspective, on remarque que la quantité de la paraffine (MCP)est insuffisante pour montre bien l'importance de l'intégration des matériaux à changement de phase dans les systèmes de stockage thermique par chaleur sensible.

Nous souhaitons que dans l'avenir, l'étude sera faite avec une source de chaleur variable (capteur solaire plan) et une quantité de matériau à changement de phase bien déterminer dans le système ainsi avec des différents matériaux à changement de phase pour tenir compte de l'effet de stockage thermique et l'intégration de matériau à changement de phase dans les systèmes solaires. Et pour l'étude théorique de ce système on a vérifié les hypothèses de travail (monodimensionnel pour le fluide, bidimensionnel pour la paraffine).

## NOMUCLATURE ET ABREVIATIONS

Symboles latin	Signification	Unité
Aec	Surface de l'échangeur	m <sup>2</sup>
Al	Surface latérale de la cuve	m <sup>2</sup>
Cp	Chaleur spécifique	J.Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
C	Capacité calorifique d'un corps	J.K <sup>-1</sup>
D	Diamètre de la cuve	m
di	Diamètre intérieur de l'échangeur	m
de	Diamètre extérieur de l'échangeur	m
eis	Epaisseur de l'isolant	m
ea	Epaisseur de la paroi de la cuve de stockage	m
<i>f</i>	Le taux de fusion	%
Hc	La hauteur de la cuve	m
H	Enthalpie totale	J
h	Enthalpie spécifique, Coefficient de convection	J.Kg <sup>-1</sup> . W.m <sup>-2</sup> k <sup>-1</sup>
Keq	Coefficient de conductivité équivalent de la cuve	W.m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
L	Chaleur latente de changement de phase	J.Kg <sup>-1</sup>
Lec	Longueur de l'échangeur	m
Lc	Longueur de la cuve	m
m	La masse	Kg
$\dot{m}$	Débit massique	Kg.s <sup>-1</sup>
Qcd p	Le flux conductif à travers de la paroi	Watt
Qe	Les pertes vers l'extérieur	Watt
Qec	Puissance fournie par l'échangeur de chaleur à travers le fluide.	Watt
QF	Le flux conductif à travers le fluide (eau).	Watt
Qp latérale.	Le flux thermique des échanges de chaleur par convection sur la paroi latérale.	Watt
QT	Le flux conductif à travers la tôle.	Watt

## NOMUCLATURE ET ABREVIATIONS

R1	Rayon intérieur de l'échangeur	m
R2	Rayon extérieur de l'échangeur	m
Rc	Rayon de la cuve de stockage	m
T	Température	k
Tfi	Température de fluide à l'entrée de l'échangeur	k
Tfs	Température de fluide à la sortie de l'échangeur	k
Tf	Température de référence	k
TRé	Température de résistance	k
U	Energie interne	Watt
V	Volume	m <sup>3</sup>

---

### Symboles grecs

---

$\lambda$	Conductivité thermique	W. m <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>
$\phi$	Flux de chaleur	W
$\Delta$	Variation	
$\rho$	Masse volumique	Kg. m <sup>-3</sup>
$\delta$	la différence partielle	

---

### Abréviation

---

MCP	Matériau à changement de phase
-----	--------------------------------

---

### Indice

---

Pr	Paraffine
F	Fluide
T	Tôle
P	Paroi
J	Joule
Cte	Constant
i	Initial

## NOMUCLATURE ET ABREVIATIONS

<i>f</i>	Finale
TC	Thermocouple
TC Ré	Thermocouple de résistance
S	Solide
L	Liquide
is	Isolant
ec	Echangeur
c	La cuve
e	extérieur

---

## LISTE DES TABLEAUX

<b>N° de tableau</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau 2.1</b>	Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C.	17
<b>Tableau 2.2</b>	Avantages et inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur.	18
<b>Tableau 2.3</b>	Avantages et inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur.	18
<b>Tableau 2.4</b>	Avantages et inconvénients des roches, béton et briques.	19
<b>Tableau 2.5</b>	Avantages et inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur.	19
<b>Tableau 2.6</b>	Propriétés thermo physiques des paraffines.	24
<b>Tableau 2.7</b>	Exemples de propriétés physiques de paraffines.	26
<b>Tableau 2.8</b>	Propriétés thermophysiques des acides gras.	27
<b>Tableau 2.9</b>	Propriétés thermophysiques des matières organiques non-paraffiniques.	28
<b>Tableau 2.10</b>	Différents hydrate salins.	31
<b>Tableau 2.11</b>	Liste de quelques Eutectiques.	32
<b>Tableau 4.1</b>	Les propriétés thermophysiques de MCP choisi.	41

## LISTE DES FIGURES

N° de figure	Intitulé	Page
Figure 1.1	: Schéma du lit de stockage <b>Benmansour (2001)</b> .	06
Figure 1.2	: Le montage expérimental <b>Benmansour (2009)</b> .	07
Figure 1.3	: Schéma de principe de dispositif <b>D. Seck et al (2009)</b> .	08
Figure 1.4	: Schéma du problème <b>Zohir Younsi et coll. (2009)</b> .	09
Figure 1.5	: Le modèle de stockage avec ailettes radiales <b>Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010)</b> .	10
Figure 1.6	: Le model de stockage avec ailette longitudinal <b>Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010)</b> .	10
Figure 1.7	: Le déroulement de fusion de l'unité de stockage avec ailettes radiales <b>Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010)</b> .	11
Figure 1.8	: Représentation du domaine <b>S. Bouadila et coll. (2011)</b> .	11
Figure 1.9	: Géométries de problème <b>Walid FOU DHIL et coll. (2012)</b> .	12
Figure 1.10	: L'unité de stockage fabriqué <b>B.Kanimozhi, B.R.Ramesh (2012)</b> .	13
Figure 1.11	: Aperçue sur le banc d'essai <b>R.Meenakshi et coll. (2012)</b> .	13
Figure 2.1	: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique.	16
Figure 2.2	: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.	20
Figure 2.3	: Classification des MCP.	23
Figure 2.4	: Conditionnement de MCP en nodules.	32
Figure 2.5	: Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines.	33
Figure 3.1	: Schéma du principe de dispositif.	35
Figure 3.2	: Une coupe de la zone (I).	37
Figure 3.3	: Une coupe de la zone (II).	37
Figure 3.4	: Une coupe de la paroi.	38
Figure 4.1	: La paraffine.	41
Figure 4.2	: Le cylindre utilisé.	41
Figure 4.3	: La cuve de stockage.	42
Figure 4.4	: Thermocouple type k.	43

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 4.5 :</b> Chaîne d'acquisition et micro-ordinateur.	44
<b>Figure 4.6 :</b> La cuve coupée .	44
<b>Figure 4.7 :</b> L'emplacement de l'échangeur de chaleur.	44
<b>Figure 4.8 :</b> Le montage de support des thermocouples dans la cuve	45
<b>Figure 4.9 :</b> Le support des TC de la cuve.	45
<b>Figure 4.10 :</b> Schéma de disposition des TC dans la cuve.	45
<b>Figure 4.11 :</b> Thermocouples collés sur une tige.	46
<b>Figure 4.12 :</b> Schéma de disposition des TC dans le MCP.	46
<b>Figure 4.13 :</b> Le déroulement de la deuxième étape de la conception.	47
<b>Figure 4.14 :</b> Aperçus sur la troisième étape du montage.	48
<b>Figure 4.15 :</b> Aperçue sur le montage expérimental.	48
<b>Figure 5.1 :</b> La répartition des zones dans la cuve de stockage.	50
<b>Figure 5.2(a) :</b> L'évolution de la température de l'eau suivant la hauteur de la cuve en fonction de temps au cours de stockage.	51
<b>Figure 5.2(b) :</b> L'évolution de la température de l'eau suivant le diamètre de la cuve en fonction de temps au cours de stockage.	51
<b>Figure 5.3(a) :</b> L'évolution de la température de la paraffine suivant la hauteur du cylindre en fonction de temps au cours de stockage.	52
<b>Figure 5.3(b) :</b> L'évolution de la température de la paraffine suivant le diamètre du cylindre en fonction de temps au cours de stockage.	52
<b>Figure 5.4 :</b> L'évolution de la température de l'eau d'alimentation de chaleur en fonction de temps.	53
<b>Figure 5.5 :</b> L'évolution de la température de l'eau suivant la hauteur de la cuve en fonction de temps dans les différentes zones au cours de stockage.	54
<b>Figure 5.6 :</b> L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve au cours de stockage.	54
<b>Figure 5.7(a) :</b> L'évolution de la température de l'eau et la paraffine en fonction de temps dans la zone1 de la cuve au cours de stockage.	55
<b>Figure 5.7(b) :</b> L'évolution de la température de l'eau et la paraffine en fonction de temps dans la zone2 de la cuve au cours de stockage.	55

## LISTE DES FIGURES

- Figure 5.7(c) :** L'évolution de la température de l'eau et la paraffine en fonction de temps dans la zone 3 de la cuve au cours de stockage. 56
- Figure 5.8 :** L'évolution de la température de l'eau en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve au cours de relaxation. 56
- Figure 5.9 :** L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps dans différentes zones de la cuve au cours de relaxation. 57
- Figure 5.10(a) :** L'évolution de la température de l'eau et paraffine dans la zone 1 au cours de relaxation. 58
- Figure 5.10(b) :** L'évolution de la température de l'eau et paraffine dans la zone 2 au cours de relaxation. 58
- Figure 5.10(c) :** L'évolution de la température de l'eau et paraffine dans la zone 3 au cours de relaxation. 59
- Figure 5.11 :** l'évolution de la température de l'eau au cours de deux phases (stockage et relaxation). 59
- Figure 5.12 :** l'évolution de la température de la paraffine au cours de deux phases (stockage et relaxation). 60
- Figure 5.13(a) :** L'évolution de la température de l'eau dans la zone 1 de la cuve au cours de stockage pour les deux débits différents. 61
- Figure 5.13(b) :** L'évolution de la température de l'eau dans la zone 2 de la cuve au cours de stockage pour les deux débits différents. 61
- Figure 5.13(c) :** L'évolution de la température de l'eau dans la zone 3 de la cuve au cours de stockage pour les deux débits différents. 62
- Figure 5.14(a) :** L'évolution de la température de la paraffine dans la zone 1 de cylindre au cours de stockage pour les deux débits différents. 62
- Figure 5.14(b) :** L'évolution de la température de la paraffine dans la zone 2 de cylindre au cours de stockage pour les deux débits différents. 63
- Figure 5.14(c) :** L'évolution de la température de la paraffine dans la zone 3 de cylindre au cours de stockage pour les deux débits différents. 63
- Figure 5.15(a) :** L'évolution de la température de l'eau dans la zone 1 au cours de stockage et de relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible). 64
- Figure 5.15(b) :** L'évolution de la température de l'eau dans la zone 2 au cours de stockage et relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible). 64



## LISTE DES FIGURES

**Figure 5.15(c)** :L'évolution de la température de l'eau dans la zone 3 au cours de stockage et de relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible). 65

## Introduction

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

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

Plus récemment un intérêt particulier a été porté à l'étude et développement d'accumulateur d'énergie par chaleur latente en vue de gérer la demande et consommation. En effet l'énergie sous forme thermique se caractérisé souvent par son inadéquation entre les besoins et les ressources sur le plan temporel d'une part, en puissance et en température d'autre part.

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

- La densité énergétique (capacité de stockage par unité de volume ou de masse),
- La puissance thermique instantanée stockée et/ou délivrée,
- La simplicité du procédé,
- L'efficacité énergétique (absence des pertes), ...etc.

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

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

Une autre façon de stockage de l'énergie calorifique consiste à utiliser des matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant grâce à leur solidification.

Le choix d'un MCP dont la chaleur latente est élevée et dont la température de changement de phase est proche de la température de travail (souhaitable) permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'appareil et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

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

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

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

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

Plusieurs dispositions possibles sont également étudiées : verticale, horizontale, intégrer dans les mur...

Cette étude s'inscrit dans ce cadre et consiste à apporter une contribution à l'analyse des phénomènes de transfert de chaleur qui se déroulent dans le processus de stockage et déstockage de chaleur mixte ou le MCP immergé dans une cuve de stockage d'eau chaude d'une géométrie cylindrique de 36cm de diamètre et de 53cm de hauteur.

Pour atteindre les objectifs fixés à cette étude, on a subdivisé le travail en cinq chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes de stockage thermique effectués depuis des années 80 à ce jour. Pour ce faire un littérature riche portant sur plusieurs références bibliographiques a été consultée et exploitée.

Le second chapitre porte sur des généralités sur les différentes techniques de stockage thermique et les matériaux à changement de phase.

Le troisième chapitre est consacré à une revue théorique sur l'étude des phénomènes liés au transfert thermique et au processus de stockage et déstockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase.

Ces trois premiers chapitres composent la première partie de l'étude qui est consacrée à la synthèse des aspects théoriques sur le stockage de chaleur.

Le quatrième chapitre porte sur l'étude expérimentale du modèle qui consiste à réaliser un module de stockage et d'effectuer plusieurs cycles de stockage et déstockage de chaleur et de recueillir les variations de température en fonction du temps pour interpréter les phénomènes qui s'y déroulent.

En fin, un cinquième chapitre est consacré à l'interprétation et la comparaison des résultats expérimentaux avec une conclusion générale.

## Chapitre I : Etat de l'art

### I.1. Introduction :

Le stockage thermique par changement de phase est une technologie innovante et prometteuse en matière d'économie d'énergie. C'est un domaine des recherches qui n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêts et ce jusqu'à la crise énergétique de la fin des années 1970 et le début des années 80.

Au cours des dernières années, le souci d'économie d'énergie a été l'une des préoccupations dans la recherche sur l'énergie. Bien que la recherche sur le stockage de chaleur latente pour les systèmes de chauffage solaire continue de susciter l'intérêt de beaucoup de recherches, on le considère de plus en plus pour la récupération et le stockage de la chaleur résiduelle des équipements industriels. Le principe d'utiliser un accumulateur thermique pour stocker l'énergie latente générée par un procédé n'est pas récent. Son intérêt réside dans l'ajustement des pics de la demande d'énergie. La chaleur ou le froid généré par les équipements est récupéré et stocké dans une batterie thermique et peut par la suite être utilisé lorsque nécessaire, par exemple lors des moments où la demande est à son maximum. La technique permet à la fois de diminuer les appels de puissance et d'améliorer l'efficacité énergétique de l'équipement en le faisant à un régime optimal.

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

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

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

Des études comparatives (performances, compacité, etc,...) avec d'autres types d'accumulateurs sont aussi abordées.

Dans ce qui suit, on présentera quelques travaux théorique et expérimentale qui sont liés aux objectifs de la présente étude, et qui concernent les systèmes de stockage périodiques d'énergie thermique par chaleur latent.

**I.2. Travaux portant sur le stockage d'énergie thermique par changement de phase :****1- Stockage périodique par chaleur latente :****Par : Bransier (1979). [1]**

A étudié analytiquement la solidification et la fusion cyclique d'un MCP. Un modèle conductif unidimensionnel et utilisé. Le MCP est mis dans deux configurations, à savoir :

- Un élément plan ou le fluide caloporteur circule de part et d'autre de ces deux surfaces (courant parallèles).
- Un élément composé de deux cylindres concentriques ou le fluide caloporteur circule à l'intérieur du cylindre alors que le MCP se trouve dans l'espace annulaire entre les cylindres, la surface extérieure du cylindre étant isolée.

La température de fluide caloporteur est supposée une fonction sinusoïdale du temps variant autour de la température de fusion. Le coefficient de transfert convectif est supposé constant.

Dans la modélisation il s'adopté la méthode de capacité thermique apparente et un schéma aux différences finies implicite à trois niveaux de temps. Il a rapporté qu'il y a une épaisseur optimale pour l'élément plan pour laquelle l'énergie stockée ou déstockée est maximale. Ainsi l'élément cylindrique est plus défavorable pour le stockage que l'élément plan. Ses résultats n'ont pas été validés expérimentalement.

**2- Thermal performance of a heat storage module using PCM's with Different Melting Temperatures:****Par: Farid et Kanzawa (1989). [2]**

Ils ont étudié expérimentalement et analytiquement un élément de stockage d'énergie par chaleur latente constitué de plusieurs capsules cylindriques montées verticalement et fixés dans un tube isolé. Les capsules sont disposées en trois groupes contenant trois différents MCP.

Pendant la charge, de l'air chaud passe à travers les capsules de façon à ce que les températures de fusion des trois MCP décroissent dans la direction de l'écoulement. Cependant, pendant la décharge, la direction de l'écoulement d'air est inversée. Les autres rapportent que le taux de transfert de chaleur est amélioré pendant la charge et la décharge, et leur modèle numérique est en accord raisonnable avec l'expérience.

**3- An analysis of heat transfer using equivalent thermal conductivity of the liquid phase during melting inside an Isothedy heated Horizontal cylinder:****Par: Hirata et Nishida (1989).[3]**

Ils ont considéré la fusion dans un échangeur de chaleur à coquille. Le MCP est contenu à l'intérieur du tube alors que l'espace annulaire entre les deux tubes est divisé en trois compartiments ou le fluide caloporteur circule pour assurer une température uniforme sur la surface de contact. Ils ont analysé la fusion du MCP par un modèle analytique basé sur la

conductivité thermique équivalente. Ainsi, ils ont discuté et proposé une corrélation de la conductivité thermique équivalente.

#### **4- Heat Exchanger performance for latent heat thermal Energy storage system:**

**Par: Fath (1991).** [4]

À examiner les performances d'un échangeur de chaleur à coquille horizontal dans lequel le MCP se trouve du côté coquille et le fluide caloporteur circule à l'intérieur de tube. Il a utilisé un MCP dont la température de fusion est de 50°C. Un modèle analytique basé sur l'approximation quasi stationnaire est développé pour prédire les performances au système.

L'auteur rapporte que l'augmentation du débit massique, la température initiale du fluide et de la longueur de l'échangeur augmentent le transfert de chaleur et l'énergie accumulée dans le MCP. Ainsi, un seul échangeur est thermiquement plus efficace que deux échangeurs parallèles ayant chacun la moitié de longueur et la même capacité thermique.

#### **5- Thermal performance of a planar latent heat energy storage unit with electric heat sources:**

**Par : Laouadi, Lacroix et Galanis (1994).** [5]

Ils ont développée et utilisé un modèle basé sur la conduction unidimensionnel pour étudier les performances d'un accumulateur de chaleur plan qui consiste en une couche de MCP de deux centimètres d'épaisseur isolée thermiquement d'un côté. Le stockage de chaleur s'effectue grâce à des résistances électriques chauffantes placées dans le MCP juste au-dessus de l'isolant. Le déstockage vers l'environnement se fait par radiation et/ou par convection. Cette étude a montré que cette unité peut être chargé et déchargé deux fois par jours et pourrait donc servir pour déplacer les pics dus aux appels de puissance en période de pointe vers les heurs creux de la journée.

Autres résultats de cette étude :

- Lorsque la puissance électrique de chauffage augmente la température de l'élément augmente tandis que le temps de stockage diminue et que le temps de déstockage augmente.
- Les pertes de chaleurs augmentent aussi avec la puissance de chauffage et atteignent une valeur maximale à la fin de la période de stockage.
- La performance de l'unité dépend fortement de la puissance électrique de chauffage et du coefficient de transfert de chaleur vers l'environnement.

#### **6- Thèse : Etude expérimental de la fusion et la solidification de la paraffine N-Octadécane :**

**Par : Pierre UZABAKILIHU (1995).** [6]

A étudié expérimentalement la fusion-solidification de la paraffine dans une enceinte rectangulaire avec l'analyse des phénomènes de convection et de conduction a été effectuée,

ainsi que les études sur les dimensions du contenant, l'utilisation des ailettes et leurs impacts sur la fusion et la solidification des MCP avec les effets de la dilatation de la paraffine.

### 7- Simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe des sphères contenant un Matériau à Changement de Phase :

Par : Benmansour et M.A Hamdan(2001). [7]

A étudié numériquement du stockage de l'énergie thermique par chaleur latente à basses températures (0 °C à 100 °C) dans un lit cylindrique rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un matériau à changement de phase (MCP), traversé par un flux d'air. Un modèle numérique mono dimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Il a permis de prédire la distribution axiale de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit ainsi que les performances de ce lit fixe dans les deux modes de stockage et de récupération de la chaleur pour une température du fluide à l'entrée constante et un nombre de Reynolds variable. Le modèle développé s'applique à la fois pour un processus de changement de phase isotherme et non isotherme. L'évolution de la température à l'intérieur du lit a permis de déterminer les domaines de stockage les plus efficaces et de définir par conséquent les dimensions optimales de l'unité de stockage.

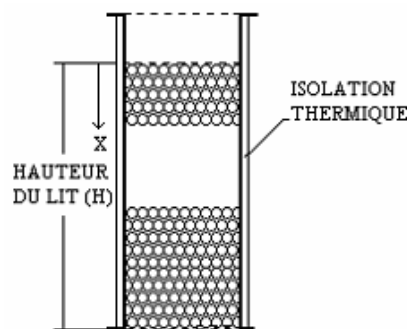


Figure I.1: Schéma du lit de stockage. Benmansour (2001). [7]

### 8- Analyse de transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau :

Par : Hamid El QARNIA (2005).[8]

Fait un modèle mathématique basé sur les équations de conservation de l'énergie a été développé pour prédire le comportement thermique ainsi que la performance d'une unité de stockage de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente de fusion d'un matériau à changement de phase (MCP). L'unité de stockage est constituée d'une série de tubes placés dans le MCP. Durant le mode de charge, un fluide caloporteur (l'eau) provenant du capteur solaire, circule dans les tubes et transfère l'énergie solaire collectée au niveau du capteur solaire au matériau à changement de phase.

### 9- Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : Application au refroidissement d'une composante électronique :

Par : Mustapha FARAJI, Hamid El Qarania (2007).[9]

Ils ont été optimisé la performance thermique d'un modèle de refroidissement d'une composante électronique. Un modèle mathématique régissant le comportement thermique des différentes composantes du système est développé. Les paramètres clés du modèle ont été définis et les équations du modèle sont ensuite discrétisées, transformées en nu système d'équations algébriques et résolues itérativement. Plusieurs expériences de simulation ont été effectuées en vue d'optimiser les dimensions optimales du refroidissement proposé.

### 10- Réponse dynamique d'un lit fixe pour le stockage de l'énergie thermique utilisant un matériau à changement de phase :

Par : Benmansour (2009). [10]

A été étudié expérimentalement et numériquement les performances transitoires d'un lit fixe rempli de sphères uniformes, disposées au hasard et contenant chacune un MCP. Un modèle théorique bidimensionnel à deux phases séparées est appliqué. Considérant à la fois la dispersion thermique axiale et radiale, ce modèle est résolu par une méthode implicite aux différences finies. Il a permis de prédire la distribution de la température du fluide et du matériau fusible le long du lit dans les deux modèles de stockage et récupération de la chaleur et pour un large domaine de nombre de Reynolds.

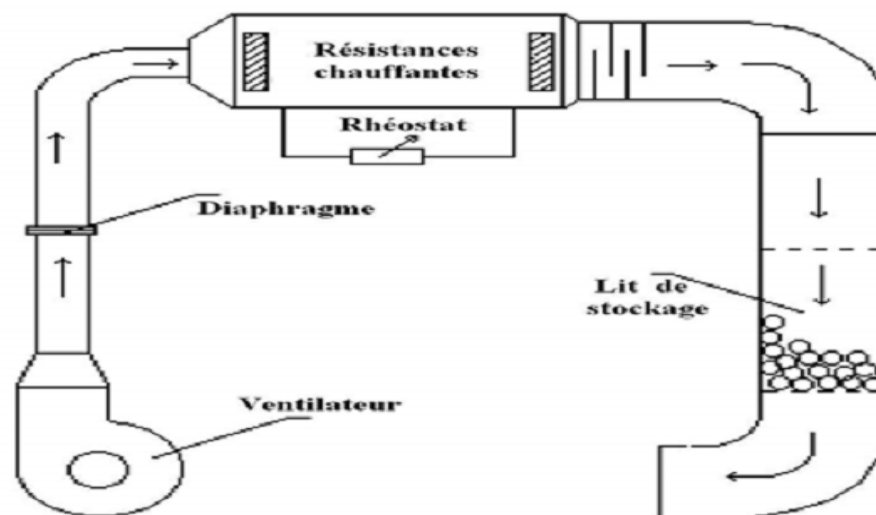


Figure I.2 : Le montage expérimental. Benmansour (2009). [10]



### 11- Détermination du front de fusion d'une plaque de paraffine soumise à l'ensoleillement :

Par : D. Seck et al (2009).[11]

Ils ont étudié l'évolution du front de fusion d'une plaque de paraffine (52-54) soumise à l'ensoleillement a été menée sur un capteur stockeur parallélépipédique fabriqué au laboratoire d'énergétique appliquée. La plaque est un carré de côté égal à un mètre et de quatre centimètres d'épaisseur. La complexité du problème visé par cette étude a nécessité l'emploi d'une méthode enthalpique à une dimension. Les résultats montrent un front surestimé par la solution analytique de Newman, mais sous-estimé par le modèle.

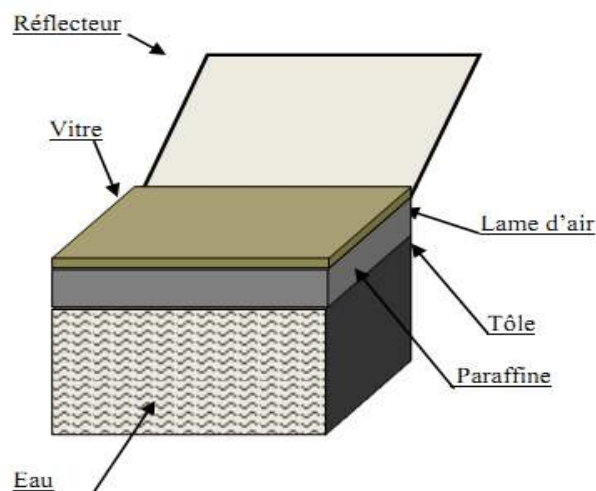


Figure I.3 : Schéma de principe de dispositif. D. Seck et al (2009).[11]

### 12- Analyse Numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffé par une paroi latérale :

Par : Zohir Younsi et coll. (2009). [12]

Ils ont étudié expérimentalement le comportement thermique d'un matériau à changement de phase (sels hydratés) par l'intégration des éléments dans des parois de murs solaires passifs. La formulation enthalpique est utilisée pour les simulations numériques effectuées en 1D et 2D. Il s'agira à terme d'introduire ce modèle dans un outil global de simulation de composants solaires.

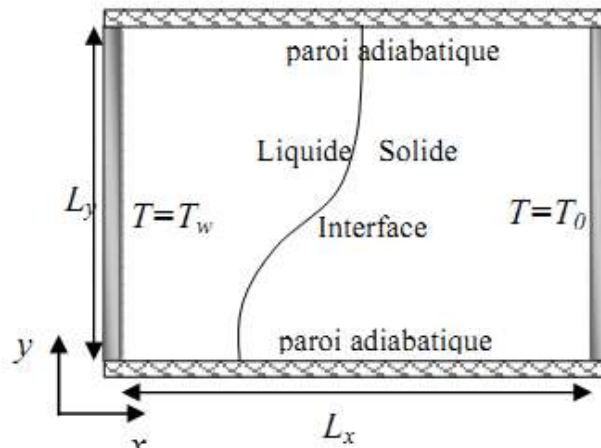


Figure I.4 : Schéma du problème. Zohir Younsi et coll. (2009).[12]

### 13- Etude des effets de l'épaisseur de la paraffine sur les performances d'un chauffe-eau solaire à changement de phase :

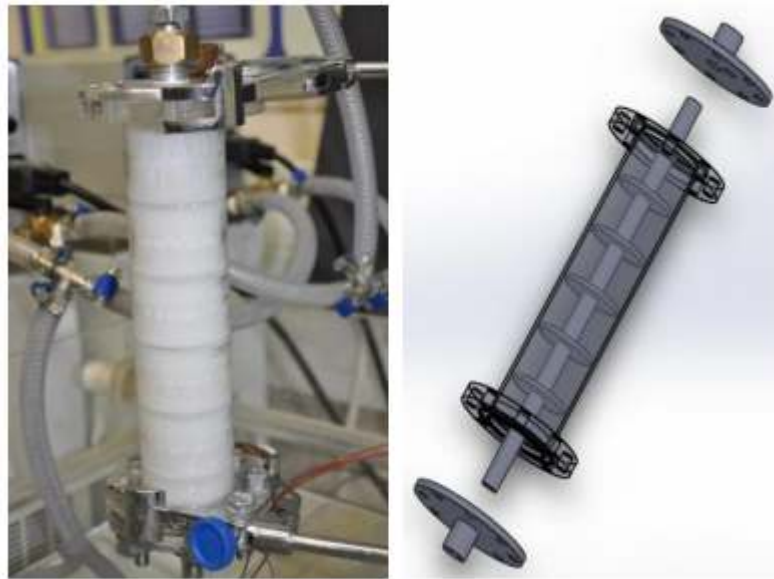
Par : Housseynatou BAH (2010). [13]

Fait une étude sur les effets de l'épaisseur de la paraffine sur les performances d'un chauffe-eau solaire à changement de phase pour produire de l'eau chaude sanitaire. Formé de deux sections contiguës dont l'une est remplie de paraffine (52°C-54°C) et l'autre d'eau, ce type de capteur utilise le stockage combiné de chaleur sensible et de chaleur latente et peut être une alternative au chauffe-eau traditionnel. Les résultats expérimentaux montrent que pour un ensoleillement moyen de 600 W/m<sup>2</sup> et une épaisseur de 2 cm de paraffine nous obtenons une température maximale de 48 °C vers 17 h et 40 °C le lendemain à 6 h. Le rendement obtenu pour cette épaisseur avoisine les 60 % et les pertes thermiques moyennes nocturnes sont aux environs de 4,44 W/K.

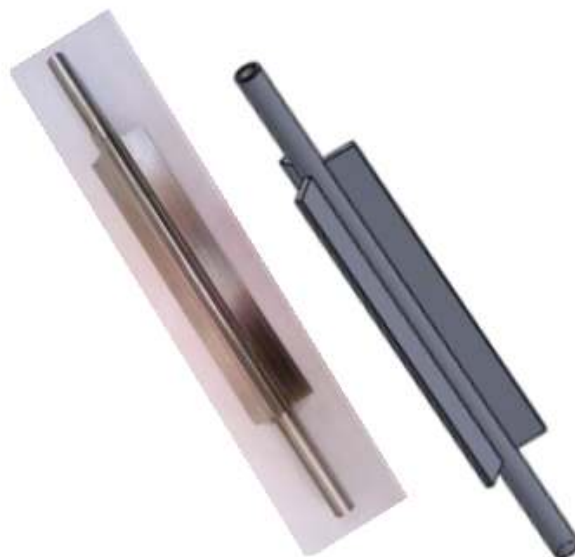
### 14- Analysis of Heat Storage Devices with Fins:

Par: Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010). [14]

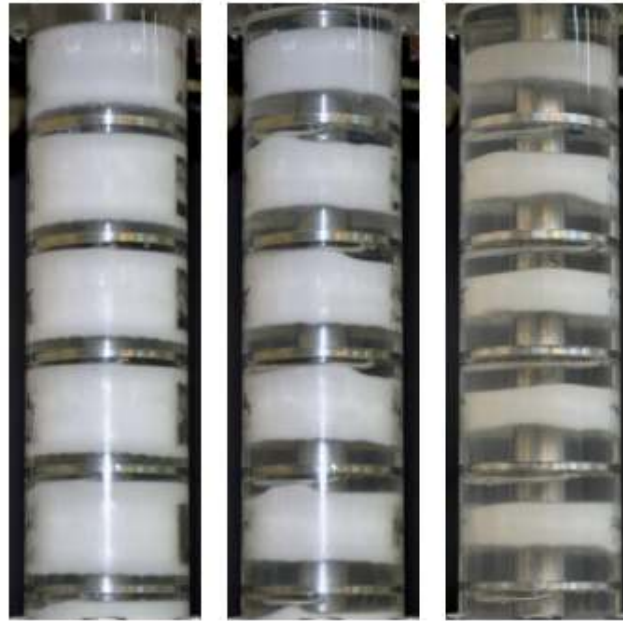
Ils ont fait une étude expérimentale de deux modèles de stockage d'énergie thermique par changement de phase. Ces modèles d'une configuration cylindrique l'un constitue d'un échangeur de chaleur à coquille de 280mm de long. Le tube intérieur un diamètre de 8mm et d'épaisseur de 2mm avec des ailettes radiales de diamètre de 43mm et d'épaisseur de 3mm et de 33mm espace entre eux et le tube extérieur de 50mm de diamètre et 3mm d'épaisseur (Figure I.6). Le deuxième modèle consiste aussi échangeur de chaleur à coquille de même géométrie sauf le tube intérieur avec des ailettes longitudinale de 180mm de long et le MCP remplie 96% (Eicosane C20 H42) d'une température de fusion de 36.7°C dans l'espace annulaire entre les deux tubes (Figure I.7). Donc la charge (Stockage) de l'énergie thermique se fait par le flux imposé par l'eau chaud qui passe dans le tube intérieur et la décharge (déstockage) se fait en vice-versa de stockage.



*Figure I.5* : Le modèle de stockage avec ailettes radiales **Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010).** [14]



*Figure I.6* : Le model de stockage avec ailette longitudinal. **Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010).** [14]

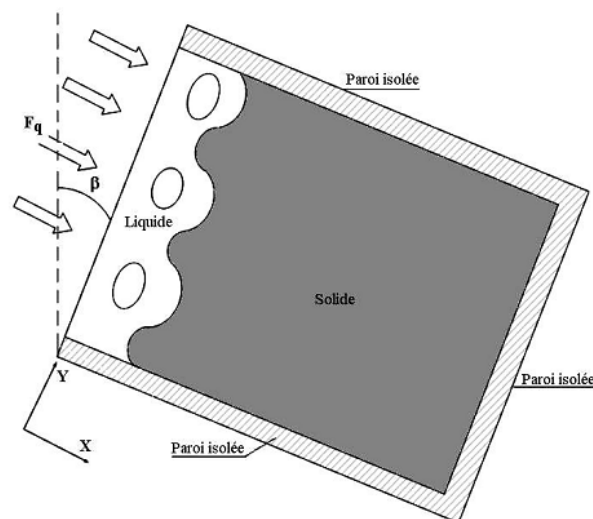


**Figure I.7:** Le déroulement de fusion de l'unité de stockage avec ailettes radiales. **Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010).**[14]

### 15- Study of storage thermal energy of latent heat application to the solar collector

**Par: S. Bouadila et coll. (2011).** [15]

Le travail effectué comprend une étude numérique des problèmes de la fusion et de la solidification des MCP, complétée par une application expérimentale qui consiste à la réalisation d'un capteur solaire stockeur.



**Figure I.8:** Représentation du domaine. **S. Bouadila et coll. (2011).** [15]

### 16- Simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un canal poreux : Analyse des performances et comparaison :

Par : Walid FOUDHIL et coll. (2012). [16]

Ils ont étudié analytiquement les performances d'un système de stockage d'énergie thermique dans un canal poreux vertical en de mode de stockage : sensible et latente. Le canal poreux, qui est soumis à une ventilation d'air à faible vitesse, est limité par deux parois soumises à deux contraintes différentes : l'une est chauffée par une densité de flux constant alors que l'autre est supposée adiabatique. Pour décrire le comportement du système, les équations de conservation utilisant le modèle à deux températures et appliquant la loi de Darcy-Brinkman sont utilisées. Une modélisation de la quantité d'énergie stockée pour les deux modes de stockage a été effectuée. Les résultats indiquent que l'accroissement de l'énergie stockée dans des billes de MCP comparée à celle emmagasinée dans des billes de verre varie de 45 à 82% lorsque la température d'entrée de l'air varie de 25 à 40°C.

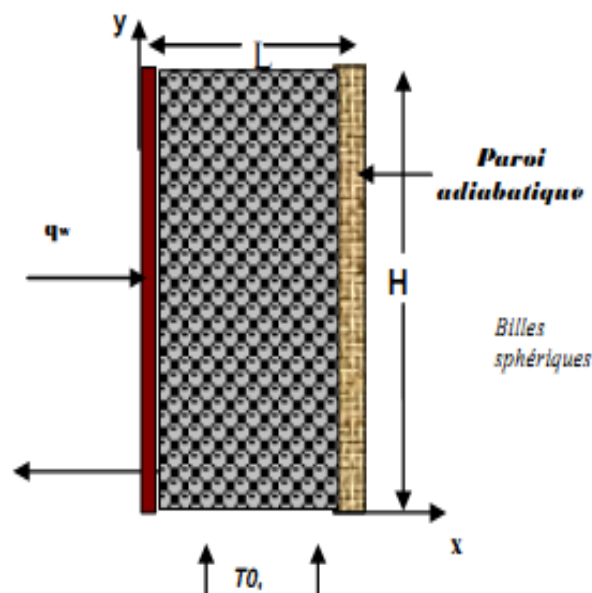


Figure I.9: Géométries de problème. Walid FOUDHIL et coll. (2012). [16]

### 17- Experimental Study of Thermal Energy Storage in Solar System Using PCM:

Par: B.Kanimozhi, B.R.Ramesh (2012). [17]

Ils ont étudié expérimentalement les caractéristiques et les performances de stockage d'énergie thermique dans un système solaire de chauffage d'eau par la réalisation d'une cuve de stockage avec matériau à changement de phase d'une capacité de 45 litres d'eau d'une configuration cylindrique contenant plusieurs tubes, chaque un contenant un MCP différent à l'autre.



*Figure I.10:* L'unité de stockage fabriqué. B.Kanimozhi, B.R.Ramesh (2012).[17]

### 18- Experimental Studies on Phase Change Material-Based Thermal Energy Storage System for Solar Water Heating Applications:

Par: R.Meenakshi et coll. (2012). [18]

Ils ont étudié expérimentalement les performances d'un système de stockage d'eau chaud sanitaire à basse température par un flux variable (Source d'énergie c'est de Soleil) par l'intégration des matériaux à changement de phase (paraffine et les esters d'acide) d'une configuration sphérique et de différents diamètre (38, 58, 68 mm) dans le réservoir de stockage.



*Figure I.11 :* Aperçue sur le banc d'essai. R.Meenakshi et coll. (2012). [18]

### I.3. Conclusion :

A partir les états d'art précédentes on a vue qu'il existe plusieurs méthode et techniques d'accumulation de l'énergie thermique par changement de phase qui sont déjà traité et amenant des conclusions différentes. L'intégration de MCP à la cuve a un effet direct sur l'amélioration ou l'augmentation de la capacité de d'énergie thermique stocké. Donc le couplage avec un système actif permet une utilisation plus effective de la chaleur latente. Et

pour améliorer les capacités de stockage et permettre une utilisation effective des quantités de chaleur stockés et l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) qui se généralise aujourd'hui dans les laboratoires grâce à ces caractéristiques thermiques qui peuvent trouver dans des applications de divers domaines. Donc dans le cadre de l'étude des systèmes de stockage d'énergie thermique par changement de phase on va étudier un modèle réduit d'un système de stockage d'eau **Mr Dj. Lafri (2001) [19]** avec l'intégration de MCP dans la cuve de stockage et suivre son comportement thermique.

## Chapitre II

### Généralité sur le stockage thermique et les MCP

#### II.1.Introduction :

Le stockage est un moyen privilégié pour une gestion optimale de l'énergie thermique. Il permet en effet d'adapter la production aux besoins et de créer les conditions les plus favorables à cette gestion en réalisant une relation constante entre l'énergie demandée et l'énergie fournie. De plus, dans l'industrie, il peut contribuer efficacement à améliorer la capacité de l'énergie stocké. Pour mieux comprendre le contexte dans lequel le stockage de chaleur (Thermique), nous allons exposer dans la section suivante les différents techniques de stockage d'énergie thermique.

#### II.2. Le stockage de l'énergie :[20]

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une énergie à un endroit donné pour faciliter son exploitation immédiate ou future. Par son importance dans notre civilisation grande consommatrice d'énergie, le stockage d'énergie est une priorité économique. Il concourt à l'indépendance énergétique, c'est-à-dire à la capacité d'un pays à satisfaire par lui-même ses besoins énergétiques. De ce fait, le stockage d'énergie est souvent l'objet d'une attention particulière de la part des pouvoirs politiques, surtout dans les pays fortement dépendants de l'étranger.

Par extension, le terme "stockage d'énergie" est souvent utilisé pour décrire le stockage de la matière qui produira cette énergie.

#### II.3. Intérêt de stockage de l'énergie :[20]

Le stockage d'énergie est un enjeu à la hauteur de la consommation d'énergie primordial.

Pour les états, l'indépendance énergétique est stratégique et économiquement essentielle. Pour les individus et les entreprises, une énergie disponible à la demande, sans coupure inopinée, est un confort et une commodité pour la production.

Même pour la production d'énergie, le stockage est essentiel : en réalité, ce qu'on appelle couramment et économiquement production d'énergie n'est pas physiquement, de la production, mais de la transformation d'un stock d'énergie (thermique.....) en énergie directement utilisable pour un travail (électricité...).

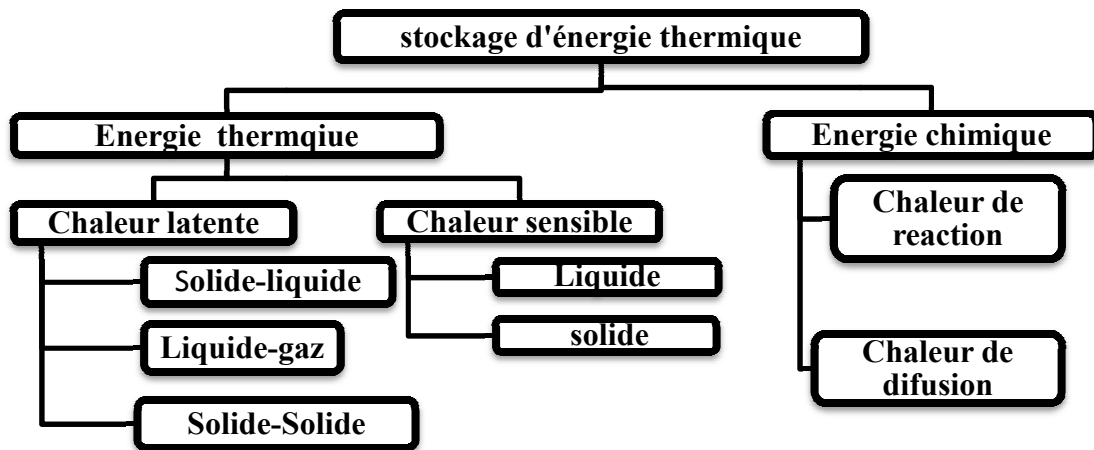
#### II.4.Les différentes techniques de stockage thermique :

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

Ainsi l'énergie thermique peut être stockée comme un changement de l'énergie interne d'un matériau en tant que peut être sensible, chaleur latente et thermochimique, ou en combinaison de ces derniers.



Un aperçu des principales techniques de stockage de l'énergie thermique est illustré à la figure II.1.



*Figure II.1:* Principales techniques de stockage de l'énergie thermique. [21]

#### II.4.1. Le stockage thermochimique :

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basée sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles ([22]; [23]; [24]). Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [23]. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente.

Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs ([25]; [23]).

#### II.4.2. Le stockage par chaleur sensible :[26]

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau (Figure II.2, zone sensible). Si  $h$  est l'enthalpie massique du matériau, la variation de la quantité de chaleur  $Q$  échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice  $i$  à état final noté avec l'indice  $f$  est :

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

Ou  $m$  : est la masse du matériau [kg],

$h_i$  : est l'enthalpie massique initiale [J/Kg],

$h_f$  : est l'enthalpie massique finale [J/Kg].

Si la capacité thermique massique du matériau  $C_p$  (ou chaleur spécifique massique, J/Kg K) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire :

$$Q = m C_p (T_f - T_i) \quad [\text{J}] \quad (\text{II.2})$$

Ou  $T_i$  : est la température initiale [K],

$T_f$  : est la température finale [K].

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

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

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

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le tableau suivant n°1.

**Tableau II.1:** Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20°C. [27]

Matériaux	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur spécifique (J/Kg K)	Capacité thermique volumétrique (J/m <sup>3</sup> K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	200	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

#### II.4.2.1 Métaux liquides : [28]

Les métaux liquides sont de bons candidats pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible. En effet, leur état liquide permet généralement une meilleure intégration au système d'échange de chaleur. De plus, la vitesse de restitution de la chaleur est généralement plus élevée due aux effets convectifs qui se produisent à l'intérieur du liquide. Cette caractéristique spécifique aux matériaux liquides leur procure par contre une plus grande autodécharge, résultant en une plus faible autonomie pour une puissance donnée. Les principaux liquides utilisés sont l'eau et les huiles thermique.

**II.4.2.1.1 L'eau** :[28]

Etant un des matériaux les plus accessibles et abondant au monde, l'eau a vite été considéré pour une utilisation de stockage thermique sous forme sensible. L'essai a été concluant pour certaines situations, car son utilisation comporte de nombreux avantages. Par contre, certains inconvénients font que d'autres matériaux peuvent y être préférés dans certains systèmes.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de l'utilisation de l'eau dans un système de stockage de chaleur sous forme sensible.

**Tableau II.2:** Avantages et inconvénients de l'eau comme stockeur de chaleur.[28]

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénient</b>
Haute efficacité	Autodécharge élevée
Chaleur spécifique élevée	Pression de vapeur élevée
Faible cout	Corrosif à certains contenants
Très disponible	
Très documenté	
Aucune détérioration	

**II.4.2.1.2 Huiles** :[28]

Les plus communs des matériaux liquides, après l'eau, pour un système de stockage thermique sous forme sensible. La chaleur spécifique de certaines huiles est de 25 à 40% plus élevée que celle de l'eau. Ils ont également une plus basse pression de vapeur ce qui permet de les utiliser à une température de fonctionnement plus élevée. Les deux principales huiles qui ont retenu l'attention pour une application de stockage de chaleur sont le therminol et la caloria-HT. Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients des huiles.

**Tableau II.3:** Avantages et inconvénients de l'huile comme stockeur de chaleur.[28]

<b>Avantage</b>	<b>Inconvénient</b>
Chaleur spécifique élevée	Très dispendieux
Non-corrosif aux contenants	Toxique pour l'environnement
Disponible	Inflammable
Faible pression de vapeur	
Température de fonctionnement élevée	

**II.4.2.2 Métaux solides** :[28]

Les métaux solides sont de bons candidats pour une application de stockage thermique. On note notamment la roche, le conglomerat, le sable, les briques, les métaux, etc. L'énergie est emmagasinée à basse température. De plus, aucune fuite en cas de bris du contenant ne peut arriver et ils n'ont aucun problème du à la pression de vapeur comme c'est le cas avec l'eau. Le meilleur candidat de matériaux solide pour le stockage thermique est la

fonte, sa densité d'énergie est plus élevée que l'eau. Cependant, la fonte est très dispendieuse et d'autres matériaux sont généralement préférés pour leur coût inférieur. Un autre candidat de premier choix est la roche. Utilisée sous forme de lit de pierre, l'énergie peut y être emmagasinée en laissant le fluide caloporteur circuler directement entre les pierres ou par le biais d'un échangeur thermique. Un dernier type de matériaux à considérer est les métaux. Ils ont d'avantage d'avoir une excellente conductivité thermique et peuvent résister à de très hautes températures. Leur utilisation est considérée généralement dans des applications nécessitant une conductivité thermique élevée. Les résidus industriels de cuivre, de fer, de fonte et d'aluminium sont de bons exemples de métaux potentiels

#### **II.4.2.2.1 Roches, béton et briques : [28]**

Ayant des caractéristiques très rapprochées, les roches, le béton et les briques forment une catégorie à haut potentiel d'utilisation comme matériaux dans un système de stockage thermique sous forme sensible. En effet, leur stabilité à long terme, leur disponibilité et leur prix abordable en font de bons candidats. Par contre, leur faible conductivité thermique ainsi que leur faible chaleur spécifique font que d'autres matériaux leur soient souvent préférés. Le tableau suivant résume leurs avantages et inconvénients.

**Tableau II.4 :** Avantages et inconvénients des roches, béton et briques.[28]

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Excellente stabilité cyclique	Faible chaleur spécifique
Chimiquement stable	Faible conductivité thermique
Disponible	
Abordable	

#### **II.4.2.2.2 Métaux : [28]**

La principale caractéristique qui fait que les métaux sont intéressants pour un système de stockage de chaleur sous forme sensible est leur grande capacité thermique. Celle-ci leur permet une absorption rapide de la chaleur, mais également une dissipation rapide, ce qui implique une grande autodécharge, une faible autonomie et une efficacité réduite. Pour ces raisons, ils seront principalement utilisés dans des applications de courte durée. Le tableau suivant résume leurs avantages et inconvénients.

**Tableau II.5 :** Avantages et inconvénients des métaux comme stockeur de chaleur.[28]

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Conductivité thermique élevée	Très dispendieux
Chimiquement stable	
Disponible	
Recyclable	

### II.4.3. Le stockage par chaleur latente : [29]

Pour réduire considérablement les volumes de stockage et s'affranchir des fluctuations de température liées au stockage par chaleur sensible, on peut choisir l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière.

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'états de la matière.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation.

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

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f \quad [J] \quad (II.3)$$

Où  $\Delta h_f$ : l'enthalpie spécifique de fusion (J/Kg).

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

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times C_p \times (T_f - T_i) + m \times \Delta h_f [J] \quad (II.4)$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure II.2. 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.

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} m \times C_s(T) dT + m \times L + \int_{T_f}^{T_2} m \times C_L(T) dT [J] \quad (II.5)$$

$C_s(T)$  : Chaleur spécifique du corps à l'état solide.  $[J.Kg^{-1} K^{-1}]$

$C_L(T)$  : Chaleur spécifique du corps à l'état liquide.  $[J.Kg^{-1} K^{-1}]$

$L$  : Chaleur latente de changement de phase.  $[J.K^{-1}]$

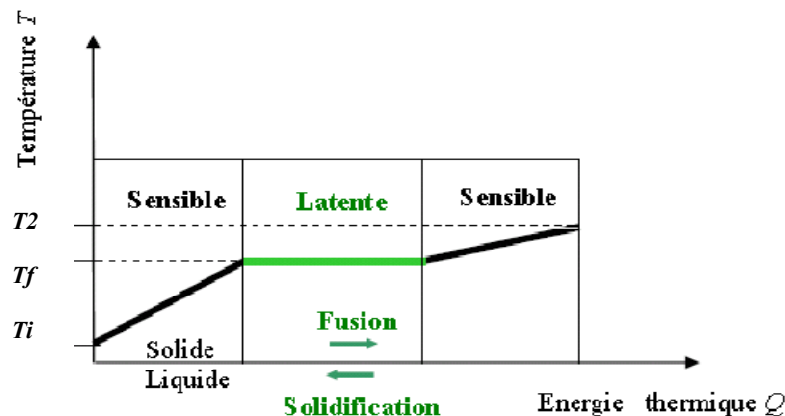


Figure II.2 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

[26]

**II.4.3.1. Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente : [26]**

Le stockage par chaleur latente utilise l'enthalpie de changement d'état pendant la fusion ou la solidification du milieu utilisé, mais il peut utiliser également la chaleur sensible nécessaire pour chauffer le solide jusqu'à son point de fusion. Il faut donc :

- Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement.
- Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié.
- Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

**II.4.3.2. Les avantages du stockage par chaleur latente : [26]**

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

- Les MCP peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage à chaleur sensible.
- Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que la température de l'environnement.

**II.5. les matériaux à changement de phase : [30]**

Les matériaux à changement de phase MCP (ou PCM : Phase Change Matériel) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, la chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide et vice versa. Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et la restituent lorsque la température diminue. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande, plus les propriétés de stockage (et de restitution) de la chaleur seront intéressantes.

**II.6. Le choix du matériau à changement de phase : [26]**

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C). Cependant ils ne peuvent être utilisés comme matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques, chimiques et économique. Ces critères vont donc être définis pour faciliter le bon choix de MCP pour une application donnée :

**II.6.1. Critères thermodynamiques :**

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée

- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur).
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative.
- Une fusion congruente.
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.
- Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.
- Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

#### II.6.2. Critères cinétiques :

- Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion.
- Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.
- Des cinétiques de charge et de décharge rapides.

#### II.6.3. Critères chimiques :

Le matériau à changement de phase doit montrer :

- Une stabilité chimique.
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit viable.
- Aucune corrosion avec les matériaux de constructions.
- Un bon taux de cristallisation.

Aussi le matériau ne doit pas être empoisonnant ; il doit être non inflammable et non explosif.

#### II.6.4. Critères économiques :

Le matériau à changement de phase doit être :

- Disponible en grande quantité.
- A bon marché.

A priori aucun matériau à changement de phase ne peut satisfaire tous ces critères. Beaucoup de matériaux ont été étudiés comme de potentiels matériaux à changement de phase, mais peu d'entre eux sont commercialisés. Les matériaux à changement de phase se classent en trois grandes familles : ORGANIQUE, INORGANIQUE et ETEUCTIQUE.

#### II.7. Classification des matériaux à changement de phase :

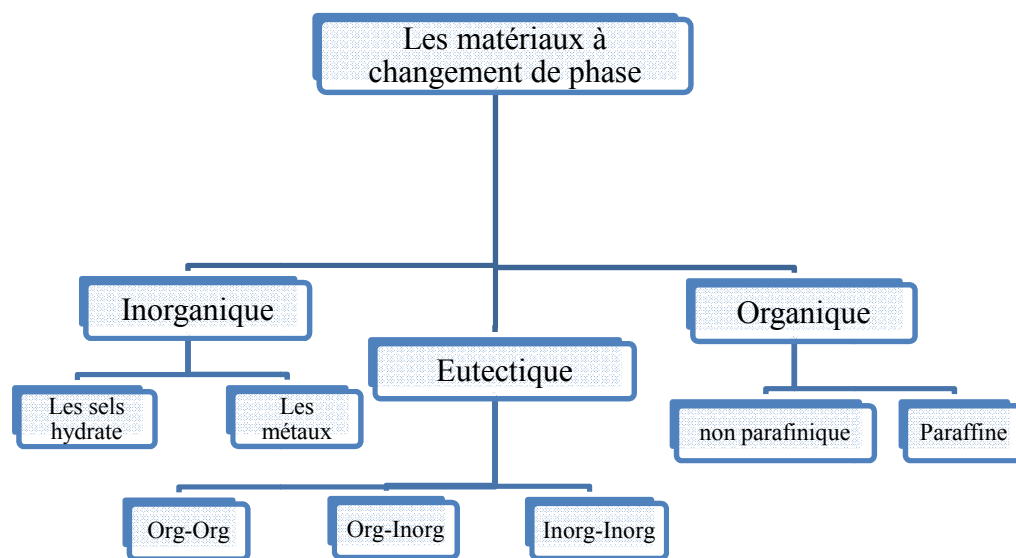
Il y a grand nombre de substance chimiques qui peuvent être identifiés comme MCP du point de vue de leur température de fusion et de leur chaleur latente de fusion.

Cependant, excepté le point de fusion se situant dans la plage de température de fonctionnement souhaitée, une majorité de ces substances ne répondent pas aux autres critères exigés pour servir de supports appropriés à un stockage de chaleur.

En effets, aucun matériau ne peut avoir intrinsèquement toutes les propriétés requises pour un support de stockage thermiques idéal. Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriés adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié.

On peut classer les MCP selon leur nature chimique en trois grandes catégories :

- -Les composés organiques : Paraffines, corps non-paraffiniques, Polyalcools.
- -Les composés inorganiques : Hydrates salins, sels, métaux, alliages.
- -Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.



*Figure II.3* : Classification de MCP. [31]

### II.7.1. Les composés organiques : [29]

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

Ils sont soit extraits à partir du pétrole brut, soit synthétisés par un procédé chimique où intervient la catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure.

Les paraffines sont essentiellement constituées d'hydrocarbures saturés à chaîne linéaire ou parfois ramifiée avec un groupement méthyle substitué en bout de chaîne. Les paraffines pures uniquement constituées d'alcane peuvent être caractérisées par leur point de fusion.

Cependant les paraffines existent généralement sous forme de mélange, si bien qu'il n'est pas possible de parler de point de fusion mais plutôt d'une zone de fusion.

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



Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de {cires paraffiniques}.

Le point de fusion des alcanes augmente avec le nombre croissant d'atomes de carbone. Mises à part certaines caractéristiques favorables des paraffines, telles que la fusion congruente et de bonne propriétés de nucléation elles montrent cependant certaines propriétés indésirables tels que :

- -Faible conductivité thermique.
- -Sont incompatibles avec les récipients en plastiques.
- -Sont modérément inflammables.

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

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphite expansé (Sari, 2004. [32];Zhang et Fang, 2006. [33]) MEHLING et al. (2000) [34]ont signalé que le matériau composite MCP-graphite a une conductivité thermique 100 fois élevée que la paraffine pure.

Certaines paraffines sélectionnées sont indiquées dans le tableau II.6 avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

**Tableau II.6 :** Propriétés thermo physiques des paraffines. [35]

Nombre d'atomes carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (KJ/Kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.3	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

**II.7.1.1.-Avantages et inconvénients des paraffines [26]:**

- -L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 KJ/Kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2.1 KJ/Kg. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.
- -La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- -Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- -Il n'y a pas de ségrégation de phase.
- -Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque tous les matériaux (sauf certaine plastique ou le cuivre). Il y a donc peu de problème de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En effet, les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).
- -Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non-toxiques et 100% recyclables.
- -Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire.
- - La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 Kg/m<sup>3</sup>, et celle de la phase solide est de 800 à 900 Kg/m<sup>3</sup>. La dilatation volumique est donc environ 15% pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- -Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

**Les deux principaux inconvénients sont les suivants :**

- -Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0.18-0.25 W/m k), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.
- -Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

**II.7.1.2- Différentes cires paraffiniques : [31]**

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

- ***n-octadecane (C18H38)*** : Cette cire fond à T=28°C et a une chaleur de fusion 244KJ/Kg.
- ***n-eicosane (C20H42)*** : Sa fusion est congruente à T=36.7°C, la chaleur de fusion est de 247 KJ/Kg.

Le n-eicosane et le n-octadécane 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. Pures, ces composés sont très chers.

- **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 KJ/Kg et sa solidification se produit à T=45-48°C. En forme des capsules sphériques, elle a subi 2600 cycles thermiques sans se détériorer.

Le tableau II.7 permet d'apprécier les variations des propriétés physiques de quelques paraffines en fonction de leur masse moléculaire.

**Tableau II.7:** Exemples de propriétés physiques de paraffines. [29]

Formule	Paraffines			
	Tétradécane C14H30	Héxadécane C16H34	Octadécane C18H38	Eicosane C20H42
Température de fusion [°C]	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion [KJ/Kg]	226	237	244	247
Conductivité thermique [W/ m. °C]	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique massique [KJ/Kg °C]	2.07	2.11	2.16	2.21
Masse volumique solide [Kg/m <sup>3</sup> ]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [Kg/m <sup>3</sup> ]	771	776	774	778
Retard a la solidification [°C]	aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133 à 75°C	133 à 105°C	133 à 75°C	133 à 100°C
Tension superficielle [N/m]	27.4 10 <sup>-3</sup>	3.4	27.4 10 <sup>-3</sup>	-
Viscosité [Cp]	2.1	-	3.4	-

### II.7.1.3- Conditionnement des paraffines : [29]

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

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

- Les nodules,
- Les cylindriques avec ailettes ou non,
- La micro-encapsulation

**II.7.1.4- Les composés organiques non-paraffiniques :**

Les composés organiques non-paraffiniques incluent plusieurs matériaux organiques comme les acides gras, les esters, les alcools et les glycols.

**II.7.1.4.1- Acides gras :** [36]

Les acides gras sont des matériaux ayant pour origine les huiles végétales ou animales. Les acides gras ont la formule chimique générale suivante :  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ . Comme il est facile de les imprégner ou de les incorporer dans les structures conventionnelles, ils sont considérés comme bon candidats pour les applications concernant la structure de bâtiment.

Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage thermique à basse température sont représentés avec leurs propriétés thermophysiques dans le tableau II.8. [35] Les acides gras ont de fortes chaleurs de fusion comparables à celles des paraffines. Les acides gras montrent également un processus de fusion/cristallisation réversible avec aucune surfusion. [37]

**Tableau II.8 :** Propriétés thermophysiques des acides gras. [35]

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente (KJ/Kg)
Acide acétique	$\text{CH}_3\text{COOH}$	16.7	184
Polyéthylène glycol 600	$\text{H}(\text{OC}_2\text{H}_2)_n\text{-OH}$	20-25	146
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

**II.7.1.4.2- Les esters d'acides gras :** [36] ; [31]

Ces matériaux sont produits par une estérification directe des acides gras séparés des huiles végétales.

Les esters d'acides gras comme le stéarate du butyle, le stéarate de vinyle et le méthyl-12 hydroxystéarate peuvent être utilisés pour le stockage passif de la chaleur. Le palmitate d'isopropyle ainsi que l'isopropyle stéarate peuvent être utilisés dans les pays chauds comme matériaux de stockage.

Les esters d'acides gras dans leur phase liquide ont une tension surfacique et ils ont une grande chaleur latente et une grande chaleur spécifique pour absorber la chaleur sensible. Le changement de volume est négligeable. Ils sont stable chimiquement, non corrosifs et non toxiques.

Ils ont d'excellentes caractéristiques de fusion/solidification sans sous-refroidissement. Ce dernier point leur donne un avantage important en tant que MCP. Leurs points de fusion les rendent aptes aux applications de chauffage.

**Tableau II.9 :** Propriétés thermophysiques des matières organiques non-paraffiniques. [35]

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

**II.7-2. Inorganique :** [29]

Les MCP inorganiques (sels hydratés, sels, métaux, alliages.) ont une chaleur latente volumétrique importante, la conductivité thermique est importante, ils sont non-inflammable, facilement disponible et peu cher. En revanche, le phénomène surfusion est important.

**II.7.2.1. Les sels hydratés :**

Ce sont des composés obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau en principe parfaitement définie. Un des plus connus est celui obtenu par mélange de chlorure de sodium et d'eau et qui forme l'hydrate  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ils représentent un groupe important de MCP et sans doute le plus étudié. [26]

Ils ont les caractéristiques suivantes : [29]

- Une grande chaleur de fusion par unité de volume,

- Une grande conductivité thermique (environ le double de celle des paraffines organique),
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase,
- Une bonne compatibilité avec le plastique,
- Une certaine toxicité,
- Une certaine corrosivité,
- Trois comportements lors de la fusion : congruente, semi-congruente, non-congruente.
- Un cout variable.

Pour ce dernier point, une règle générale est que les hydrates à fusion congruente qui ont une grande chaleur de fusion et des points de fusion convenant aux applications du stockage thermique ont des couts élevés contrairement aux hydrates à fusion non-congruente.

Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont : [31]

1. **La surfusion (ou sous-refroidissement)** : On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.
2. **La ségrégation de phase** : Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants ou de dispositifs de stockages tournants. Comme agent épaississants ont utilisé de la cellulose, de la fécule, de la sciure, de gel de silice, de la silice, etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces.
3. **La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique.** Ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche.
4. **Leur caractère corrosif**, ce qui les rend incompatibles avec de nombreux matériaux utilisés.

Ce problème a reçu un débit de solution en encapsulation les MCP dans des capsules métalliques ou de matières plastiques. On distingue la macro-encapsulation et la micro-encapsulation.

La macroencapsulé de MCP :

- Evitent une séparation de phase trop importante,
- Améliorent le transfert de la chaleur,
- Fournissent une structure autoporteuse pour les MCP.

### II.7.2.2. Différents hydrates salins :

Les quelques exemples d'hydrates salins donnés dans ce paragraphe sont la plupart tirés de l'article [31].

**a. Sulfate de sodium déca hydrate (sel de Glauber  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) :**

Cet hydrate n'est pas cher et facile à obtenir. La fusion de la phase solide stable est non congruente à  $T=32,4^\circ\text{C}$ . Ce point de fusion permet de l'utiliser dans de nombreuses applications. Il possède une grande chaleur de fusion  $\Delta h=252\text{ KJ/Kg}$ . Par comparaison, pour une même quantité d'énergie stockée, il nécessite un volume égal à 1/3 de celui de la pierre et 2/5 de celui de l'eau.

Parmi ses inconvénients, on peut citer son caractère très corrosif vis-à-vis de nombreux matériaux de structure et sa faible conductivité thermique qui posent le problème du conditionnement. D'autre part, il subit un sous-refroidissement d'environ  $15-30^\circ\text{C}$  en dessous de sa température théorique de changement d'état. Pour y remédier, on rajoute du tétra borate de sodium déca hydrate ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) pour provoquer le changement de phase à sa température théorique.

A la température de fusion du sel de Glauber, 15% du sulfate de sodium reste sous une forme de sel anhydre insoluble. Etant deux fois plus dense que la solution saturée la partie anhydre décanté et ne participera pas à la recristallisation sous forme de composé défini lorsque la chaleur sera retirée.

Pour prévenir cet effet, un agent d'épaississement est utilisé pour garder l'hydrate en suspension jusqu'à ce qu'il puisse se reformer avec sa structure cristalline de composé défini quand la chaleur est enlevée.

**b. Chlorure de calcium de hexa hydrate ( $\text{Ca Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) :**

Le chlorure de calcium hexa hydrate ( $\text{Ca Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) a souvent été considéré pour le chauffage solaire passif. Son point de fusion est de l'ordre de  $27-29,7^\circ\text{C}$  et sa chaleur de fusion est  $170\text{ KJ/kg}$  son principale inconvénient est la formation de chlorure de calcium tétra hydrate ( $\text{Ca Cl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ). L'hexa hydrate a une fusion non- congruente que l'on peut rendre congruente en ajoutant du  $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

**c. Acétate de sodium tri hydrate ( $\text{Na CH}_3\text{ COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) :**

La fusion de cet hydrate est à  $T=58^\circ\text{C}$  et la chaleur de fusion est  $170$  à  $264\text{ KJ/Kg}$ . Il est adapté au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude.

**d. Hydroxyde de Baryum octa hydrate ( $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) :**

Il a une fusion congruente à  $T=78^\circ\text{C}$  avec une grande chaleur latente de  $301\text{KJ/Kg}$ , mais il est fortement alcalin et toxique. Il absorbe le  $\text{CO}_2$  de l'air et devient donc insoluble dans l'eau. Il réagit fortement avec l'aluminium.

En laboratoire, la cristallisation se produit en blocs compacts mais quand on ajoute de l'eau supplémentaire (plus 6% en poids) la cristallisation se produit en petits cristaux.

**e. Chlorure de Magnésium hexa hydrate ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) et Nitrate de Magnésium hexa hydrate ( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) :**

Ces deux sels, avec additifs pour éviter la surfusion ont été testés après encapsulation. Les tests ont montré que ces capsules étaient détruites après quelques centaines de cycles thermiques. Des boîtes en acier doux un enduit sont recommandées pour leur

conditionnement. Leur utilisation est adaptée au côté chaud d'un système de climatisation à absorption de vapeur.

Sur le tableau suivant [Tableau II.10] on donne un récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques.

*Tableau II.10* : Différents hydrate salins. [31]

Hydrates salins	Température de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
Sel de Glauber ( $\text{Na}_2 \text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ )	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate ( $\text{Ca Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate ( $\text{Na CH}_3 \text{COOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )	58	170 à 264
Hydroxyde de Bariumocta hydrate ( $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )	78	301
$\text{NH}_4 \cdot \text{Al} (\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$	95	238.5
Phosphate de sodium dodécahydrate ( $\text{Na}_3 \cdot \text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules (Calotherm 70)	70	184
Carbonate de sodium déca hydrate ( $\text{Na}_2 \text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40-43	140

### II.7.3.Eutectique : [29]

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.

Sur le tableau II.11, on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.



Tableau II.11 : Liste de quelques Eutectiques. [38]

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [KJ/Kg]
49.3% Mg Cl. 6H2O + 50.7 % Mg (NO3). 6H2O	58	132.3
61.5% Mg (NO3). 6H2O+ 38.5% NH4 NO3	51	131.1
58.3% Mg (NO3) 6H2O+ 41.7% Mg Cl2. 6H2O	58	106
Ca Cl2. 6H2O+ CaBr2.H2O	14	140
Eutectiques organiques		
Acide Caprique-Laurique	18	120
Acide Palmitique-Laurique	33	145
Acide Stéarique Laurique	34	150

## II.8-Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique :

Rappelons quelques principes pour le conditionnement des MCP :

- Le matériau du réservoir de stockage doit être compatible avec le MCP.
- Quand le MCP devient liquide, le liquide ayant une faible viscosité le taux de fluide est fortement augmenté et le réservoir de stockage doit assurer l'étanchéité.
- Le changement de phase produit un changement de volume ; ce changement peut casser le conteneur si ce conteneur ne peut pas absorber le changement de volume.

Il existe de nombreuses techniques pour conditionner le MCP : [37] ;[39]

### a) Les macro-capsules : [39]

Les conteneurs peuvent être constitués de sacs, bouteilles de plastiques, de capsules de différentes formes géométriques et dimensions etc.

Il existe des procédés industriels qui utilisent le conditionnement dans des sphères de matière plastique ou nodules. Ces nodules sont manufacturés dans trois diamètre (77-78 et 98mm) pour des usages respectivement aux faibles températures de changement d'état (-3 à -15°C), aux températures intermédiaires (-3 à 15°C) et à la température de stockage de la glace (0°C). Certains nodules spéciaux ont des températures de changement s'état de 27°C et plus.

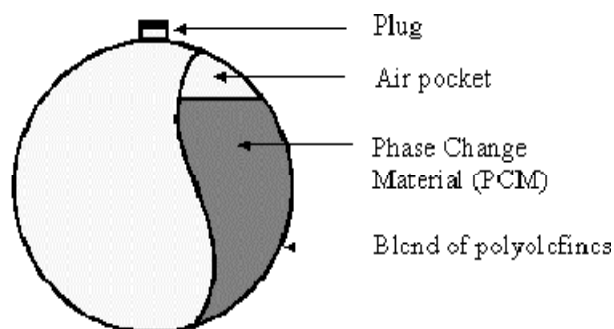
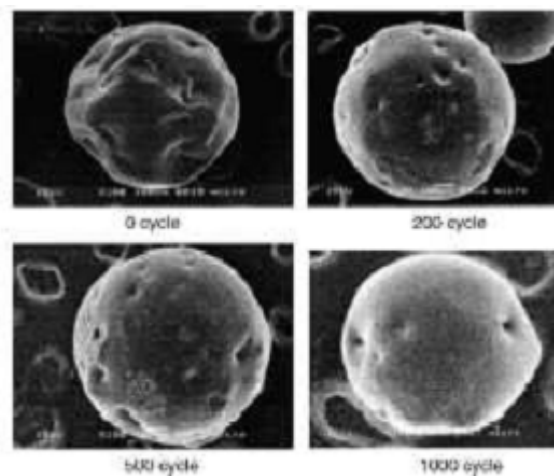


Figure II.4: Conditionnement de MCP en nodules. [39]

**b) La micro-encapsule :**

La micro-encapsulation est un procédé physique ou chimique qui permet l'emprisonner de petites gouttes solides ou liquides dans une coquille solide de 1 à 1000 $\mu\text{m}$  de diamètre. Les procédés physiques sont le séchage de sprays, la centrifugation ou l'utilisation de lits fluidisés ou des procédés de revêtement divers. Les procédés chimiques consistent en des encapsulations in-situ comme les polycondensations interfaciales qui conduisent à des polyamides ou des polyuréthanes comme coquilles, des précipitations dues à la polycondensation de résines aminées etc...

Hawlander et al.[40]ont développé des expériences et des simulations pour éviter les caractéristiques et les performances de paraffines encapsulées dans un agent liant (HCHO) en termes de ration d'encapsulation (rapport cœur sur revêtement) et de capacité de stockage énergétique. Ils sont également effectués des tests de cyclage thermique et ont montré que les capsules gardaient leur profil géométrique et leur capacité de stockage après 1000 cycles.



*Figure II.5* : Vue au MEB de microcapsules renfermant des paraffines. [40]

**c) Des briquettes de polyéthylène à haute densité (PEHD) :**

Des briquettes de polyéthylène à haute densité est un hydrocarbure alkyle de haut poids moléculaire avec une température de fusion et de solidification de 125 à 135°C.

Ce dernier correspond à un stockage thermique latent de 190 à 210 KJ/Kg. Le PEHD est alors irradié pour éviter l'écoulement lorsqu'il est sous forme liquide. Ces briquettes des caractéristiques de stockage au moins 1000 cycles thermiques sans changement des caractéristiques de stockage thermique. Des plaques, des barres, des tubes et d'autres formes géométriques de polyéthylène peuvent être obtenues suivant leur usage.

**d) Des briquettes de polyéthylène de haute densité réticulé :**

Peuvent être imprégnées avec un MCP de température de fusion plus faible. La température de fusion et le stockage thermique ne varient pas après répétition de nombreux cycles thermiques. Ces briquettes imprégnées peuvent être incorporées dans les matériaux de construction (plâtre et béton) en les ajoutant au mélange humide du processus.

**e) Un Substrat poreux :**

Comme le plâtre, le béton et la mousse, absorbant un MCP liquide hydrocarbure alkyl. Le processus d'absorption peut être effectué en 10 minutes, la durée d'absorption contrôlant la quantité de MCP absorbée.

Les hydrocarbures alkyl d'une chaîne de carbone plus ou moins longue peuvent être absorbés par le plâtre et le béton.

D'autres MCP comme les acides gras et les esters peuvent aussi être absorbés par les matériaux poreux.

**f) Le stockage de MCP par absorption ou adsorption dans des poudres sèches de silice :**

C'est la méthode la plus récente et la plus universelle pour conditionner les MCP. La silice peut mécaniquement se mélanger avec les MCP. Les hydrocarbures, l'eau et les autres MCP peuvent être absorbés et adsorbés dans la silice finement divisée.

**II.9. Conclusion :**

Le principe du stockage de la chaleur repose sur trois voies : la chaleur latente, la chaleur sensible et la réaction chimique. Le choix étant en fonction des besoins économiques et techniques ainsi que de la durée du stockage désirée. 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.

## Chapitre III : Modélisation

### III.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré pour concevoir bien les échanges thermiques qui se déroulent dans les différents composants de système de stockage mixte (fluide, paraffine, paroi latérale).

### III.2. Schéma de principe :

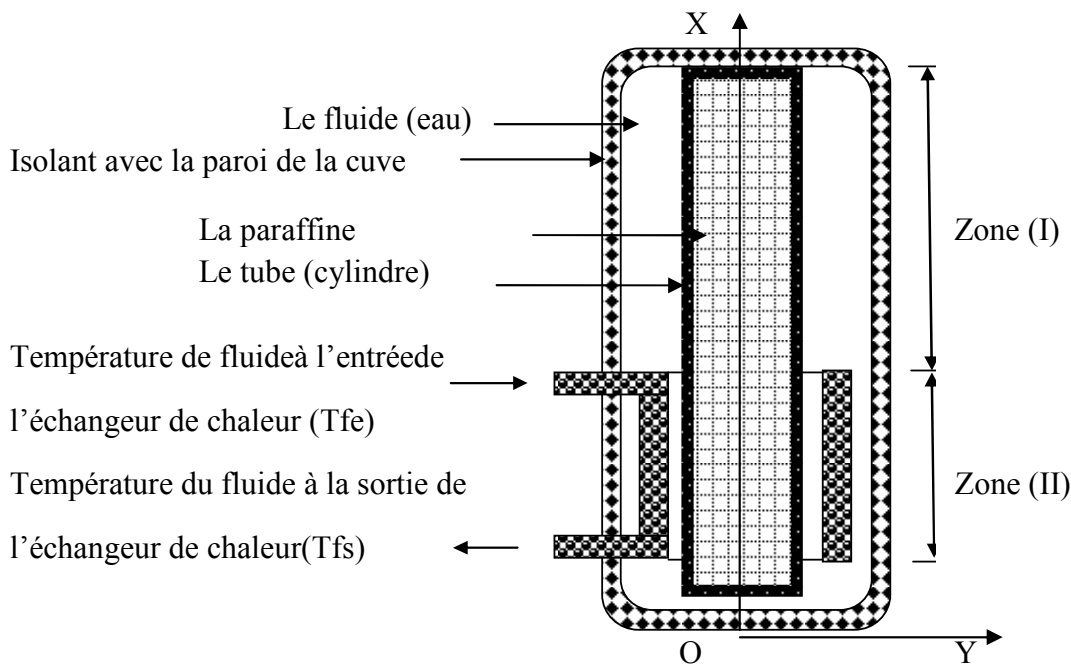


Figure III.1: Schéma de principe du dispositif.

### III.3. Hypothèses :

Les hypothèses simplificatrices sont posées comme suivant :

- La pression de la cuve reste égale à la pression atmosphérique.
- Le flux de chaleur imposé à la cuve est constant.
- Quelle que soit l'évolution de la température de stockage dans la zone de l'échangeur, le coefficient d'échange est supposé constant sur toute la longueur de l'échangeur.
- L'échangeur est divisé en segments égaux, la température du fluide à l'intérieur de l'échangeur de chaleur supposée uniforme.
- Les deux parois supérieure et inférieure sont adiabatiques.
- Le mode de transfert dans la cuve c'est par conduction.
- La conduction est monodimensionnelle suivant  $y$  pour le MCP et suivant  $x$  pour le fluide (eau).
- L'expansion de MCP est négligeable et le changement de phase est isotherme.

### III.4. Formulation des équations régissant les échanges thermique dans la cuve :

Le bilan thermique qui décrit les échanges thermiques entre les deux composantes de système de stockage mixte (fluide, paraffine) est donné par l'équation suivante :

$$\Delta U_{pr} = \Delta U_F \quad (III.1)$$

Tel que :  $\Delta U_{pr}$  : c'est la variation de l'énergie interne stockée dans paraffine.

$\Delta U_F$  : c'est la variation de l'énergie interne stockée au fluide (eau).

#### III.4.1. Bilan thermique de la paraffine :

L'équation de l'énergie dans la paraffine en termes d'enthalpie totale s'écrit :

$$\Delta U_{pr} = \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \lambda_{pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (III.2)$$

Où l'enthalpie totale  $H(T)$  peut être décomposée comme la somme de l'énergie sensible ou chaleur sensible  $h(T)$  et de chaleur latente.

$$H(T) = h(T) + \rho_{pr} L_f f \quad (III.3)$$

Dans cette expression, le terme  $f$  désigné la fraction liquide locale. Lorsque le changement de phase se déroule à température constante  $T = T_f$  la fraction liquide est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} f &= 0 & \text{si } T < T_f \\ 0 < f < 1 & \text{si } T = T_f \\ f &= 1 & \text{si } T > T_f \end{aligned} \quad (III.4)$$

Tel que :  $T_f$  = Température de fusion du produit [k].

L'équation (III.1) peut alors s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \lambda_{pr} \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \rho_{pr} L_f \frac{\partial f}{\partial t} \quad (III.5)$$

La connaissance de l'enthalpie  $h$  permet de déduire à priori la température.

$$h = \int_{T_0}^{T_f} \rho_{pr} C_{pr} dT \quad (III.6)$$

Tel que :  $T_0$  = Température initial de produit [k].

Ainsi on obtient la relation

$$\rho_{pr} C_{pr} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \lambda_{pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \rho_{pr} L_f \frac{\partial f}{\partial t} \quad (III.7)$$

#### III.4.1.1. Les conditions initiales et aux limites :

$$T(y, t=0) = T_0 \quad (III.8)$$

$$\text{Type adiabatique à } X=0 \quad \frac{\partial T_{pr}}{\partial x} = 0 \quad (III.9)$$

$$\text{On effectue le bilan correspondant à } X=H. \quad (III.10)$$

#### III.4.2. Le bilan thermique de fluide (eau) :

Pour le fluide (eau) on peut le décomposé en deux zones la première où il y a l'échangeur de chaleur et la deuxième sans échangeur de chaleur.

##### A. La zone (I) sans échangeur de chaleur :

Le bilan thermique est établi sur un élément de volume, de section ( $A_{pr}$ ) et d'épaisseur ( $\Delta x$ ) de la paraffine.

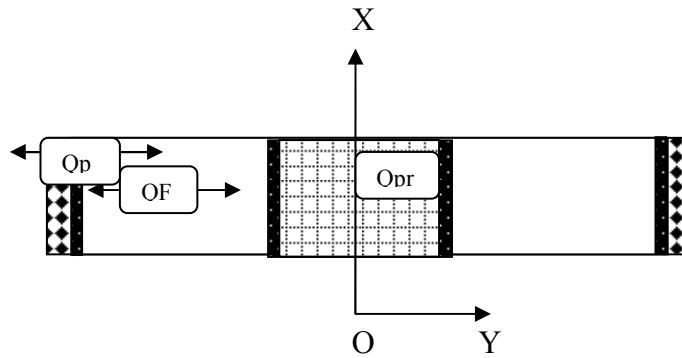


Figure III.2 : Une coupe de la zone (I).

A l'intérieur de la tranche correspondant, le bilan thermique global de fluide s'écrit :

$$\Delta U_F = Q_F - Q_p \tag{III.11}$$

Tel que  $\Delta U_F$  : c'est la variation de l'énergie interne stockée au fluide (eau).

$Q_F$  : Le flux conductif à travers le fluide (eau)

$$Q_F = Q_{Fx} + Q_{Fx+dx} = \lambda_F A_F \left( dx \frac{\partial^2 T_F}{\partial x^2} \right) \tag{III.12}$$

$Q_p$ : Le flux thermique des échanges de chaleur par convection sur la paroi latérale

$$Q_p = h A_l (T_F - T_p) \tag{III.13}$$

Donc de bilan soit :

$$\Delta U_F = Q_F - Q_p = Q_{Fx} + Q_{Fx+dx} - Q_p = \lambda_F A_F \left( dx \frac{\partial^2 T_F}{\partial x^2} \right) - h A_l (T_F - T_p) \tag{III.14}$$

**B. La zone (II) avec échangeur de chaleur :**

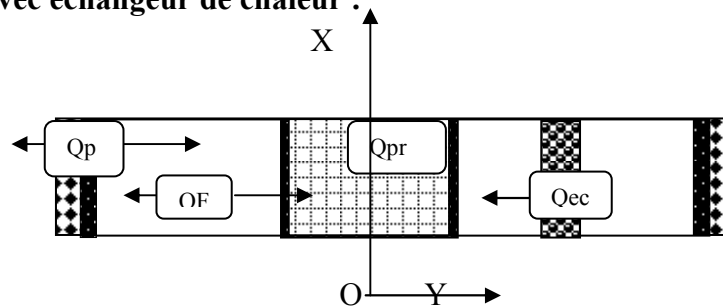


Figure III.3 : Une coupe de la zone (II).

Le bilan thermique dans cette zone soit :

$$\Delta U_F = Q_F - Q_p + Q_{ec} \tag{III.15}$$

Tel que :

$$Q_{ec} = U_{ec} A_{ec} (T_{ec} - T_F) \tag{III.16}$$

Avec  $Q_{ec}$  : Puissance fournie par l'échangeur de chaleur à travers le fluide.

### C. Bilan thermique dans la paroi latérale :

On écrit le bilan thermique pour l'élément de volume de section ( $A_p$ ) et d'épaisseur  $\Delta x$  en faisant d'autres hypothèses à savoir :

- La température est uniforme à l'intérieur de la tranche de la paroi d'épaisseur  $\Delta x$ .
- Le flux de chaleur à travers l'isolant, selon l'axe de la cuve est nul.

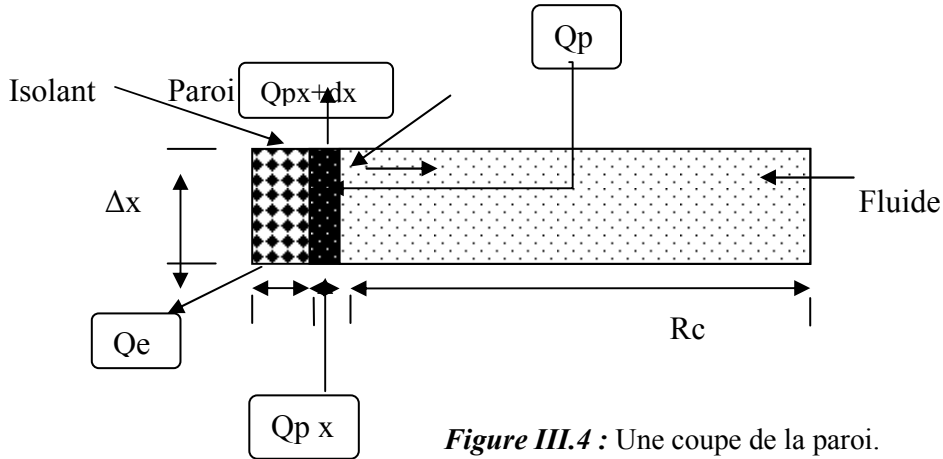


Figure III.4 : Une coupe de la paroi.

Le bilan thermique de la paroi latérale dans les zones I et II :

$$\Delta U_p = Q_{cdp} + Q_p + Q_e \quad (\text{III.17})$$

Tel que :

La variation de l'énergie interne de la paroi :

$$\Delta U_p = M_p C_{pp} \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad (\text{III.18})$$

Le flux conductif à travers de la paroi :

$$Q_{cdp} = Q_{px} + Q_{px+\Delta x} = \lambda_p A_p \left( dx \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \right) \quad (\text{III.19})$$

Les échanges par convection le long de la paroi à l'intérieur de la cuve :

$$Q_p = h A_l (T_F - T_p) \quad (\text{III.20})$$

Les pertes vers l'extérieur :

$$Q_e = k_{eq} A_l (T_p - T_e) \quad (\text{III.21})$$

Le bilan thermique au niveau de la paroi dans les zones I et II :

$$M_p C_{pp} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \lambda_p A_p \left( dx \frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} \right) + h A_l (T_F - T_p) - k_{eq} A_l (T_p - T_e) \quad (\text{III.22})$$

Où

$$K_{eq} = \left( \frac{1}{2\pi L_c \lambda_c} \ln \left( \frac{R_c + e_a}{R_c} \right) + \frac{1}{2\pi L_c \lambda_{is}} \ln \left( \frac{R_c + e_a + e_{is}}{R_c + e_a} \right) + \frac{1}{2\pi R_c L_c h} \right)^{-1} \quad (\text{III.23})$$

$K_{eq}$  : Le coefficient de convectivité équivalent [ $W/m^2k$ ].

**III.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bilans thermiques qui décrivent les phénomènes des échanges thermiques qui se déroulent dans chaque élément de système de stockage.



## Chapitre IV

### Etude expérimental du model

#### IV.1. Introduction

Pour étudier expérimentalement et analyser les transferts de chaleur dans un système de stockage de chaleur mixte (chaleur sensible et latente), nous avons réalisé un dispositif au département de génie mécanique qui est un système de stockage thermique et nous avons adopté les équipements suivant :

- Choisir un MCP pour un stockage thermique latent à basse température.
- Choisir un conditionnement pour le MCP pour être incorporé dans la cuve de stockage.
- Le fluide stockeur par chaleur sensible.
- Définir les dimensions appropriées au module de stockage thermique.
- Choisir une configuration appropriée d'un échangeur de chaleur pour le stockage de chaleur et pour le déstockage.
- Instrumenter l'élément de stockage du nombre adéquat de thermocouple afin de permettre une étude partielle des phénomènes de transfert thermique et d'évaluation des quantités de chaleur stockée et libérée, et un débit mètre pour mesurer le débit massique d'eau chaud.
- Une isolation thermique efficace du système de sorte que les pertes bien qu'elles existent puissent être considéré comme négligeables.

#### IV.2. Les équipements de module expérimental :

##### IV.2.1. Le choix de MCP :

Le choix du MCP pour le stockage de chaleur à basse température dépend en premier lieu de l'application à laquelle est destiné le système de stockage et essentiellement de sa température de fonctionnement et de la stabilité du MCP au cycle de stockage et déstockage.

Pour notre étude il est prévu initialement de recourir au choix de la paraffine dont l'utilisation dans de multiples travaux de recherche et thèses concernant des systèmes de stockage.

Cependant, pour la réalisation de la partie expérimentale de notre étude il ne nous a pas été possible de se procurer cette paraffine étant disponible sur le marché national.

*Tableau 5.1* : Les propriétés thermophysiques de MCP choisi.[29]

Paraffine	Eicosane
<b>Formule</b>	<b>C20H42</b>
<b>Température de fusion [°C]</b>	<b>36.7</b>
<b>Enthalpie de fusion [KJ/Kg]</b>	<b>247</b>
<b>Conductivité thermique [W/ m. °C]</b>	<b>0.15</b>
<b>Capacité thermique massique [KJ/Kg °C]</b>	<b>2.21</b>
<b>Masse volumique solide [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>856</b>
<b>Masse volumique liquide [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>778</b>
<b>Retard à la solidification [°C]</b>	<b>Aucun</b>
<b>Pression de vapeur [Pa]</b>	<b>133 à 100°C</b>
<b>Tension superficielle [N/m]</b>	-
<b>Viscosité [Cp]</b>	-

*Figure IV.1* : La paraffine.

#### IV.2.2. Conditionnement du MCP

Pour le conditionnement du MCP en vue de son incorporation dans la cuve, nous avons fait le choix d'utiliser un tube cylindrique. Le cylindre a les caractéristiques suivantes :

- **Diamètre** : 80mm
- **Hauteur** : 53cm
- **Réserve d'expansion de la paraffine** : 6cm

Et le tube supporte bien la chaleur.

*Figure IV.2* : Le cylindre utilisé.

### IV.2.3. Le fluide stockeur par chaleur sensible :

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible se fait par l'eau. Le volume maximal de réservoir de stockage est de 50 litres d'eau.

L'eau est choisie comme caloporteur, car sa chaleur spécifique moyenne est grande ( $C_p=4.18$  KJ/kg. K dans les conditions normales), et sa température de fonctionnement est bien désiré car nos systèmes de stockage fonctionne à basse température (0-100°C).

### IV.2.4. Le module de stockage thermique :

Le module de stockage est une cuve de stockage utilisé dans les systèmes de stockage thermique conçue dans la forme cylindrique de dimension donnée comme les suivants :

**Diamètre intérieur** : 36cm avec 6mm d'épaisseur

**Hauteur** : 53cm



*Figure IV.3* : La cuve de stockage.

### IV.2.5. L'échangeur de chaleur :

L'échangeur de chaleur d'une géométrie spirale en cuivre pour assure un bon transfert de l'énergie sur tout la surface d'échange, dont les dimensions sont données comme les suivants :

- **Diamètre intérieur/extérieur** : 10/12mm
- **Diamètre de la spire**: 22cm
- **Nombre de spire** : 12
- **Hauteur de l'échangeur** : 17cm

#### IV.2.6. L'isolant thermique :

L'isolant thermique utilisé c'est des feuilles d'ISOFLEX de 3.5cm d'épaisseur, pour diminuer les pertes thermiques vers de milieu extérieur.

#### IV.2.7. Mesure de température :

L'étude expérimentale est destinée à une meilleure connaissance du champ de température à l'intérieur de la cuve de stockage en cours de chauffage. Pour cela on a effectué les mesures de températures suivant :

- Dans la cuve de stockage (fluide et MCP).
- A l'entrée et à la sortie de l'échangeur et dans le bain d'alimentation de l'eau chaud.

Il existe de nombreux procédés de mesure de température. Les thermocouples comptent parmi ceux qui sont les plus souvent utilisés lors d'études effectuées dans des conditions similaires à celles que nous avons consultées.

Plusieurs impératifs sont à considérer :

La gamme de température à mesurer varie de 0 à 100°C. Pour cela nous avons choisi des thermocouples Nickel Chrome / Nickel Aluminium en raison de leur disponibilité, leur bonne sensibilité et leur temps de réponse rapide associés à une courbe de réponse quasi linéaire dans le domaine des températures envisagé.



*Figure IV.4:* Thermocouple type K.

#### IV.2.8. Mesure du débit :

Pour mesurer le débit du fluide à la sortie de l'échangeur de chaleur on a suivi une méthode artisanale à l'aide d'un chronomètre.

La méthode est basée sur le calcul du temps nécessaire pour remplir un réservoir de 0.75L.

On suppose que 1L d'eau est équivalent à 1Kg, le débit de sortie est calculer en Kg/s

### IV.2.9. Acquisition des données :

L'ensemble des capteurs de mesure sont reliés à une chaîne d'acquisition de données de marque FLUK. Cette dernière est connectée à un ordinateur dans lequel sont stockés les résultats mesurés (Photo IV.5).



*Figure IV.5 :* Chaîne d'acquisition et micro-ordinateur.

### IV.3. Montage expérimental :

Le montage expérimental du système de stockage de chaleur a été réalisé suivant les étapes :

La première étape : a consisté à couper la cuve pour faciliter le montage de l'échangeur de chaleur à l'intérieur avec un pressage de deux trous pour mettre une sortie et une entrée au échangeur de chaleur.



*Figure IV.6:* La cuve coupée.



*Figure IV.7 :* L'emplacement de l'échangeur de chaleur.

Deuxième étape : a consisté à la réalisation des supports aux thermocouples pour fixer ou faire un bon emplacement, le premier dans la cuve et le deuxième dans le cylindre qui contient la paraffine.



Figure IV.8 : Le montage de support des thermocouples dans la cuve.



Figure IV.9: Le support des TC de la cuve.

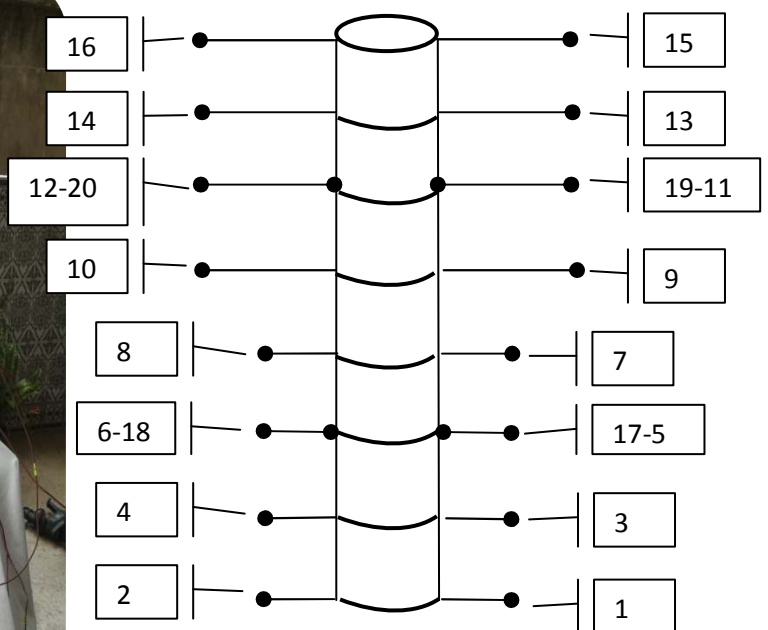


Figure IV.10 : Schéma de disposition des TC dans la cuve.



Figure IV.11 : Thermocouple collés sur une tige.

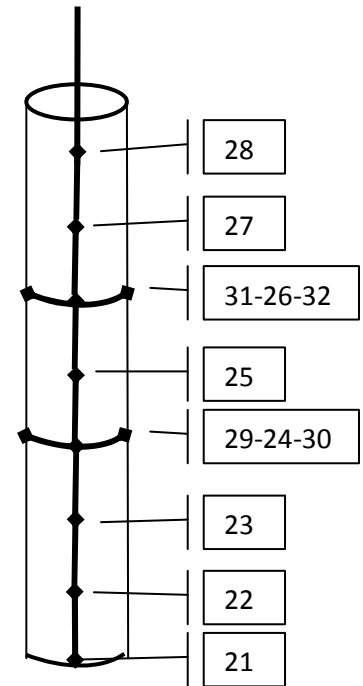
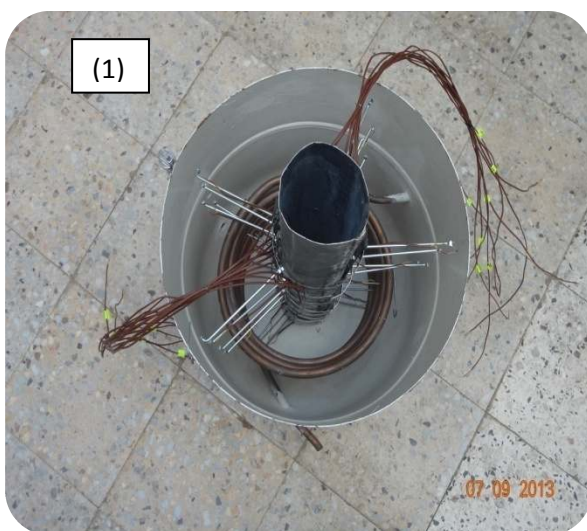
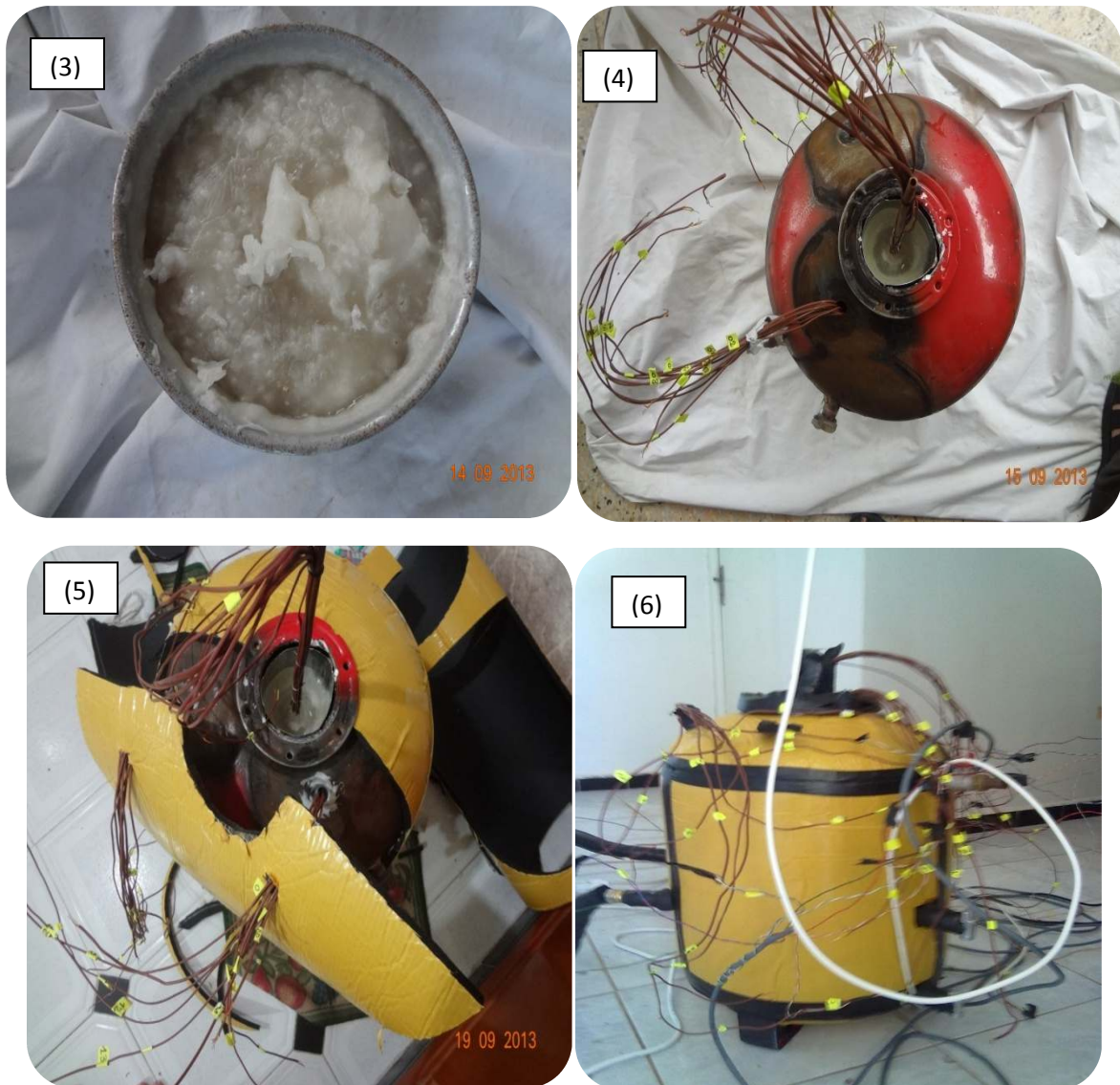


Figure IV.12 : Schéma de disposition des TC dans le MCP.

En suite la troisième étape consiste à fixer le cylindre de MCP conditionné a sa place précis (au centre de la cuve avec ces capteurs de températures), après le placement de tous les capteurs de mesure de la température et en fin fermé la cuve et la soudé les trous pour élimine les pertes et après en on a l'isolé.





**Figure IV.13:** le déroulement de la troisième étape de la conception.

La quatrième étape : a consisté à relier la sortie et l'entrée l'échangeur de chaleur de la cuve de stockage au bain thermostaté à l'aide deux tuyaux en cuivre isolé après le montage d'un circulateur pour facilite la circulation de fluide caloporteur.





*Figure IV.14* : Aperçus sur la quatrième étape du montage.

La cinquième étape : a consisté à relier à la table d'acquisition avec les thermocouples implantés dans la cuve (eau+ MCP) et les deux autres collés a l'entré et a la sortie de l'échangeur de chaleur.

Le Figure ci-dessous montre le montage réalisé :



*Figure IV.15* :Aperçue sur le montage expérimental.

**IV.4. Procédure de l'expérimentation :**

Initialement la cuve est thermiquement stable (la température constante). On injecte par un circulateur des quantités d'eau a température constante chauffée par une source électrique (résistance thermostaté) avec différents débits massique dans l'échangeur de chaleur pour le transmettre son énergie calorifique à la cuve et on laisse le système en état de la charge de l'énergie thermique et en suit juste après la charge en arrête le système pour mettre en état de relaxation (déstockage).

**IV.5. Conclusion :**

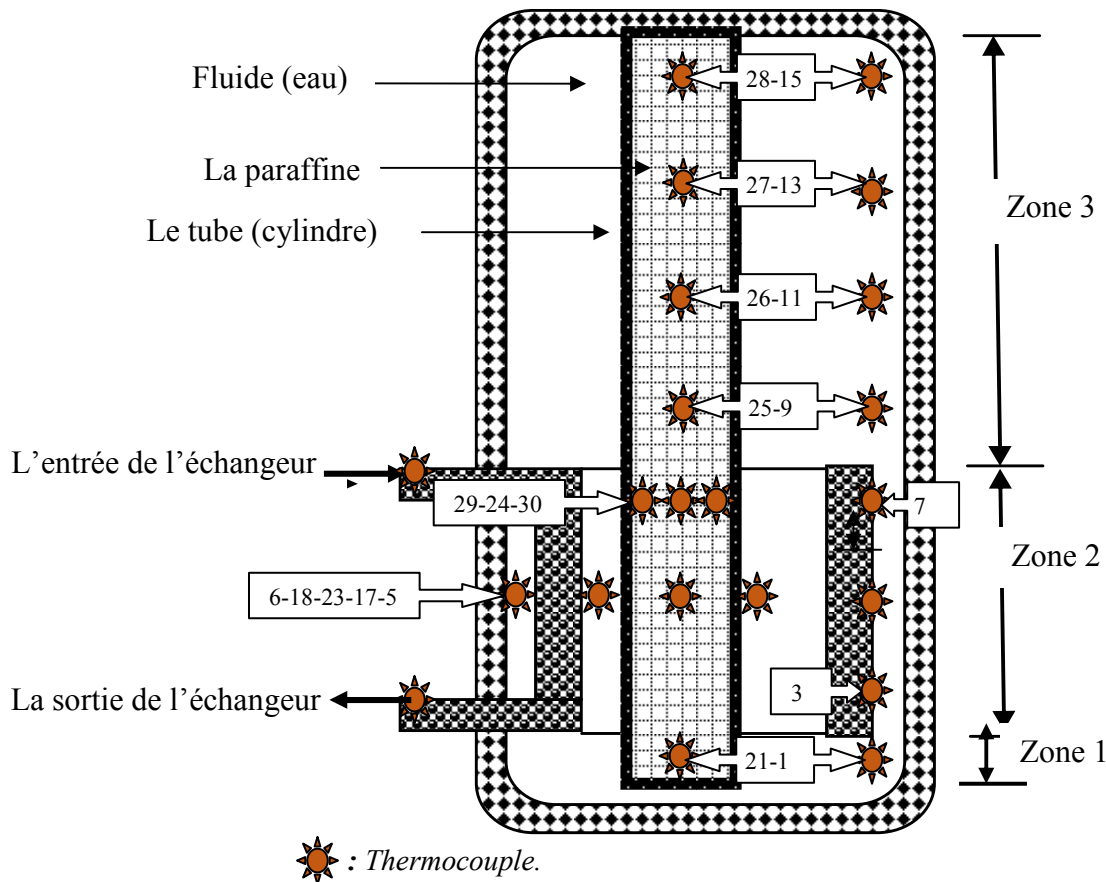
Dans ce chapitre on a décrit la conception, la réalisation et l'instrumentation de système de stockage choisi qui est d'une cuve d'une géométrie cylindrique avec une intégration de MCP ainsi l'acquisition des données. L'instrumentation permet de mesurer les températures intérieures de la cuve ainsi que les températures de fluide caloporteur a l'entrée et la sortie de l'échangeur de chaleur. L'acquisition des données est de type FLUK de 20 voies.

## Chapitre V

### Résultats et interprétation

#### V.1. Introduction :

Les résultats présents dans ce chapitre sont relatifs aux deux phases de fonctionnement : la phase de stockage et celle de relaxation. Plusieurs mesures ont été effectuées sur l'installation de stockage de l'énergie thermique. Ces mesures ont pris pour chaque 5min.

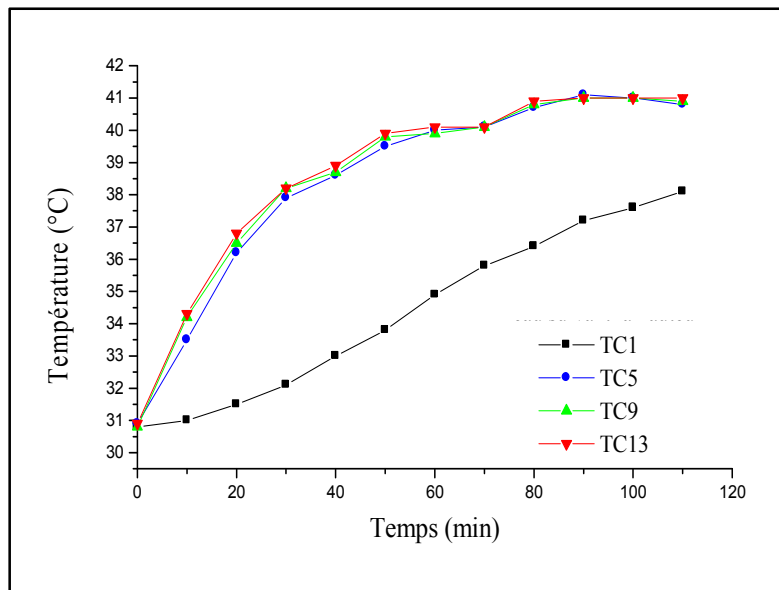


**Figure 5.1 :** La répartition des zones dans la cuve de stockage.

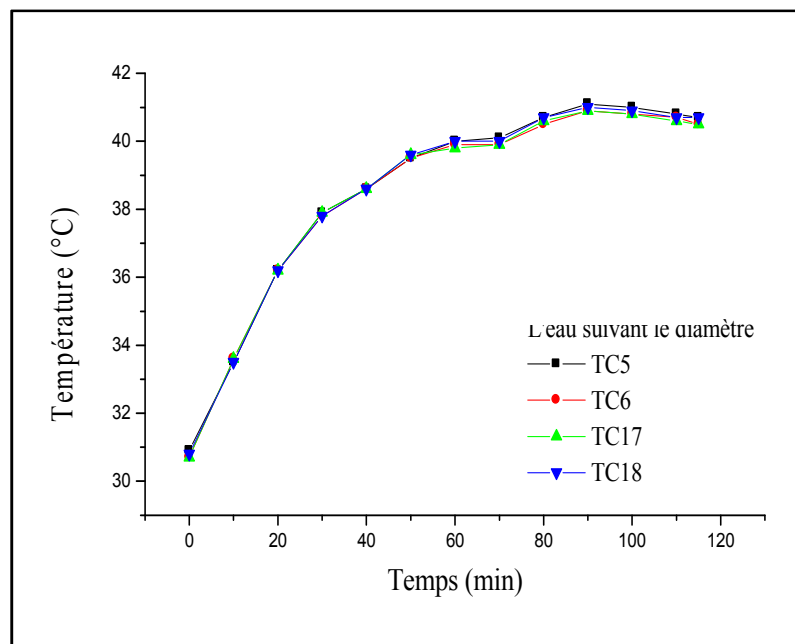
#### V.2. Validation de système :

Pour valider notre système s'il est mono ou bidimensionnel on a fait des tests de mesure des températures dans différents endroits de la cuve de stockage et on obtient ces résultats qui sont présentés dans les figures 5.2(a) et 5.2(b).

Les figures 5.2(a) et 5.2(b) représentent l'évolution de la température de l'eau en fonction de temps suivant la hauteur et le diamètre de la cuve durant le stockage. Sur les graphes, on voit nettement l'élévation de la température suivant la hauteur de la cuve. Et à partir l'évolution de la température suivant le diamètre nous remarquons également que les températures sont pratiquement les mêmes. Donc ce qui justifie l'utilisation du modèle monodimensionnel.

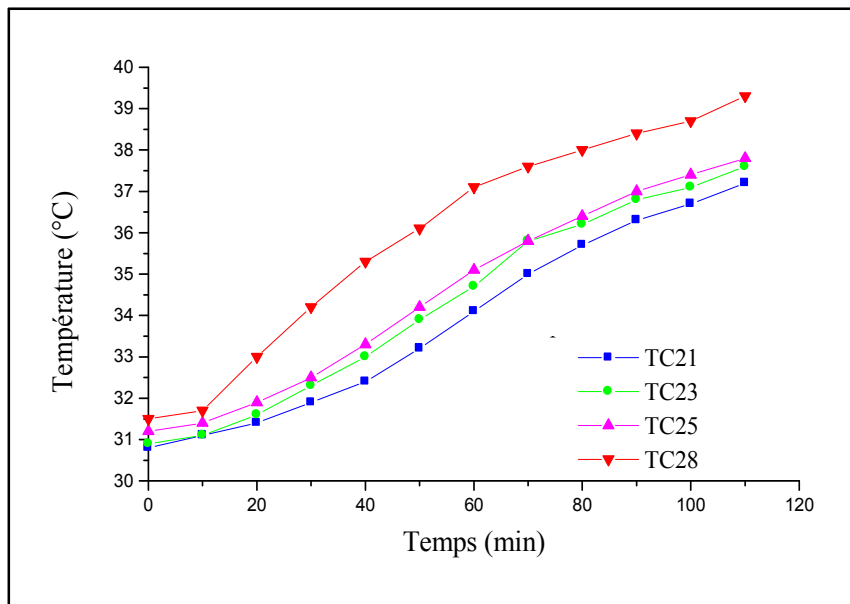


**Figure 5.2(a)** :L'évolution de la température de l'eau suivant la hauteur de la cuve en fonction de temps au cours de stockage.

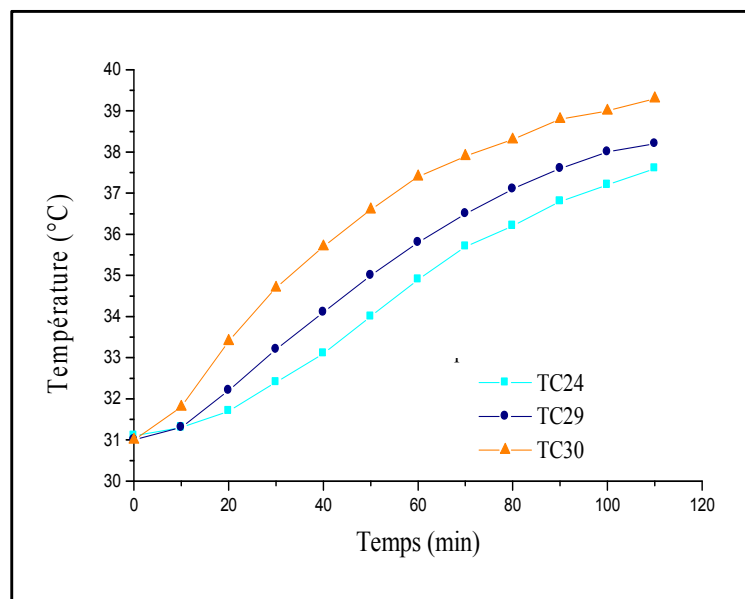


**Figure 5.2(b)** :L'évolution de la température de l'eau suivant le diamètre de la cuve en fonction de temps au cours de stockage.

Les figures 5.3(a) et 5.3(b) représentent l'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps dans différents niveaux de cylindre au cours de stockage. Sur les graphes, on voit nettement l'augmentation de la température suivant la hauteur du cylindre. Et celui de diamètre nous constatons qu'il y a une élévation des températures. Donc ce qui justifie l'utilisation du modèle bidimensionnel.



**Figure 5.3(a) :** L'évolution de la température de la paraffine suivant la hauteur du cylindre en fonction de temps au cours de stockage.



**Figure 5.3(b) :** L'évolution de la température de la paraffine suivant le diamètre du cylindre en fonction de temps au cours de stockage.

### V.3. Résultats de la phase de stockage :

Les résultats expérimentaux sont présentés sur les figures 5.4 à 5.7. Sur les axes des abscisses, on a représenté le temps et sur l'axe des Y on a représenté la température de l'eau en [°C]. La température de l'eau est initialement entre 29.6 °C à 31.4 °C.

### V.3.1.1. Résultats expérimentaux du 1<sup>er</sup> teste (Q=0.033 L/s) :

L'évolution de la température de l'eau d'alimentation de l'énergie thermique qui a été chauffé par la résistance électrique en fonction de temps sera présentée dans la figure 5. 6. Sur le graphe, on voit nettement l'évolution de la température qui est presque stable depuis 20min de départ qui implique que le flux de chaleur imposé au système de stockage presque constant (TRé=50 à 55°C).

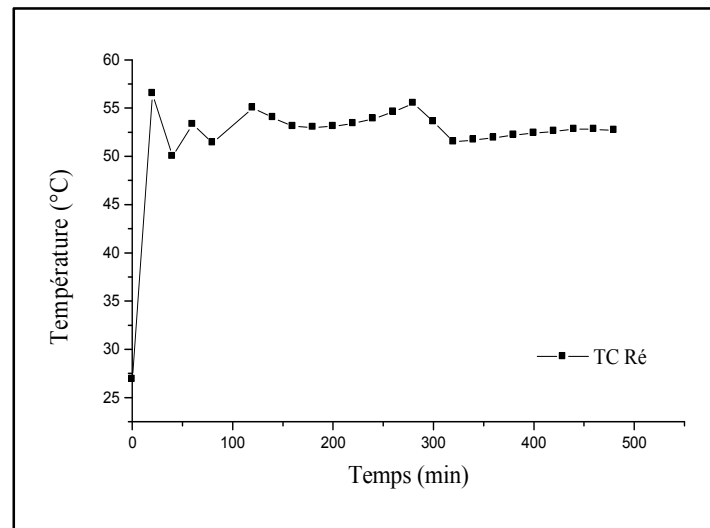
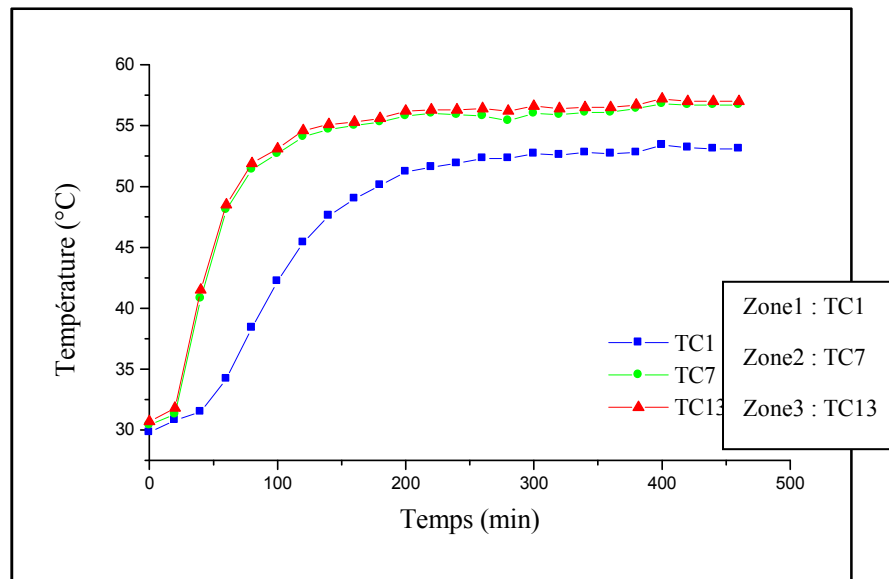


Figure 5.4 :L'évolution de la température de l'eau d'alimentation de chaleur en fonction de temps.

#### A. Le fluide (eau) :

La figure 5.5 montre l'évolution de la température de l'eau suivant la hauteur de la cuve en fonction de temps dans les différentes zones au cours de stockage on remarque que :

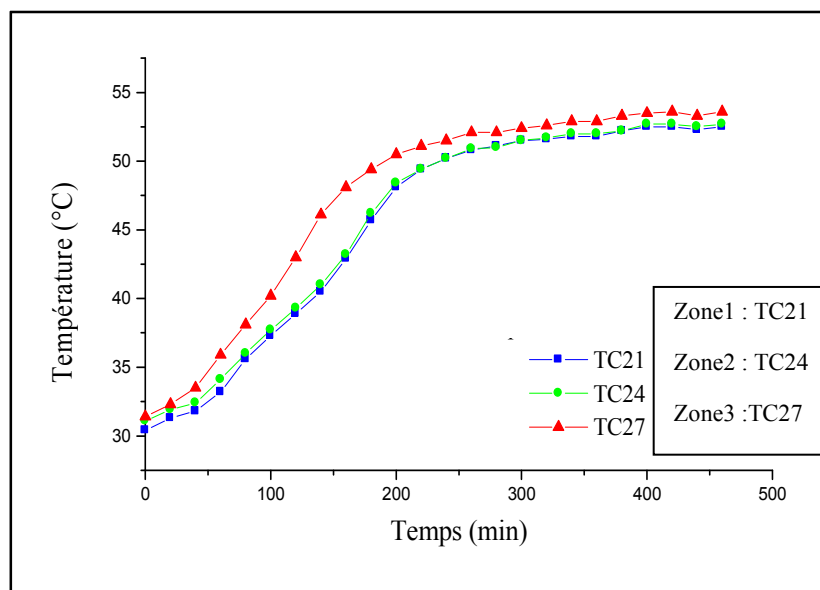
- Toutes les courbes ont la même allure sous forme d'une droite avec une pente importante. Autrement dit ; après une durée relativement courte, les températures sont passées de 30°C à 55°C approximativement. Ce qui explique les bonnes performances du système. Et deviennent en suit horizontale jusqu'à la fin de chauffé (depuis de 140 min de chauffe). Les températures de fluide vont donc stabiliser avant de passer au relaxation.
- On observe en cours de chauffe que l'augmentation des températures de fluide (eau) dans les zones(2, 3) est relativement rapide par rapport à la zone de fluide dessus de l'échangeur (zone1). Ceci est dû aux pertes thermiques de la partie inférieure.



**Figure 5.5 :** L'évolution de la température de l'eau suivant la hauteur de la cuve en fonction de temps dans les différentes zones au cours de stockage.

### B. Le MCP (la paraffine) :

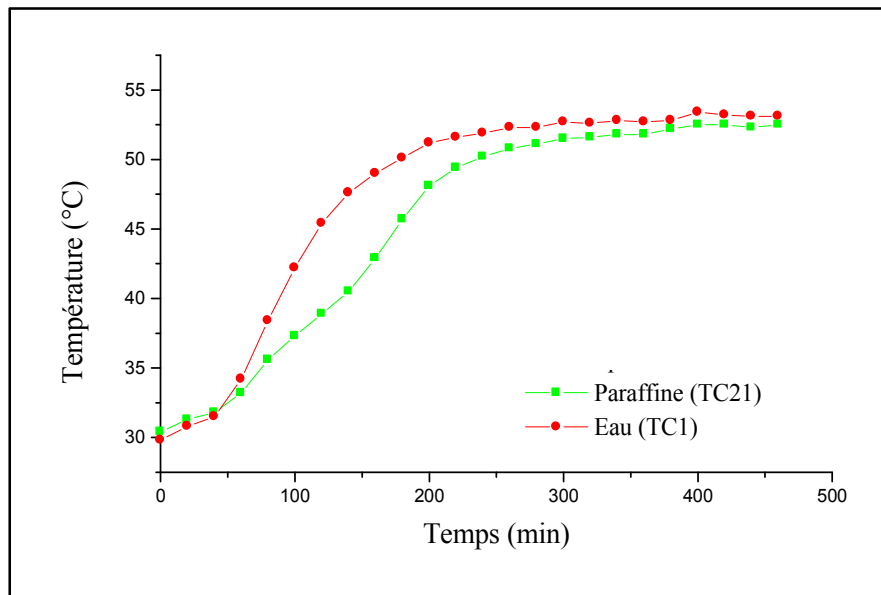
Les résultats expérimentaux de la figure 5.6 montrent l'évolution de la température de la paraffine (MCP) en fonction du temps dans les différentes zones de la cuve au cours de stockage. On remarque que toutes les courbes ont la même allure forme d'une droite avec une pente moyenne. Autrement dit ; après une durée relativement moyen (3heures), les températures sont passées de 30°C à 50-55°C approximativement. Ce qui explique le temps de transfert thermique de l'eau vers la paraffine. Et deviennent en suit horizontale (stabiliser) avant de passer au relaxation.



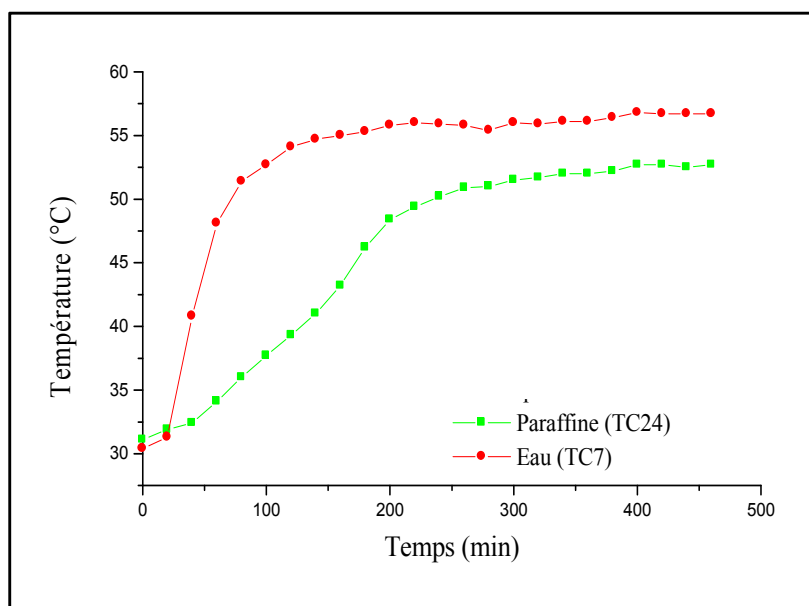
**Figure 5.6 :** L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve au cours de stockage.

### C. Eau avec la paraffine :

Les résultats expérimentaux présentés aux figures 5.7(a) à 5.7(c) montrent l'évolution des températures de l'eau et la paraffine dans les différentes zones de la cuve au cours de stockage. On remarque que les températures de l'eau dans toutes les zones sont supérieures à celles de la paraffine ce qui implique que le transfert de la chaleur se fait dans un seul sens de l'eau vers la paraffine.

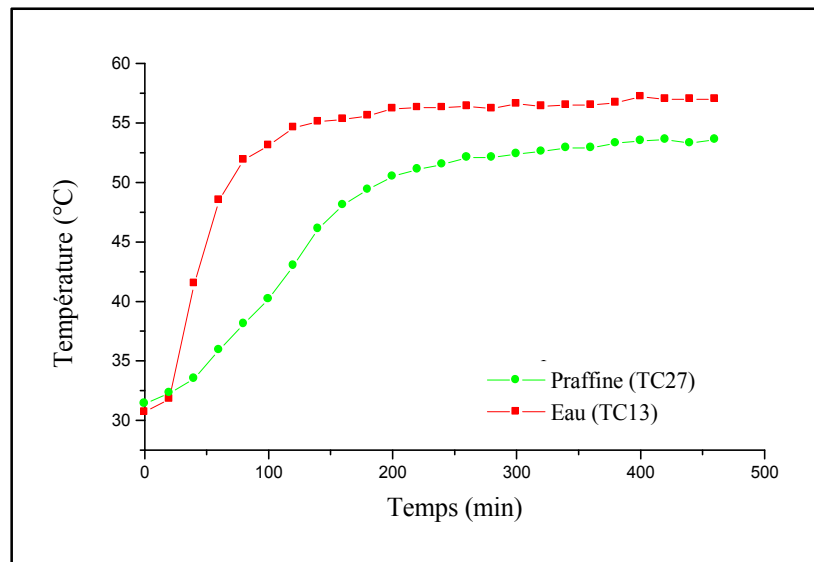


**Figure 5.7(a) :** L'évolution de la température de l'eau et la paraffine en fonction de temps dans la zone 1 de la cuve au cours de stockage.



**Figure 5.7(b) :** L'évolution de la température de l'eau et la paraffine en fonction de temps dans la zone 2 de la cuve au cours de stockage.





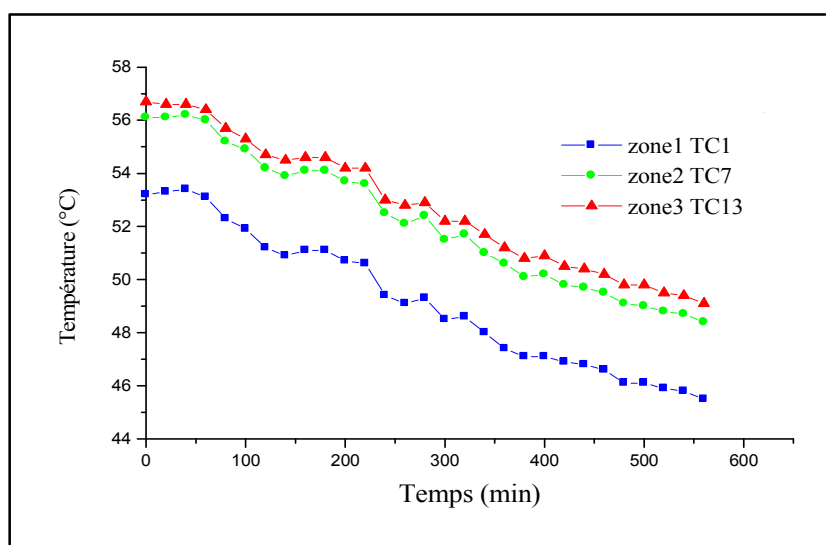
**Figure 5.7(c)** :L'évolution de la température de l'eau et la paraffine en fonction de temps dans la zone3 de la cuve au cours de stockage.

#### V.4. Résultats de la phase de relaxation :

Durant toute la phase de relaxation, les mesures de température sont effectuées à un intervalle de temps constant de 5minutes.

##### A. Le fluide (eau) :

La figure 5.8représente l'évolution de la température de fluide (eau) en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve de stockage au cours de relaxation. Sur les graphes, on voit nettement la diminution de la température suivant la hauteur de la cuve ce qui implique que le système est à l'état de relaxationparce que on remarque que que l'écart de température est de 7°C pendant 8 heures. Et on constate que la vitesse de dégradation de la température est presque homogène dans les différentes zones.

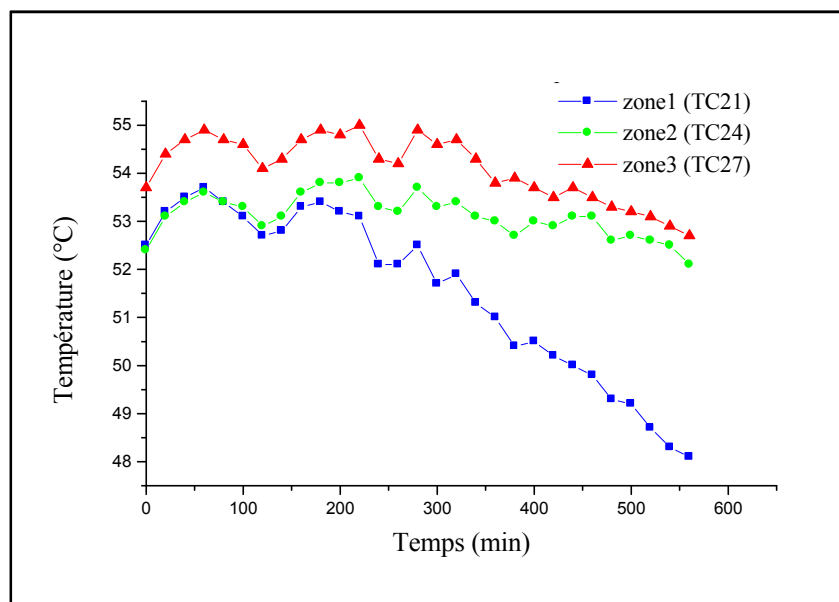


**Figure 5.8** :L'évolution de la température de l'eau en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve au cours de relaxation.

### B- Le MCP (la paraffine) :

La figure 5.9 représente l'évolution de la température de MCP (paraffine) en fonction de temps dans les différentes zones de cylindre au cours de relaxation. Sur les graphes, on voit nettement que :

- La partie inférieure (zone 1) se refroidit rapidement par rapport au autre niveau avec un écart de 5°C entre le début et la fin de déstockage qui explique l'existence des pertes thermiques.
- Les deux zones (2, 3) restent presque stable avec une diminution de la température relativement faible au cours de relaxation.



**Figure 5.9 :** L'évolution de la température de la paraffine en fonction de temps dans différentes zones de la cuve au cours de relaxation.

Les figures 5.10(a) à 5.10(c) représentent l'évolution de la température de l'eau avec la paraffine en fonction de temps dans les différentes zones de la cuve de stockage au cours de relaxation. Sur les graphes, on voit nettement la diminution de la température de fluide (l'eau) dans toutes les zones. Là où la température de la paraffine reste presque stable sauf la zone 1 où il y a une présence des pertes thermiques dans la partie inférieure de la cuve avec un écart de température de 5°C pendant 550min. Ce qui explique l'importance de la chaleur spécifique de la paraffine et leur chaleur latente au cours de changement de phase.

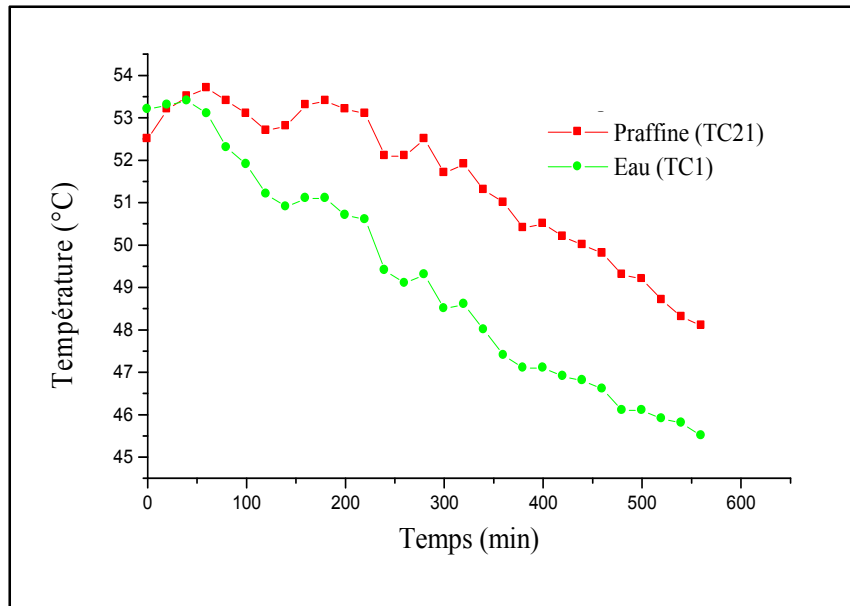


Figure 5.10(a) : L'évolution de la température de l'eau et paraffine dans la zone 1 au cours de relaxation.

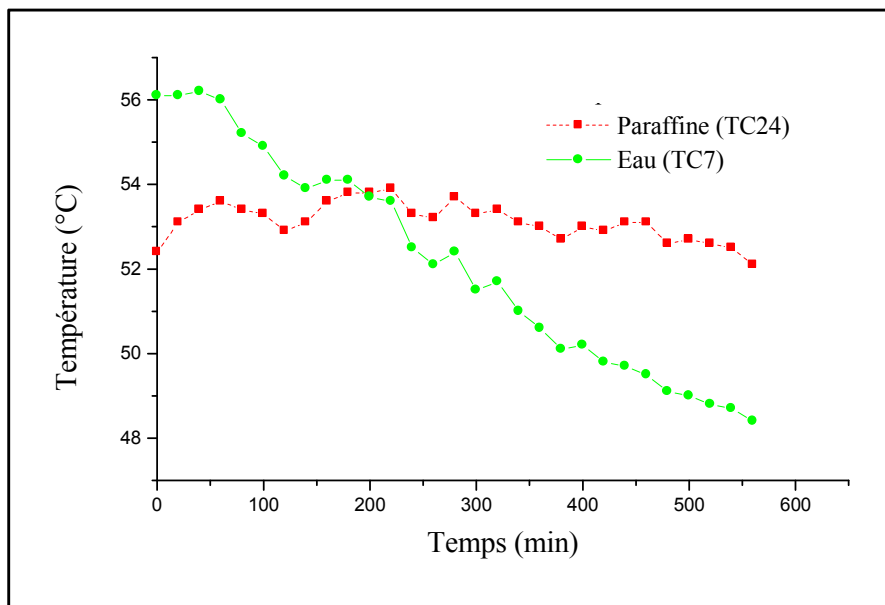
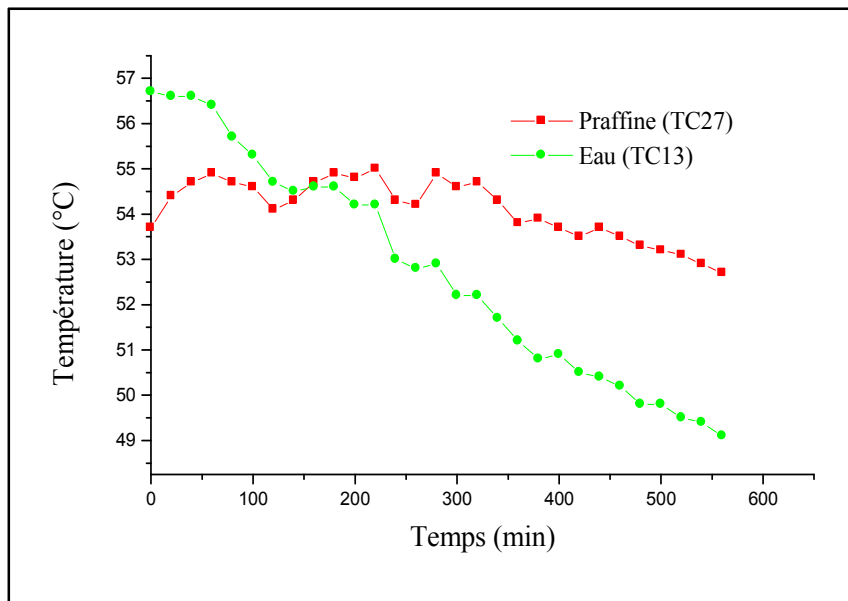
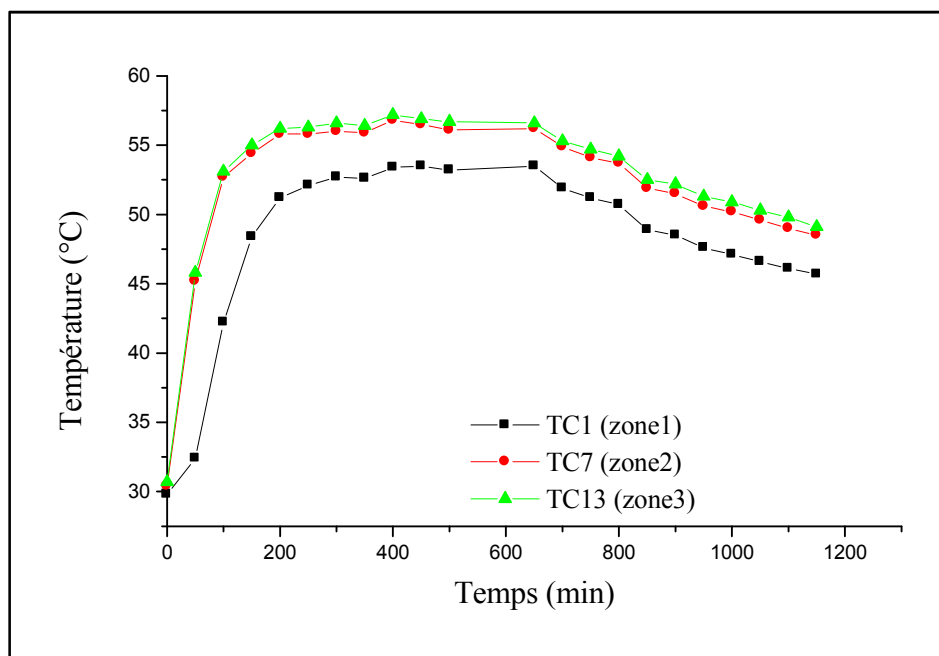


Figure 5.10(b) : L'évolution de la température de l'eau et paraffine dans la zone 2 au cours de relaxation.



**Figure 5.10(c) :** L'évolution de la température de l'eau et paraffine dans la zone 3 au cours de relaxation.

Les figures 5.11 et 5.12 montrent l'évolution de la température de l'eau et la paraffine au cours des deux phases (stockage et relaxation). Dans les deux graphes on remarque que les températures augmentent au cours de stockage et se stabilisent puis passent à la phase de déstockage car la diminution de la température pour le fluide (eau) par contre dans le MCP on remarque une longue stabilité grâce à sa chaleur latente et spécifique qui sont très importantes.



**Figure 5.11 :** l'évolution de la température de l'eau au cours de deux phases (stockage et relaxation).

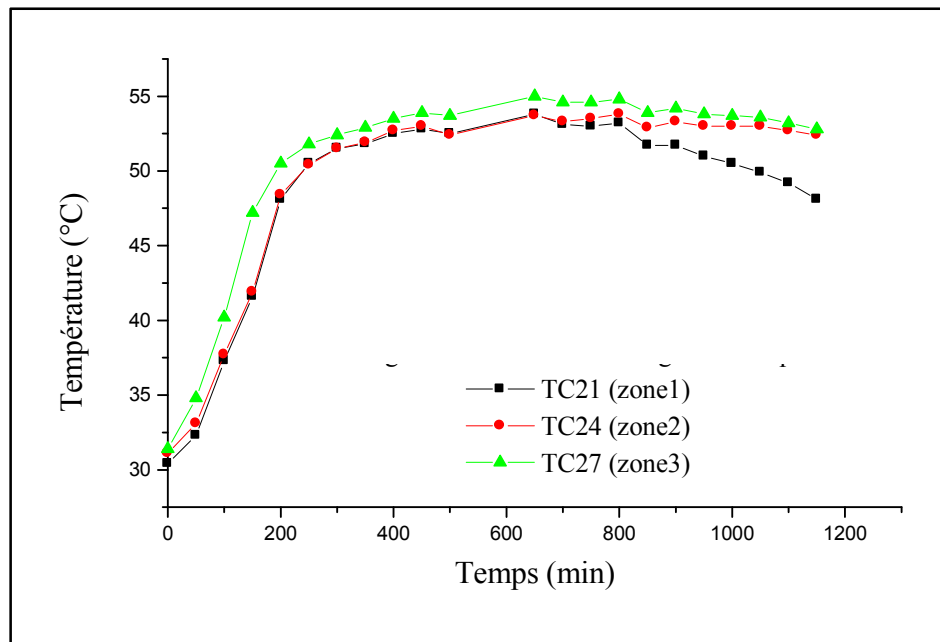


Figure 5.12 : l'évolution de la température de la paraffine au cours de deux phases (stockage et relaxation).

### V.5. Etude paramétrique :

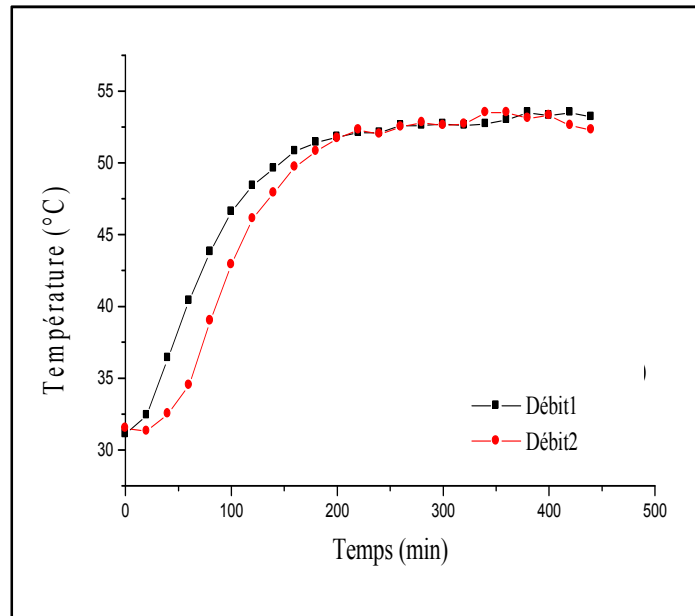
Dans cette partie qui est consacré à la comparaison des résultats expérimentaux des deux tests expérimentaux qui sont effectuée au notre système de stockage le premier sera effectué un débit volumique que de l'eau chaud de  $Q_1= 0.033$  L/s et un autre de  $Q_2=0.023$  L/s avec deux partie une partie avec un stockage mixte (sensible+ latente) et l'autre partie de stockage sensible seul. Les résultats sont présentés dans les figures de 5.13 à 5.27.

#### A. Le stockage mixte :

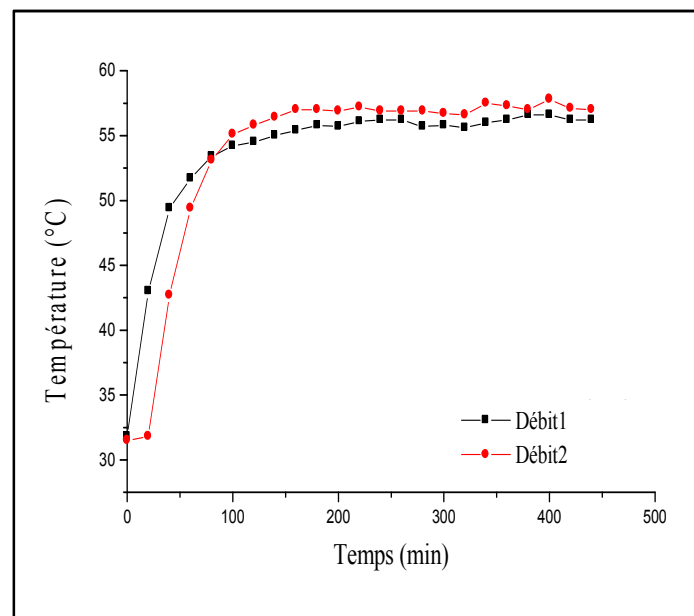
Les résultats expérimentaux présentés aux figures 5.13(a) à 5.13(c) montrent l'évolution des températures de l'eau dans les différentes zones de la cuve au cours de stockage pour les deux différents débits. On remarque que les allures sont les mêmes avec le taux d'échange de chaleur dans le fluide (eau) du premier débit dans la zone1 est un peu plus que le deuxième débit pendant une durée de 200min de chauffe et après soit presque le même pour les deux. Et pour les deux de zones reste (2,3) on voit aussi que le taux d'échange de chaleur dans le fluide (eau) du premier débit est un peu plus par rapport au deuxième débit pendant 100min de chauffe en suite on remarque que les allures se stabilisent avec un écart de température d'environ 2°C. Pour cela on a trouvé que l'augmentation de débit influe sur l'évolution de la température de l'eau à l'intérieur de la cuve.

Les résultats expérimentaux présentés aux figures 5.14(a) à 5.14(c) montrent l'évolution des températures de la paraffine dans les différentes zones de cylindre au cours de stockage pour les deux différents débits. On remarque que les allures sont les mêmes avec le taux d'échange de chaleur pour le premier débit est plus important que le deuxième débit pendant la durée de stockage car on voit nettement dans les graphes les écarts de température entre les deux débits

dans différents zones de cylindre. Donc on constate que l'augmentation de débit augmente le taux de transfert de chaleur et la capacité d'énergie stocké dans la paraffine (MCP).



**Figure 5.13(a)** : L'évolution de la température de l'eau dans la zone 1 de la cuve au cours de stockage pour les deux débits différents.



**Figure 5.13(b)** : L'évolution de la température de l'eau dans la zone 2 de la cuve au cours de stockage pour les deux débits différents.

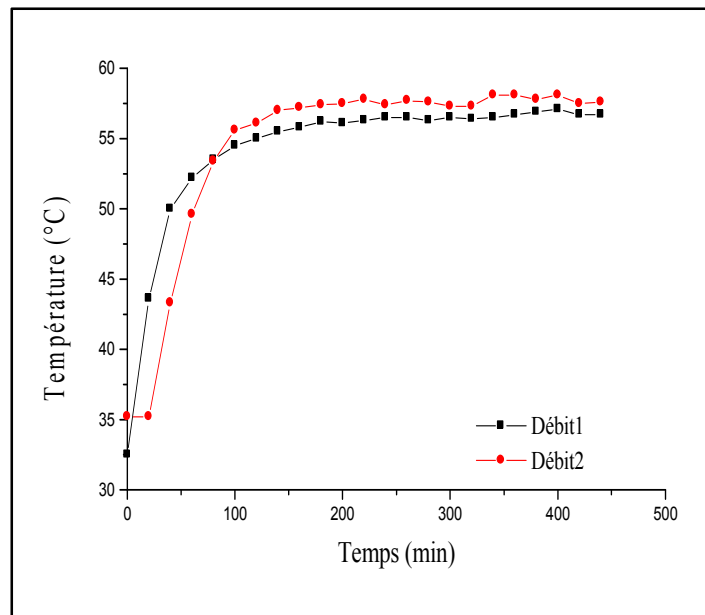


Figure 5.13(c) : L'évolution de la température de l'eau dans la zone 3 de la cuve au cours de stockage pour les deux débits différents.

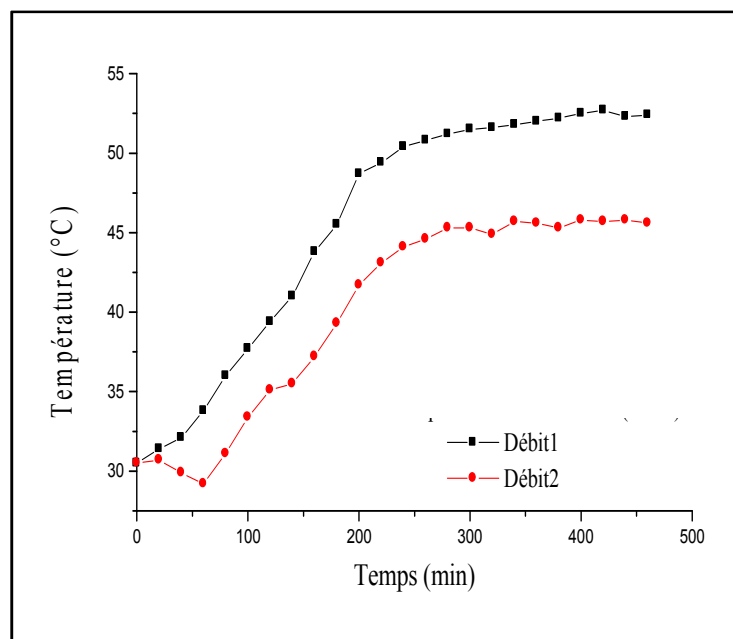
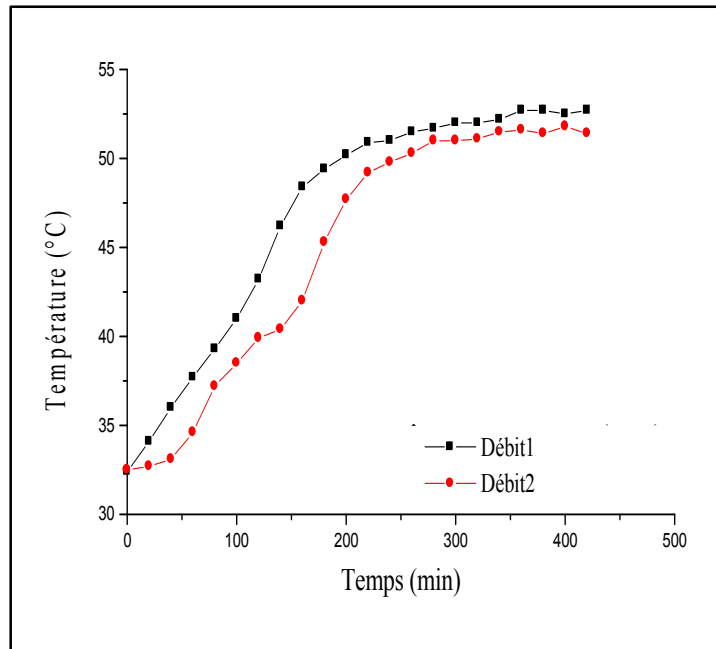
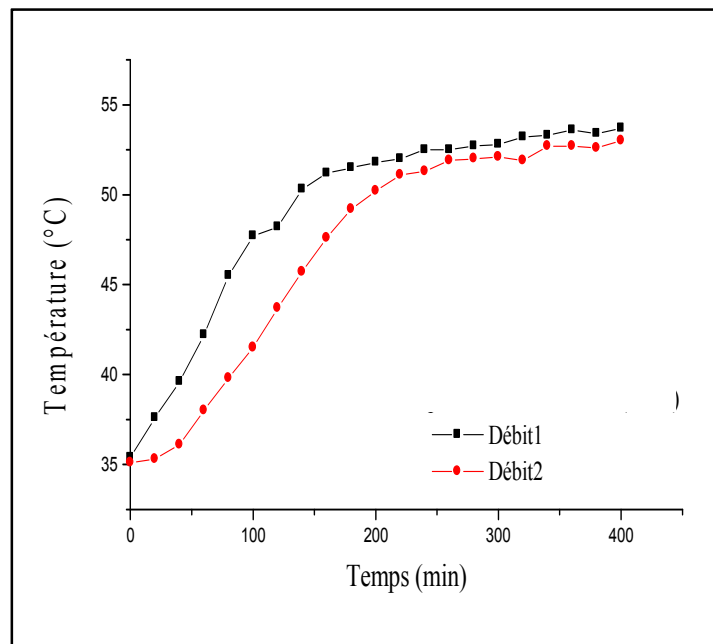


Figure 5.14(a) : L'évolution de la température de la paraffine dans la zone 1 de cylindre au cours de stockage pour les deux débits différents.



**Figure 5.14(b)** : L'évolution de la température de la paraffine dans la zone 2 de cylindre au cours de stockage pour les deux débits différents.

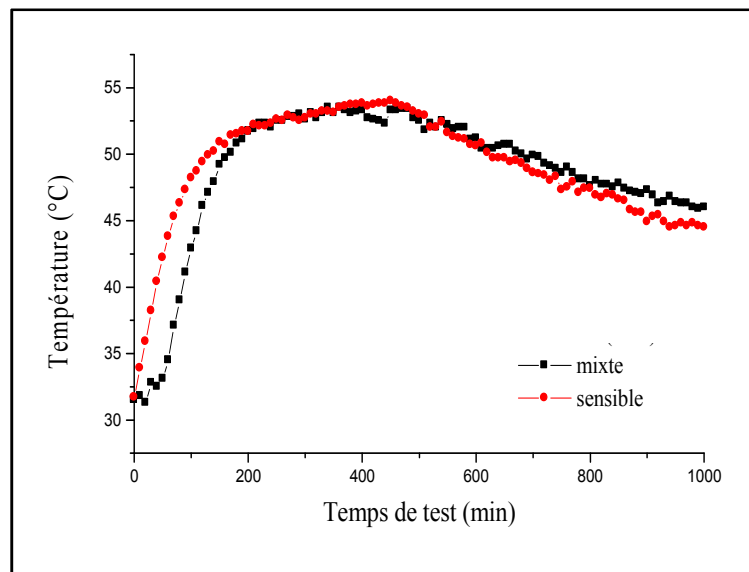


**Figure 5.14(c)** : L'évolution de la température de la paraffine dans la zone 3 de cylindre au cours de stockage pour les deux débits différents.

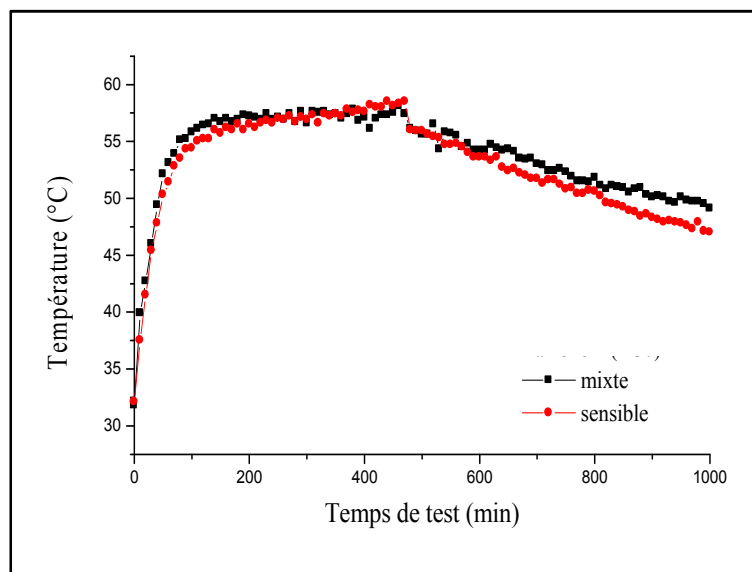


**B. Stockage par chaleur sensible :**

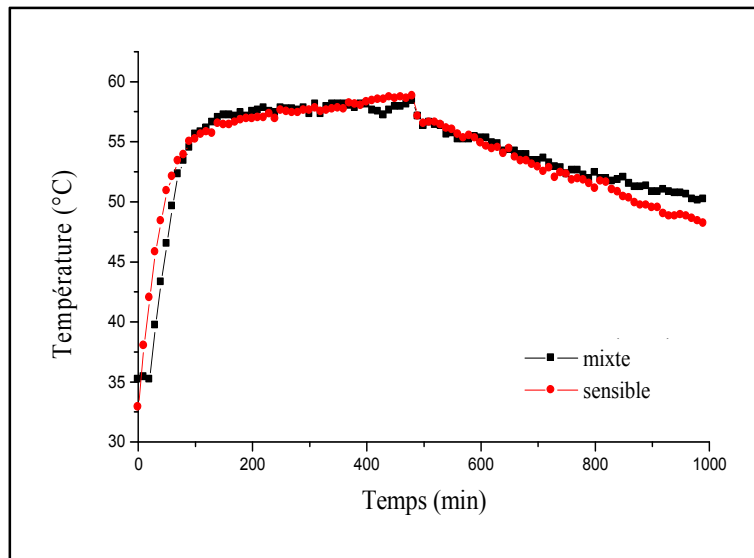
Les figures 5.15(a) à 5.15(c) montrent l'évolution de la température de l'eau dans les trois zones au cours de stockage et de relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible). Sur les graphes, on voit que les courbes sont presque confondues pour les deux types de stockage au cours de stockage et déstockage mais avec un petit écart de température à la fin de déstockage. Ce qu'explique que l'intégration des MCP (paraffine) dans les systèmes de stockage thermique joue un rôle très important sur la capacité d'énergie thermique stockée. Mais dans notre expérience effectuée au système de stockage réalisé on remarque que la quantité de la paraffine (MCP) n'est pas suffisante pour garder la stabilité thermique dans la cuve (chauffé l'eau).



**Figure 5.15(a)** : L'évolution de la température de l'eau dans la zone 1 au cours de stockage et de relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible).



**Figure 5.15(b)** : L'évolution de la température de l'eau dans la zone 2 au cours de stockage et de relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible).



**Figure 5.15(c)** : L'évolution de la température de l'eau dans la zone 3 au cours de stockage et de relaxation pour les deux types de stockage thermique (mixte, sensible).

## V.6. Conclusion :

Dans le présent chapitre on a présenté les résultats expérimentaux obtenus qui s'expriment le comportement thermique de chaque élément de système de stockage (fluide, paraffine) au cours de l'expérience (stockage, relaxation).

A partir de ces résultats et leurs interprétations on a constaté que :

- La propagation de la chaleur dans le système de stockage réalisé est monodimensionnel dans le fluide (eau) et bidimensionnel dans la paraffine (MCP). Et que de fluide vers la paraffine au cours de chauffe et vice-versa au cours de relaxation.
- L'augmentation de débit massique influe sur la capacité d'énergie thermique stockée dans la paraffine (MCP). Donc quand augmente le débit volumique on voit que la capacité d'énergie thermique stockée dans la paraffine (MCP) augmente.
- L'intégration de la paraffine (MCP) dans le système de stockage joue un rôle très important sur l'énergie thermique stockée à partir de la comparaison entre le stockage mixte et le stockage par chaleur sensible dans des expériences qui sont déjà faites mais dans notre cas on a trouvé qu'il existe un écart de la température mais la quantité de la paraffine n'est pas suffisante pour chauffer l'eau.

## Références bibliographique

---

- 1- Bransier (1979) : Stockage périodique par chaleur latente, Aspects Fondamentaux liés à la cinétique des Transferts. In. J. Heat mass Transfer, Vol.22, PP. 875-883.
- 2- Farid M. M, etKanzawa A (1989), Thermal performance of a heat storage module using PCM's with Different Melting Temperatures: Mathematical Modeling. ASME J. Solar Energy Eng., Vol 111, pp 152-157.
- 3- Hirata T. et Nishida K. (1989). An analysis of heat transfer using Equivalent thermal conductivity of the liquid phase during Melting inside an Isothedyheated Horizontal cylinder. Kit. J. Heat mass Transfer, Vol 32, No 9, pp. 1663-1670.
- 4- Fath H.E.S. (1991). Heat Exchanger performance for latent heat thermal Energy storage system, Energy convers. Mgmt., Vol. 31, No 2. Pp. 149- 155.
- 5- Laouadi. A. Lacroix M. Galanis. (1994). Thermal performance of a planar latent heat energy storage unit with electric heat sources. Fundamentals of phase change: conf. Organized by ASME. Chicago. Nov 13-18.
- 6- Pierre UZABAKILHO (1995). Etude expérimentale de la fusion et la solidification de la paraffine N-Octadécane. Thèse Université de SHERBROOK, Département de génie mécanique, Sherbrooke (CANADA). Pp 3-8.
- 7- A. Benmansouret M.A Hamdan(2001). Simulation du stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe des sphères contenant un Matériau à Changement de Phase. Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran B.P. 1505 El M'NAOUAR ORAN, ALGERIE.
- 8- Hamid El QARNIA (2005). Analyse de transfert de chaleur dans un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion pour le chauffage d'eau. Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, Département de physique. Laboratoire de mécanique des fluides et d'énergétique, B.P 2390, Marrakech, Maroc.
- 9- Mustapha FARAJI, Hamid El Qarania (2007). Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : Application au refroidissement d'une composante électronique. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, département de physique. Laboratoire de mécanique des fluides et énergétique, B.P 2390 Marrakech, Maroc.
- 10- A. Benmansour (2009) Réponse dynamique d'un lit fix pour le stockage de l'énergie thermique utilisant un matériau à changement de phase. Revue des énergies renouvelables Vol 12 N°2 (2009) 175-184, Laboratoire de mécanique appliquée. Université des sciences et de la technologie d'Oran. Oran, Algérie.
- 11- Djim SECK, Ababacar THIAM, Vincent SAMBOU, Dorothé AZILINON, Madam ADJ. Détermination du front de fusion d'une plaque de paraffine soumise a l'ensoleillement. Laboratoire d'Energétique appliquée, Ecole Supérieure Polytechnique, Université Cheikh AntaDiop, Dakar, Sénégal (2009).
- 12- ZohirYounsi, Annabelle JOULIN, Laurent ZALEWSKI, Stéphane LASSUE et Daniel ROUSSE. Analyse Numérique de la fusion de matériaux à changement de phase dans une enceinte rectangulaire chauffé par une paroi latérale. LAMTI-Faculté des sciences Appliquées de L'université d'Irtois, Techno part FUTURA.FRANCE (2009).
- 13- Housseynatou BAH (2010). Etude des effets de l'épaisseur de la paraffine sur les performances d'un chauffe-eau solaire à changement de phase. Laboratoire

## Références bibliographique

---

- d'Énergétique Appliquée, Ecole Supérieur Polytechnique, Université cheikh AntaDiop, B.P : 5085, Dakar Fann, Sénégal.
- 14- Rozenfeld, T., Kozak, Y., Ziskind, G. (2010). Analysis of Heat Storage Devices with Fins. 2<sup>nd</sup> International Conference on Sustainable Energy Storage, June 19-21, 2010, Trinity College Dublin, Ireland.
  - 15- S.Bouadila, M. Fteiti, M. M. Ouslati, A.A. Guizani and S. Ben Nasrallah. Study of storage thermal energy of latent heat application to the solar collector. Process Engineering Laboratory, Research and Technologies Center of Energy Techno pole BorjCedria, P.O.95 Hammamlif, Tunisia (Mars 2011).
  - 16- Walid FOU DHIL, Sadok BEN JABRALLAH, Belgacem DHIFA OUI, Daniel ROUSSE. Simulation numérique du stockage thermique par chaleur sensible et latente dans un canal poreux : Analyse des performances et comparaison. 2eme Congres de l'Association marocaine de Thermique, Casablanca (Maroc). (Avril 2012).
  - 17- B.Kanimozhi, and B.R.RameshBapu. Experimental Study of Thermal Energy Storage in Solar System Using PCM. Transaction on Control and Mechanical Systems, Vol.1, NO 2, Pp 87-92, (JUN 2012).
  - 18- R.Meenakshi Reddy, N.Nallusamy and K.Hemachandra Reddy. Experimental Studies on Phase Change Material-Based Thermal Energy Storage System for Solar Water Heating Applications. Sri Venkateswara département de l'ingénieur et technologie, Chittor 517 127. India (2012).
  - 19- Mr Dj. Lafri (2001). Thèse Contribution a l'étude du comportement thermique s'une cuve de stockage d'une installation de chauffage d'eau solaire. Université de BLIDA. Département de génie mécanique. Algérie.
  - 20- Cours d'Énergie renouvelable (Stockage d'énergie). Dr Hamid. Université de Blida. Algérie.
  - 21- Telkes, L. (1975). Thermal storage for heating and cooling. Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Charttesville, Virginia, USA.
  - 22- Paksoy, (1992) Thermal Analysis oh Heat Storage Materials and Integrated Heat Pump and Thermal Energy Storage System. PhD Thesis, Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In English).
  - 23- Ozturk, (1997) The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD Thesis. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana (In Turkish).
  - 24- Mazman, (2006) Latent Heat Storage and Application. PhD Thesis. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana (In Turkish) 110.
  - 25- Lane, (1983) solar heat storage: latent heat material, volume 1: Background and scientific principles. USA: CRC. 31
  - 26- Ahmed Maha, (2004) Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Couplage matériaux à changement de phase, Super isolation, Apports solaires. Université Joseph Fourier Grenoble : pp 5-23.
  - 27- Dinçeret Rosen, (2002) Thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and Sons Publishing Company, New York, USA.

## Références bibliographique

---

- 28- Jean-Sébastien SAVARD, Hussein IBRAHIM, Adrian ILINCA. Etude et conception d'un échangeur thermique pour un système hybride de type éolien-diesel-stockage d'air comprimé (JEDSAC). Laboratoire de recherche en énergie éolienne. Université du Québec à Rimouski. Canada. (Octobre 2008).
- 29- Akrouch Amina (2010). Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes (Algérie). Pp 11-16.
- 30- Anthony GONTARD et al (2012). Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase. Projet N°1210. Université de PAU et DES PAYS DE L'ADOUR. 2012
- 31- C.K. Jotshi, et al (1992) Solar thermal energy storage in phase change materials, in proc 1992 ASES annual conf, USA, 1992
- 32- Sari, A (2004). Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties'; Energy Conversion and Management 45; 2033-2041.
- 33- MARIN, J. M, ZALBA, B., CABAZA, L. F., MEHLING, H., 2005. Improvement of a thermal Energy Storage Using Plates with Paraffin-Graphite Composite/ International Journal of Heat and Mass Transfer 48: 2561-2570.
- 34- MEHLING, H., HIEBLER, S., ZEIGLER, F., (2000). Latent Heat Storage Using a PCM-Graphite Composite Material. Proceeding of TERRASTOCK-2008, 8<sup>th</sup> International Conference on Thermal Energy Storage, 28<sup>th</sup> August-1<sup>st</sup> September, 200, Stuttgart, Germany, 1: 375-380.
- 35- Sharma et al, (2009) Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 318-345.
- 36- D. Feldman, P. Kauranen and P. D. Lund, A multicomponent PCM wall optimized for solar heating, Energy and building, Vol, 17, pp. 259-270, 1991.
- 37- I. O. Salyer, A. K. Sircar, Development of phase change technology for heating and cooling of residential buildings and other applications, Proceedings of the 28<sup>th</sup> inter society energy conversion engineering conference, 8-13 Aout 1993, Atlanta.
- 38- ] S. M. Hasnain (1997). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, Energy research, Vol. 39 (11), pp 1127-1138, 1997.
- 39- I. O. Salyer, A. K. Sircar, Development of phase change technology for heating and cooling of residential buildings and other applications, Proceedings of the 28<sup>th</sup> inter society energy conversion engineering conference, 8-13 Aout 1993, Atlanta.
- 40- M. N. Hawlader., M., S. Udine ET H. J. Zhu Microencapsulated phase change materials. In Proceedings of 9<sup>th</sup> APCCChE Congress and CHEMECA 2002, Christchurch, New Zealand, 2002.
- 41- YINGPING Z., YIJ. Et YIJ. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal of conductivity of phasechange materials. Measurement Science and Technology, 1999, vol. 10, n°3, p201-205.
- 42- J.P. DUMAS- Stockage du froid par chaleur latent- Technique de l'ingénieur.

## ANNEXE C

## Les résultats expérimentaux

**Tableau n°1** : Les résultats obtenus pour vérification de model avec un débit massique de 0.041L/s.

Le système se démarre le 27/09/2013 à 13 :18 :00 avec un pas du temps de 5min pour chaque enregistrement des données.

Δt Min	Température des thermocouples de [1-20] [°C]																	
	Rés	1	5	9	13	6	18	17	Sort	Ente	21	24	26	28	29	30	25	23
0	42	30.8	30.9	30.8	30.9	30.7	30.7	30.8	31.5	32	30.8	31.1	31.3	31.5	31	31	31.2	30.9
5	39.2	30.9	31.5	32.4	32.7	31.6	31.6	31.4	36.4	39.4	30.9	31.2	31.4	31.6	31.1	31.2	31.4	31.1
10	37.1	31	33.5	34.2	34.3	33.6	33.6	33.5	36.6	38.7	31.1	31.3	31.4	31.7	31.3	31.8	31.4	31.1
15	38.7	31.2	34.9	35.9	35.9	35.1	35.1	35	38.5	40.3	31.2	31.5	31.7	32.2	31.6	32.5	31.5	31.3
20	36.3	31.5	36.2	36.5	36.8	36.2	36.2	36.2	38.1	38.6	31.4	31.7	32.2	33	32.2	33.4	31.9	31.6
25	40.6	31.7	36.8	37.2	37.6	36.8	36.8	36.8	39.6	40.7	31.6	32	32.5	33.7	32.6	34.3	32	31.8
30	37.9	32.1	37.9	38.2	38.2	37.8	37.9	37.8	38.7	40.1	31.9	32.4	33	34.2	33.2	34.7	32.5	32.3
35	36.8	32.4	38.3	38.5	38.6	38.2	38.2	38.3	39.4	39	32	32.7	33.5	34.8	33.5	35.2	32.8	32.5
40	39.2	33	38.6	38.7	38.9	38.6	38.6	38.6	40	40	32.4	33.1	33.9	35.3	34.1	35.7	33.3	33
45	38.9	33.3	39.1	39.5	39.6	39.1	39.1	39.1	40.8	41	32.8	33.5	34.4	35.7	34.5	36.1	33.7	33.5
50	37.9	33.8	39.5	39.8	39.9	39.5	39.6	39.6	40.5	39.9	33.2	34	34.9	36.1	35	36.6	34.2	33.9
55	37.4	34.3	39.8	39.9	39.9	39.7	39.7	39.8	40.3	39.7	33.6	34.4	35.3	36.5	35.3	36.9	34.5	34.2
60	37.1	34.9	40	39.9	40.1	39.9	39.8	40	40.3	39.4	34.1	34.9	35.8	37.1	35.8	37.4	35.1	34.7
65	36.9	35.4	40	40	40.1	39.9	39.8	40	40.2	39.3	34.5	35.2	36.1	37.2	36.1	37.6	35.5	35.2
70	37.9	35.8	40.1	40.1	40.1	39.9	39.9	40	40.2	39.5	35	35.7	36.5	37.6	36.5	37.9	35.8	35.8
75	39.8	36.2	40.2	40.4	40.7	40.1	40.1	40.2	42	41.7	35.2	35.9	36.7	37.7	36.7	38	36.1	35.8
80	38.7	36.4	40.7	40.8	40.9	40.5	40.6	40.7	41.6	41	35.7	36.2	36.9	38	37.1	38.3	36.4	36.2
85	38.2	36.8	40.9	40.9	41	40.7	40.7	40.7	41.4	40.5	35.9	36.5	37.2	38.1	37.3	38.5	36.8	36.4
90	37.8	37.2	41.1	41	41	40.9	40.9	41	41.2	40.3	36.3	36.8	37.5	38.4	37.6	38.8	37	36.8
95	37.7	37.4	40.9	40.9	41	40.8	40.8	41	41	40.1	36.5	37	37.6	38.4	37.7	38.9	37.1	36.9
100	37.5	37.6	41	41	41	40.8	40.8	40.9	40.9	39.9	36.7	37.2	37.9	38.7	38	39	37.4	37.1
105	37.3	38	40.9	40.9	41.1	40.8	40.8	40.8	40.9	40	37	37.4	38.1	38.9	38.1	39.2	37.7	37.4
110	37.2	38.1	40.8	40.9	41	40.7	40.6	40.7	40.8	39.9	37.2	37.6	38.3	39.3	38.2	39.3	37.8	37.6
115	37.2	38.2	40.7	40.9	41	40.5	40.5	40.7	40.7	39.7	37.4	37.8	38.4	39.3	38.4	39.4	37.9	37.8

## ANNEXE C

**Tableau n°2 : La phase de stockage pour un débit de 0.033 L/s**

Le système se démarre le 28/09/2013 à 10 :06 :00 avec un pas du temps de 5min pour chaque enregistrement des données.

$\Delta t$ min	Température des thermocouples de [1-20] [°C]																			
	Res	1	5	9	13	3	7	11	Sort	Entr	21	24	26	28	15	30	25	23	27	22
0	26.9	29.8	30.3	30.6	30.7	30.1	30.4	30.8	29.6	30.9	30.4	31.1	31.2	31.2	30.8	31	31.4	30.9	31.4	30.7
5	26.8	29.8	30.5	30.7	30.8	30.2	30.4	30.8	28.9	31.1	30.5	31.1	31.3	31.3	30.8	31.1	31.4	31	31.5	30.8
10	38.3	30.2	30.8	31.1	31.3	30.6	30.9	31.4	30.8	31.2	30.9	31.5	31.8	31.6	31.4	31.4	31.7	31.2	31.8	31.2
15	49.1	30.5	31.1	31.4	31.6	30.8	31.1	31.6	31	31.4	31.1	31.7	32	31.8	31.6	31.6	31.9	31.4	32	31.4
20	56.5	30.8	31.3	31.6	31.8	31	31.3	31.8	31.4	31.7	31.3	31.9	32.2	32	31.8	31.8	32.2	31.6	32.3	31.5
25	51.5	30.9	31.5	32.2	32.5	31.2	31.8	32.6	36	43.3	31.4	31.9	32.3	32.1	32.5	31.9	32.2	31.7	32.4	31.6
30	47.9	31.1	34.7	36.1	36.8	32.8	35.7	36.4	39.6	47.5	31.6	32.1	32.4	31.8	36.4	32.7	32.3	31.9	32.6	31.7
35	49.2	31.2	37.4	39.3	39	35.7	39.3	39	41.4	48	31.7	32.3	32.5	31.9	39.1	33.9	32.5	32	33.3	31.8
40	50	31.5	40.1	41.3	41.5	38.1	40.8	41.6	43.1	49.1	31.8	32.4	32.8	32.4	41.2	35	32.5	32.2	33.5	31.9
45	52.1	31.8	42.4	43.4	43.6	40.4	43	43.6	45.2	50.7	32.1	32.7	33.4	32.7	43.6	36.1	32.8	32.6	34.3	32.3
50	53.3	32.4	44.5	45.4	45.8	42.5	45.2	45.7	47	52.1	32.3	33.1	33.9	33.1	45.7	36.9	33.3	32.9	34.8	32.8
55	50.9	33.2	46.3	47.1	47.4	44.4	47.5	47.5	48	52.3	32.7	33.5	34.2	33.5	47.6	37.7	33.6	33.4	35.4	33.2
60	53.3	34.2	47.6	48.3	48.5	46	48.1	48.5	48.7	51.8	33.2	34.1	34.9	34	48.4	38.6	34.1	34	35.9	33.8
65	52.7	35.2	48.9	49.7	50	47.4	49.4	49.9	50.2	53.2	33.8	34.6	35.5	34.5	49.8	39.6	34.6	34.5	36.5	34.4
70	51.1	36.4	49.8	50.2	50.6	48.3	50.2	50.5	49.9	51.2	34.4	35.1	36	35.1	50.6	40.7	35	35.1	37.1	34.9
75	54.3	37.4	50.5	51	51.5	49	51	51.3	51.5	54.2	35	35.6	36.5	35.7	51.3	42.7	35.5	35.5	37.6	35.5
80	51.4	38.4	51.2	51.5	51.9	49.7	51.4	52	51.2	52	35.6	36	36.9	36.2	51.9	44.9	35.8	35.9	38.1	35.8
85	54	39.4	51.5	51.8	52.2	50	51.7	52.1	51.6	53	36	36.5	37.5	37.3	52	46.1	36.3	36.5	38.6	36.4
90	53.2	40.4	52.1	52.6	52.8	50.8	52.4	53	52.5	53.6	36.5	37	38	38.5	52.9	47.1	36.7	36.9	39.1	36.8
95	51.3	41.3	52.5	52.7	52.9	51.1	52.6	53.2	52.5	52.5	36.8	37.2	38.5	39.8	53	47.6	37	37.2	39.6	37.1
100	55	42.2	52.7	52.9	53.1	51.3	52.7	53.5	52.6	53.5	37.3	37.7	39.1	40.9	53.1	48.3	37.5	37.7	40.2	37.7
105	53.1	43	53.2	53.4	53.5	51.6	53.4	53.8	53.1	53.8	37.7	38.1	39.5	41.8	53.8	48.8	37.8	38.2	40.8	38
110	51.6	43.8	53.5	53.6	53.8	51.9	53.5	53.8	52.6	52.5	38.1	38.5	40.2	42.4	53.8	49.2	38.2	38.5	41.5	38.4
115	53.5	44.6	53.5	53.6	53.8	52.1	53.8	53.9	52.6	52.8	38.5	38.9	40.8	42.9	53.9	49.5	38.4	38.9	42.2	38.4
120	54	45.4	53.9	54.3	54.6	52.7	54.1	54.4	53.8	54.2	38.9	39.3	41.4	43.7	54.4	50	38.7	39.3	43	39.4
125	52.3	46	54.2	54.3	54.5	52.7	54.2	54.6	53.4	53.3	39.4	39.8	42.4	43.7	54.6	50.4	39.4	39.9	44	39.9
130	51.4	46.6	54.2	54.3	54.6	52.7	54.1	54.6	52.8	52.3	39.7	40.1	43.1	44.2	54.6	50.6	39.7	40.2	44.8	40.5

## ANNEXE C

135	55.2	47	54.2	54.6	54.7	52.5	54.2	54.7	53.2	53.1	40.2	40.6	43.8	44.6	54.8	50.9	40.1	40.6	45.5	41
140	53.1	47.6	54.5	54.9	55.1	53.1	54.7	54.9	53.8	53.6	40.5	41	44.6	45.4	55	51.2	40.4	41	46.1	41.6
145	52	47.9	54.7	54.8	55	53	54.5	55	53.3	52.5	41	41.4	45.1	45.4	54.9	51.3	40.8	41.4	46.6	42.1
150	52.6	48.4	54.4	54.6	55	53.2	54.4	55	53	52.6	41.6	41.9	45.8	45.3	55	51.5	41.5	42	47.2	42.7
155	54.8	48.7	54.5	55	55.2	53.4	55.1	55.4	54.6	55.4	42.3	42.5	46.3	45.7	55.4	51.7	42	42.7	47.7	43.3
160	53	49	55	55.2	55.3	53.5	55	55.4	54.1	53.9	42.9	43.2	46.7	46	55.4	51.8	42.8	43.4	48.1	43.9
165	52	49.4	55.1	55.2	55.5	53.5	55	55.5	53.6	53	43.8	44.1	47.3	46.3	55.5	52.2	43.9	44.2	48.6	44.6
170	53.2	49.6	54.8	55	55.3	53.3	54.7	55.3	53.1	52.8	44.5	44.9	47.7	46.4	55.3	52.3	44.9	44.9	48.9	45.1
175	54.6	49.7	54.9	55.2	55.4	53.4	55.1	55.4	54.7	55.4	45.1	45.5	47.9	46.5	55.4	52.3	45.6	45.5	48.2	45.4
180	53.1	50.1	55.2	55.4	55.6	54	55.3	55.5	54.1	53.9	45.7	46.2	48.3	47.1	55.6	52.5	46.2	46.1	49.4	46
185	52.1	50.5	55.4	55.7	55.8	54.2	55.4	55.6	53.9	53.1	45.5	46.9	48.6	47.2	55.8	52.8	46.7	46.9	49.9	46.7
190	52.2	50.8	55.1	55.5	55.9	54.1	55.2	55.9	53.4	52.5	47.1	47.5	48.8	47.2	55.9	53	47.4	47.4	50.1	47.2
195	55.2	50.8	55	55.4	55.8	53.9	55.5	55.7	54.9	55.6	47.4	47.8	49.1	47.4	55.7	53	47.8	47.7	50.3	47.5
200	53.4	51.2	55.7	55.9	56.2	54.7	55.8	56.3	54.5	54.4	48.1	48.4	49.7	47.7	56.2	53.4	48.2	48.3	50.5	48.1
205	52.3	51.4	55.7	56	56.2	54.6	55.8	56.1	54.1	53.4	48.7	48.9	49.9	47.9	56.2	53.6	47.8	48.8	50.9	48.5
210	51.6	51.4	55.4	55.8	56.1	54.4	55.5	55.9	53.6	52.8	49	49.2	50.2	48.4	56	53.7	49	49.1	51	48.9
215	55.9	51.8	55.5	55.9	56.2	54.5	55.6	56.1	54.5	55.2	49.3	49.4	50.3	48.5	56.1	53.7	49.1	49.4	51.2	49.1
220	53.9	51.6	55.9	56.3	56.3	54.7	56	56.4	54.9	54.9	49.4	49.4	50	47.8	56.4	53.5	49.1	49.4	51.1	48.9
225	52.7	51.6	55.7	55.9	56.1	54.8	55.7	56	54.2	54	49.4	49.6	50.1	47.7	56.1	53.6	49.3	49.6	51.1	49.1
230	51.9	51.8	55.7	56	56.3	54.9	55.7	56.3	53.9	53.2	49.7	49.8	50.3	48.1	56.4	53.6	49.5	49.9	51.4	49.2
235	52.4	51.9	55.4	55.8	56.1	54.5	55.4	56.2	53.4	53	50	50.1	50.4	47.9	56.2	53.7	49.8	50	51.5	49.5
240	54.6	51.9	55.6	56	56.3	54.8	55.9	56.3	55	55.5	50.2	50.2	50.7	48.2	56.3	53.9	50.1	50.3	51.5	49.8
245	53	52	55.9	56.2	56.3	55.1	56.1	56.4	54.5	54.2	50.4	50.4	50.9	48.2	56.4	53.9	50.3	50.4	51.7	49.9
250	52.2	52.1	56	56.1	56.3	55.1	55.8	56.3	54.1	54.7	50.5	50.4	50.8	48.3	56.4	54.5	50.2	50.6	51.8	50
255	51.6	52.2	55.7	56.1	56.3	54.9	55.7	56.3	53.6	53	50.5	50.6	50.9	48.6	56.4	54.5	50.4	50.6	51.8	50.2
260	55.5	52.3	55.5	56.1	56.4	54.7	55.8	56.3	54.9	55.8	50.8	50.9	51.2	48.5	56.3	54.3	50.8	50.9	52.1	50.5
265	53.5	52.2	56	56.4	56.5	55.2	56.2	56.6	54.7	54.8	50.8	50.9	51.2	48.6	56.5	54.1	50.6	50.9	52.1	50.4
270	52.4	52.1	56	56.2	56.3	55	55.9	56.3	54.2	53.6	50.8	50.9	51.2	48.2	56.3	54.1	50.7	50.8	52	50.5
275	51.8	52.2	55.6	56	56.2	54.7	55.7	56.2	53.7	52.9	50.9	50.9	51	48.3	56.2	54	50.6	50.9	52	50.4
280	53.6	52.3	55.4	55.9	56.2	54.3	55.4	56.1	53.5	53.3	51.1	51	51	48.5	56.2	54.1	50.8	51.1	52.1	50.6
285	54.6	52.4	55.8	56.3	56.5	54.7	56.2	56.4	55	55.6	51.2	51.2	51.1	48.5	56.4	54.2	50.9	51.2	52.2	50.6
290	53.1	52.6	56.2	56.5	56.6	55.4	56.3	56.6	54.6	54.5	51.2	51.3	51	48.6	56.6	54.3	50.9	51.4	52.2	50.7



## ANNEXE C

295	52.2	52.6	56.2	56.4	56.6	55.4	56.2	56.6	54.1	53.6	51.4	51.5	51.6	48.8	56.6	54.5	51.3	51.5	52.5	51
300	51.5	52.7	55.9	56.4	56.6	55.1	56	56.6	53.7	53	51.5	51.5	51.6	49	56.7	54.4	51.1	51.7	52.4	51
305	55.4	52.5	55.5	56.1	56.3	54.7	55.7	56.3	54.3	54.9	51.5	51.5	51.4	48.9	56.4	54.3	51.1	51.6	52.5	51.1
310	53.6	52.6	55.9	56.3	56.5	55	56.2	56.5	54.7	54.9	51.4	51.6	51.5	49	56.4	54.5	51.4	51.6	52.5	51.1
315	52.5	52.4	56	56.2	56.4	55	56	56.4	54.1	53.8	51.5	51.6	51.5	48.8	56.3	54.4	51.3	51.6	52.5	51.1
320	51.7	52.6	55.9	56.2	56.4	55	55.9	56.4	53.7	53.2	51.6	51.7	51.8	48.9	56.4	54.4	51.6	51.7	52.6	51.2
325	54	52.8	55.6	56.2	56.5	55	55.8	56.4	53.7	53.8	51.6	51.9	51.6	49.2	56.4	54.5	51.6	51.8	52.6	51.3
330	54.3	52.7	55.9	56.5	56.7	55.1	56.3	56.6	54.9	55.4	51.7	51.9	51.8	49.1	56.5	54.5	51.6	51.9	52.7	51.3
335	52.8	52.6	56.1	56.4	56.6	55.2	56.3	56.5	54.3	54.1	51.8	51.8	51.6	49.1	56.6	54.5	51.6	51.9	52.7	51.3
340	51.9	52.8	56.1	56.3	56.5	55.3	56.1	56.4	54	53.6	51.8	52	51.9	49.3	56.5	54.7	51.7	52	52.9	51.5
345	51.3	52.6	55.6	56.1	56.4	54.8	55.6	56.2	53.5	52.7	51.8	52	51.8	49.3	56.3	54.6	51.7	52	52.9	51.4
350	55	52.6	55.5	56.2	56.4	54.6	55.9	56.7	54.8	55.6	51.8	51.9	51.8	49.1	56.3	54.5	51.7	51.9	52.9	51.4
355	53.3	52.7	56.1	56.4	56.5	55.1	56.3	56.4	54.6	54.7	51.8	51.8	51.7	49.4	56.5	54.5	51.6	51.9	52.8	51.4
360	52.2	52.7	56.1	56.3	56.5	55.2	56.1	56.4	54	53.6	51.8	52	51.9	49.2	56.4	54.6	51.8	52	52.9	51.5
365	51.5	52.8	55.9	56.3	56.5	55.1	56	56.3	53.6	53.2	52	52.1	51.9	49.4	56.5	54.6	51.8	52.2	53	51.4
370	55.8	52.7	55.7	56.2	56.4	54.9	55.9	56.4	54.7	56	51.9	52.1	52.1	49.6	56.4	54.6	51.9	52.2	53	51.6
375	53.7	53	56.4	56.8	56.8	55.4	56.5	56.8	55	55.3	52	52.3	52	49.4	56.7	54.8	51.9	52.3	53.2	51.6
380	52.4	52.8	56.5	56.6	56.7	55.5	56.4	56.6	54.3	54.2	52.2	52.2	52.1	49.7	56.7	54.7	51.9	52.3	53.3	51.7
385	51.6	53.1	56.3	56.6	56.7	55.4	56.2	56.6	54	53.5	52.2	52.4	52.2	49.6	56.7	54.9	52.1	52.4	53.3	51.7
390	54.2	53	55.8	56.4	56.7	55	55.9	56.4	54	54.2	52.2	52.4	52.4	49.7	56.5	54.8	52.2	52.4	53.3	51.9
395	54	53.1	56.3	56.7	56.8	55.3	56.5	56.7	55	55.7	52.2	52.4	52.3	49.6	56.7	55	52.2	52.5	53.3	51.8
400	52.6	53.4	56.8	57.1	57.2	55.9	56.8	56.9	54.8	54.6	52.5	52.7	52.4	49.7	57	55.1	52.5	52.7	53.5	51.9
405	51.8	53.4	56.5	56.9	56.9	55.6	56.6	56.7	54.4	53.9	52.5	52.8	52.4	49.9	56.9	55.2	52.3	52.7	53.6	52
410	54.3	53.5	56.5	56.7	56.9	55.5	56.4	56.6	55	55.6	52.6	52.6	52.3	50	56.9	54.8	52.4	52.8	53.5	51.8
415	54.1	53.2	56.7	57	57.1	55.8	56.9	56.9	55.4	56.1	52.6	52.7	52.3	49.8	57	55.1	52.4	52.7	53.6	52
420	52.8	53.2	56.6	56.9	57	55.7	56.7	56.8	54.7	54.5	52.5	52.7	52.5	49.8	56.9	55.3	52.5	52.6	53.6	52.2
425	51.9	53.2	56.5	56.9	57.1	55.5	56.6	56.8	54.1	53.7	52.7	52.9	52.8	49.7	57	55.3	52.7	52.9	53.8	52.5
430	53.9	53.3	56.2	56.7	56.8	55	56.3	56.3	54.1	54.5	52.4	52.6	52.1	49.8	56.7	54.9	52.1	52.7	53.5	51.8
435	54.1	53.2	56.4	56.9	57	55.4	56.7	56.7	55	55.8	52.5	52.5	52.2	49.7	56.9	55	52.4	52.6	53.4	51.9
440	52.8	53.1	56.6	56.9	57	55.2	56.7	56.6	54.7	54.6	52.3	52.5	51.8	49.6	56.9	54.9	51.9	52.6	53.3	51.7
445	51.8	52.9	56.2	56.5	56.7	55.1	56.2	56.2	53.9	53.5	52.3	52.4	52	49.6	56.5	54.8	52.2	52.4	53.3	51.7
450	54.5	53.5	56.5	56.8	56.9	55.2	56.5	56.6	54.8	55.4	52.8	53	52.8	50.1	56.8	55.3	52.9	53	53.9	52.3

## ANNEXE C

455	54.2	53.4	56.6	57.1	57.2	55.6	56.9	57.1	55.2	56.1	52.8	52.8	52.7	49.8	57	55.4	52.6	52.9	53.7	52.4
460	52.7	53.1	56.6	56.9	57	55.6	56.7	56.8	54.5	54.4	52.5	52.7	52.6	49.8	56.9	55.2	52.5	52.6	53.6	52.2
465	51.8	52.9	56.1	56.5	56.7	55	56.2	56.5	53.8	53.4	52.4	52.5	52.2	49.6	56.6	54.9	52.2	52.6	53.4	51.9
470	53.7	53.2	56.2	56.7	56.8	55.3	56.2	56.6	54	54.4	52.5	52.9	52.7	49.8	56.8	55.1	52.7	52.9	53.7	52.2

**Tableau n°3 :** La phase de déstockage pour un débit de 0.033 L /s

Le système se démarre le 28/09/2013 à 18 :05 :42 avec un pas du temps de 5min pour chaque enregistrement des données.

Δt min	Température des thermocouples de [1-20] [°C]																			
	Res	1	5	9	13	3	7	11	Sort	Entr	21	24	26	28	15	30	25	23	27	22
0	50.4	53.2	55.9	56.4	56.7	54.9	56.1	56	50.9	51.5	52.5	52.4	49.6	50.3	56.3	54.9	52.6	52.7	53.7	51.9
5	49.6	53	55.6	56.1	56.4	54.3	55.8	55.6	49.9	51	52.4	52.2	49.4	50.2	56	54.7	52.5	52.7	53.7	51.8
10	49.1	53.3	56.1	56.5	56.7	54.9	56.2	56.2	50.2	51.3	52.7	52.8	49.9	50.6	56.4	55.1	53	53	54.1	52.2
15	48.4	53.6	56.2	56.7	56.9	55.1	56.4	56.5	49.6	51.2	53.1	53.1	50.1	50.7	56.7	55.4	53.3	53.4	54.4	52.6
20	47.7	53.3	55.9	56.4	56.6	54.7	56.1	56.2	49.1	51	53.2	53.1	49.9	50.6	56.4	55.2	53.2	53.3	54.4	52.4
25	47.2	53.4	56.2	56.6	56.7	55	56.3	56.4	49.3	51.1	53.1	53.1	50.2	50.8	56.6	55.3	53.2	53.5	54.6	52.5
30	46.6	53.3	56	56.5	56.6	55	56.2	56.3	48.8	51.1	53.3	53.1	50.3	50.9	56.5	55.2	53.2	53.6	54.6	52.5
35	46	53.5	56.1	56.7	56.8	55.2	56.4	56.5	48.7	51.1	53.5	53.3	50.3	51	56.8	55.2	53.4	53.7	54.9	52.3
40	45.5	53.4	56.1	56.5	56.6	55	56.2	56.3	48.5	51	53.5	53.4	50.4	50.9	56.5	55.4	53.5	53.7	54.7	52.7
45	45	53.2	55.9	56.4	56.5	54.9	56.1	56.2	48.2	50.9	53.5	53.5	50.5	50.9	56.4	55.3	53.6	53.8	54.8	52.8
50	44.4	53.5	56.1	56.6	56.6	55.1	56.2	56.3	48.3	51.2	53.8	53.7	50.5	50.9	56.5	55.5	53.9	53.9	55	52.7
55	44	53.4	56.1	56.5	56.7	54.9	56.2	56.4	48.2	51	53.8	53.8	50.6	50.8	56.5	55.5	54	54	55	53.2
60	43.6	53.1	55.9	56.3	56.4	54.7	56	56.1	47.9	50.8	53.7	53.6	50.5	50.8	56.3	55.2	53.7	53.8	54.9	52.9
65	43.1	53.1	55.8	56.2	56.3	54.6	55.9	56	47.8	50.8	53.6	53.5	50.5	50.7	56.2	55.2	53.7	53.9	54.8	53
70	42.7	53.3	56.1	56.5	56.5	54.9	56.1	56.1	48	51.1	54	53.9	50.8	50.9	56.4	55.4	54	54.3	55.1	53.3
75	42.2	52.9	55.7	56.3	56.3	54.5	55.9	55.9	47.5	50.6	53.8	53.7	50.4	50.6	56.2	55.3	53.8	54.2	55	53
80	41.8	52.3	55.1	55.6	55.7	53.9	55.2	55.4	47	50.2	53.4	53.4	50.5	50.6	55.6	54.8	53.5	53.6	54.7	52.5
85	41.4	52.6	55.1	55.7	55.9	54	55.5	55.5	47	50.2	53.3	53.4	50.4	50.5	55.8	54.9	53.6	53.8	54.7	52.9
90	41	52	54.5	55.1	55.4	53.2	54.9	55.1	46.4	49.7	53	53.2	50.4	50.3	55.2	54.6	53.3	53.4	54.4	52.5
95	40.6	52.2	54.8	55.5	55.6	53.7	55.1	55.3	46.7	50	53.3	53.4	50.3	50.3	55.5	54.9	53.6	53.9	54.6	52.8
100	40.3	51.9	54.66	55.1	55.3	53.3	54.9	55	46.6	49.8	53.1	53.3	50.7	50.6	55.2	54.7	53.5	53.6	54.6	52.7

## ANNEXE C

105	40	51.7	54.2	54.9	55.1	52.9	54.6	54.8	46.2	49.5	52.8	53.1	50.3	50.2	54.9	54.4	53.4	53.4	54.4	52.7
110	39.7	51.5	54	54.7	54.9	52.8	54.4	54.7	46	49.4	52.9	53.1	50.1	50.1	54.8	54.5	53.3	53.5	54.3	52.7
115	39.4	51.4	53.9	54.6	54.9	52.6	54.3	54.5	46	49.3	52.7	53.1	50.1	50.1	54.6	54.3	53.2	53.3	54.1	52.4
120	39	51.2	53.7	54.4	54.7	52.4	54.2	54.1	45.7	49.2	52.7	52.9	50.2	50.2	54.4	54.1	53.1	53.3	54.1	52.1
125	38.8	51.5	54	54.8	54.9	52.9	54.4	54.5	46.1	49.4	52.9	53.2	50.1	50.2	54.8	54.4	53.3	53.6	54.4	52.3
130	38.6	51.4	54.1	54.7	54.9	52.7	54.3	54.4	46.3	49.7	52.9	53.1	50.2	50.1	54.7	54.2	53.4	53.4	54.4	52.4
135	38.2	51	53.5	54.3	54.5	52.2	54	54.1	45.5	49	52.7	53.2	50.2	50.3	54.3	54.2	53.3	53.6	54.3	52.4
140	38	50.9	53.4	54.2	54.5	52.1	53.9	54.2	45.6	48.9	52.8	53.1	50.3	50.3	54.3	54.1	53.3	53.5	54.3	52.2
145	37.6	51.3	53.9	54.6	54.8	52.7	54.3	54.5	45.9	49.4	53.1	53.4	50.5	50.5	54.7	54.4	53.7	53.8	54.7	52.6
150	37.5	51.2	53.7	54.4	54.7	52.4	54.1	54.4	45.7	49.1	53	53.5	50.7	50.5	54.5	54.4	53.6	53.9	54.6	52.7
155	37.2	51	53.6	54.4	54.6	52.4	54	54.2	45.7	49	53	53.6	50.3	50.5	54.4	54.5	53.7	53.9	54.7	52.2
160	37.1	51.1	53.7	54.5	54.6	52.5	54.1	54.3	45.9	49.3	53.3	53.6	50.7	50.5	54.5	54.3	53.8	53.7	54.7	52.9
165	36.8	51	53.7	54.4	54.6	52.5	54	54.2	45.8	49.1	53.2	53.6	50.4	50.4	54.4	54.3	53.7	53.9	54.7	52.7
170	36.6	51	53.6	54.4	54.6	52.4	54	54.2	45.8	49.1	53.2	53.7	50.6	50.5	54.4	54.3	53.8	54	54.8	53
175	36.3	50.8	53.5	54.1	54.2	52.2	53.8	53.9	45.7	49.1	53	53.4	50.5	50.4	54.2	54.1	53.6	53.8	54.6	52.9
180	36.1	51.1	53.9	54.5	54.6	52.6	54.1	54.3	46.1	49.6	53.4	53.8	50.7	50.7	54.7	54.5	54	54.3	54.9	53
185	35.8	50.8	53.4	54.2	54.3	52.2	53.8	54	45.6	49	53.2	53.6	50.7	50.5	54.2	54.1	53.8	53.9	54.8	53
190	35.6	50.4	53.1	53.9	54.1	51.8	53.5	53.6	45.4	48.9	52.9	53.4	50.5	50.4	53.9	53.9	53.5	53.9	54.5	52.4
195	35.4	50.4	53.1	53.7	53.9	51.6	53.4	53.5	45.5	48.8	52.7	53.3	50.5	50.3	53.8	53.7	53.7	53.7	54.5	52.7
200	35.3	50.7	53.4	54.1	54.2	52.1	53.7	53.8	45.6	49.1	53.2	53.8	50.7	50.6	54.1	54.1	53.8	54.1	54.8	52.8
205	35.1	50.9	53.5	54.3	54.4	52.2	53.8	54.1	45.8	49	53.2	54	50.8	50.7	54.3	54.2	54.2	54.3	55	53
210	34.9	50.7	53.3	54.1	54.3	52.1	53.7	53.9	45.6	48.9	53.1	53.8	50.6	50.7	54.2	54.1	53.9	54.2	55	52.8
215	34.7	49.8	52.4	53.3	53.5	51.1	53	53.2	44.8	48.2	52.6	53.4	50.6	50.5	53.4	53.5	53.6	53.7	54.5	52.5
220	34.6	50.6	53.3	54.1	54.2	51.9	53.6	53.7	45.7	49	53.1	53.9	50.6	50.6	54.1	54	54.1	54.3	55	53.1
225	34.3	50.4	52.9	53.8	53.9	51.7	53.4	53.5	45.2	48.5	52.9	52.7	50.6	50.4	53.7	53.8	53.9	54.1	54.8	53.1
230	34.2	50.4	53	53.8	53.9	51.7	53.4	53.5	45.4	48.7	52.9	53.7	50.5	50.4	53.8	53.8	54	54.2	54.8	53.1
235	34	50	52.7	53.5	53.6	51.4	53.1	53.2	45	48.3	52.8	53.6	50.5	50.4	53.5	53.6	53.8	54	54.7	52.9
240	33.8	49.4	52	52.8	53	50.7	52.5	52.8	44.5	47.9	52.1	53.3	50.3	50.2	52.9	53.1	53.5	53.6	54.3	52.6
245	33.8	49.2	51.7	52.6	52.9	50.4	52.3	52.4	44.2	47.6	52	53	50.1	50.1	52.8	52.8	53.5	53.6	54.3	52.6
250	33.6	48.9	51.3	52.2	52.5	49.8	51.9	52	44	47.6	51.7	52.9	50.3	50.3	52.3	52.6	53.1	53.2	53.9	51.9
255	33.5	48.8	51.3	52.3	52.5	49.5	51.9	51.8	43.9	47.4	51.5	53.2	50.1	50.2	52.3	52.8	53.2	53.5	54.1	51.8
260	33.3	49.1	51.7	52.6	52.8	50.2	52.1	52.3	44.3	47.8	52.1	53.2	50.2	50.1	52.6	52.8	53.4	53.4	54.2	52.6

## ANNEXE C

265	33.2	49.9	52.5	53.3	53.5	51.1	52.9	53	45.2	48.6	52.5	53.7	50.5	50.4	53.4	53.4	54	54.3	54.7	52.6
270	33.1	50	52.5	53.4	53.6	51.3	53	53.2	45	48.3	52.8	54.1	51	50.7	53.5	53.5	54.2	54.2	54.9	53.2
275	32.9	49.7	52.4	53.2	53.3	51	52.8	53	44.9	48.2	52.7	53.9	50.7	50.6	53.3	53.4	54.2	54.2	54.8	53
280	32.8	49.3	52.1	52.8	52.9	50.7	52.4	52.5	44.9	48.2	52.5	53.7	50.7	50.5	52.8	53.1	53.9	54	54.7	52.8
285	32.6	49.6	52.2	53.1	53.2	50.9	52.6	52.9	44.7	48	52.6	53.9	50.5	50.6	53.1	53.3	54.1	54.3	54.8	53
290	32.5	48.9	51.7	52.4	52.6	50.4	52	52.3	44.4	47.8	52.2	53.6	50.7	50.5	52.6	52.9	53.9	53.9	54.6	52.7
295	32.4	48.5	51	52	52.2	49.5	51.6	51.7	43.6	47.2	51.6	53.1	50.2	50.1	52	52.3	53.3	53.4	54	52.2
300	32.3	48.5	51.1	51.9	52.2	49.8	51.5	51.9	43.9	47.2	51.7	53.3	50.5	50.2	52.1	52.5	53.6	53.6	54.2	52.4
305	32.1	48.5	51	51.9	52.1	49.7	51.5	51.8	43.9	47.2	51.5	53.2	50.4	50.1	52	52.3	53.5	53.4	54.1	52.5
310	32	49.1	51.7	52.5	52.7	50.4	52.1	52.3	44.5	47.8	52.2	53.7	50.9	50.5	52.5	52.7	54.1	54.1	54.7	52.9
315	32	49	51.6	52.5	52.6	50.2	52	52.3	44.2	47.5	52.2	53.7	50.7	50.6	52.6	52.7	54	54	54.7	52.5
320	31.8	48.6	51.2	52.1	52.2	49.9	51.7	51.9	44	47.3	51.9	53.4	50.7	50.4	52.2	52.3	53.7	53.7	54.3	52.6
325	31.7	48.7	51.3	52.3	52.4	50.1	51.8	52.1	44.1	47.4	52	53.7	50.6	50.5	52.3	52.5	54	54	54.6	52.5
330	31.6	48.5	51	52	52.1	49.7	51.5	51.8	43.7	47.1	51.7	53.5	50.4	50.3	52	52.3	53.8	53.7	54.3	52.5
335	31.5	48.2	50.8	51.8	51.9	49.6	51.3	51.7	43.6	46.8	51.7	53.4	50.6	50.3	51.9	52.2	53.7	53.6	54.2	52.4
340	31.5	48	50.5	51.5	51.7	49.3	51	51.4	43.4	46.7	51.3	53.1	50.6	50.3	51.6	51.8	53.5	53.4	54.1	52.1
345	31.3	47.8	50.4	51.3	51.5	49.2	50.9	51.3	43.4	46.6	51.2	53.1	50.5	50.1	51.5	51.8	53.5	53.4	53.9	52
350	31.3	47.6	50.1	51.1	51.3	49	50.6	51.1	43.1	46.5	51	53	50.4	50.1	51.2	51.6	53.3	53.2	53.8	51.9
355	31.1	47.5	50.1	51	51.2	48.8	50.6	51	43	46.4	51	52.9	50.2	50	51.2	51.5	53.3	53.1	53.8	51.9
360	31.1	47.4	50	51	51.2	48.8	50.6	51	43	46.4	51	53	50.3	50	51.2	51.4	53.3	53.2	53.8	51.8
365	31	47.5	50.1	51	51.2	48.8	50.6	51	43.2	46.4	50.9	53.1	50.2	49.9	51.2	51.5	53.4	53.2	53.9	51.9
370	30.9	47.4	50	51	51.1	48.8	50.5	50.9	43.1	46.4	50.9	53	50.2	49.9	51.1	51.3	53.2	53.3	53.9	51.9
375	30.8	47.4	49.9	50.9	51.1	48.8	50.4	50.8	43	46.3	50.8	53	50.4	50.1	51	51.3	53.4	53.2	53.8	51.8
380	30.7	47.1	49.4	50.5	50.8	48.3	50.1	50.5	42.6	46	50.4	52.7	50	49.8	50.7	50.9	53	52.9	53.5	51.4
385	30.7	47.1	49.5	50.5	50.8	48.3	50.1	50.4	42.8	46	50.4	52.9	50.2	49.8	50.7	51.1	53.2	53.2	53.6	51.6
390	30.6	47.1	49.6	50.6	50.8	48.5	50.2	50.5	42.8	46.1	50.5	52.9	50.2	49.9	50.8	51.1	53.2	53.1	53.7	51.4
395	30.5	47.2	49.5	50.6	50.9	48.3	50.2	50.5	42.8	46	50.5	53.1	50.3	49.9	50.7	51.2	53.5	53.3	53.8	51.5
400	30.4	47.1	49.6	50.6	50.9	48.4	50.2	50.6	42.8	46.1	50.5	53	50.4	50	50.8	51.1	53.4	53.2	53.7	51.5
405	30.4	47	49.5	50.6	50.8	48.3	50.1	50.5	42.8	45.9	50.4	53.2	50.2	49.9	50.7	51.1	53.6	53.3	53.8	51.3
410	30.3	46.9	49.2	50.3	50.6	48	49.9	50.3	42.5	45.8	50.2	52.8	50.2	49.7	50.5	50.7	53.2	52.8	53.5	51.4
415	30.2	46.9	49.3	50.4	50.6	48.2	49.9	50.4	42.7	45.9	50.2	53	50.4	49.9	50.6	50.8	53.4	53.1	53.6	51.3
420	30.2	46.9	49.3	50.3	50.5	48.1	49.8	50.2	42.7	46	50.2	52.9	50.2	49.8	50.4	50.7	53.3	53.1	53.6	51.1

## ANNEXE C

425	30.1	46.9	49.4	50.4	50.5	48.3	50	50.4	42.8	46	50.4	53.1	50.5	50	50.6	50.8	53.5	53.1	53.7	51.1
430	30.1	46.9	49.3	50.3	50.5	48.2	49.8	50.2	42.7	45.9	50.3	53	50.6	50	50.6	50.7	53.4	53.1	53.7	51.0
435	30	46.9	49.3	50.3	50.5	48.1	49.8	50.2	42.8	45.9	50.1	53	50.6	50	50.4	50.7	53.6	53.1	53.8	51.1
440	30	46.8	49.2	50.2	50.4	48	49.7	50.2	42.8	45.9	50	53.1	50.5	49.9	50.3	50.7	53.5	53.1	53.7	50.9
445	29.9	46.8	49.1	50.2	50.4	48	49.7	50.2	42.6	45.7	50	53	50.3	49.8	50.4	50.6	53.5	53.1	53.7	50.8
450	29.8	46.6	49	50.1	50.3	47.9	49.6	50.1	42.5	45.5	49.9	53	50.3	49.7	50.3	50.5	53.4	53.1	53.6	50.6
455	29.8	46.6	49	50	50.2	47.9	49.5	50	42.4	45.5	49.8	53	50.5	49.7	50.2	50.5	53.5	53	53.5	50.8
460	29.7	46.6	49	50	50.2	47.9	49.5	50	42.5	45.6	49.8	53.1	50.3	49.6	50.2	50.5	53.5	53	53.5	50.7
465	29.7	46.4	48.8	49.8	50	47.6	49.3	49.8	42.3	45.4	49.6	52.9	50.4	49.7	50	50.3	53.4	52.8	53.5	50.4
470	29.6	46.2	48.6	49.7	49.9	47.5	49.2	49.7	42.2	45.3	49.5	52.8	50.3	49.7	49.9	50.1	53.3	52.8	53.3	49.9
475	29.5	46.2	48.6	49.6	49.9	47.5	49.2	49.7	42.2	45.3	49.5	52.8	50.2	49.5	49.9	50.1	53.3	52.7	53.4	50
480	29.5	46.1	48.5	49.5	49.8	47.4	49.1	49.6	42.1	45.1	49.3	52.6	50.4	49.6	49.8	49.9	53.3	52.6	53.3	49.6
485	29.5	46.2	48.5	49.6	49.9	47.4	49.1	49.6	42.1	45.1	49.2	52.9	50.2	49.3	49.3	49.8	53.4	52.7	53.3	50
490	29.5	46.2	48.4	49.5	49.8	47.3	49.1	49.6	42.2	45.2	49.2	52.8	50.2	49.3	49.7	50	53.4	52.6	53.3	49.9
495	29.4	46.1	48.3	49.4	49.7	47.3	49	49.5	42	45	49	52.8	50.2	49.3	49.6	50	53.4	52.6	53.2	49.5
500	29.3	46.1	48.4	49.5	49.8	47.3	49	49.5	42.2	45.1	49.2	52.7	50.4	49.3	49.7	49.8	53.3	52.5	53.2	49.4
505	29.3	46	48.3	49.3	49.6	47.3	48.9	49.4	42.1	45.1	49.1	52.6	50.3	49.1	49.6	49.8	53.4	52.4	53.2	49.6
510	29.2	45.9	48.2	49.3	49.6	47.1	48.9	49.4	42	45	48.9	52.6	50.2	49.1	49.5	49.7	53.2	52.4	53.2	49.4
515	29.2	46	48.3	49.4	49.6	47.2	48.9	49.4	42.1	45.2	48.9	52.6	50.1	49	49.6	49.8	53.4	52.4	53.1	49.3
520	29.1	45.9	48.2	49.3	49.5	47.1	48.8	49.3	42	44.9	48.7	52.6	50.1	48.9	49.4	49.7	53.4	52.3	53.1	49.1
525	29.1	45.9	48.2	49.2	49.5	47.1	48.8	49.3	42.1	44.9	48.7	52.6	50.1	48.9	49.5	49.6	53.4	52.2	53	48.9
530	29	45.8	48.1	49.2	49.4	47.1	48.8	49.3	41.9	44.8	48.6	52.5	50.1	48.8	49.5	49.5	53.3	52.1	53	48.8
535	29	45.9	48.1	49.1	49.4	47	48.7	49.2	42	44.8	48.4	52.6	50	48.6	49.3	49.6	53.4	52.1	53	48.9
540	29	45.8	48.1	49.1	49.4	47	48.7	49.1	41.9	44.8	48.3	52.5	49.9	48.5	49.3	49.5	53.3	52	52.9	48.9
545	28.9	45.7	47.9	48.9	49.2	46.8	48.5	49	41.7	44.6	48.4	52.3	50	48.6	49.2	49.3	53.2	51.8	52.9	48.4
550	28.9	45.7	47.9	48.9	49.1	46.8	48.5	49	41.8	44.6	48.1	52.4	50	48.5	49.2	49.3	53.3	51.7	52.8	48.4
555	28.8	45.7	47.9	49	49.3	46.9	48.6	49	41.9	44.5	48.2	52.2	49.8	48.3	49.2	49.3	53.2	51.6	52.9	48.3
560	28.8	45.5	47.8	48.8	49.1	46.7	48.4	48.9	41.7	44.5	48.1	52.1	49.8	48.3	49.1	49	53.2	51.5	52.7	47.9
565	28.7	45.6	47.8	48.9	49.2	46.8	48.5	49	41.8	44.5	48.1	52.2	49.8	48.3	49.1	49.1	53.3	51.5	52.7	47.9

## ANNEXE C

**Tableau n°4 :** La phase de stockage pour la charge avec un débit 0.023 L/s

Le système se démarre le 28/09/2013 à 21 :02 :28 avec un pas du temps de 5min pour chaque enregistrement des données.

$\Delta t$ (min)	Température des thermocouples de [1-20] [°C]																			
	Ré	1	5	9	13	3	7	11	Sort	Entr	21	24	26	28	15	30	25	23	27	22
0	41.6	31.5	31.4	33	35.2	31.3	31.5	34.1	31.3	32	30.5	32.5	34.4	35.2	35.2	32	33.4	32.1	35.1	31.7
5	44.4	31.5	31.3	33	35.2	31.2	31.3	34	31.3	32	30.3	32.6	34.5	35.1	35.2	32.1	33.5	32.2	35.1	31.8
10	54.4	31.8	31.8	33.4	35.4	31.6	31.8	34.4	31.5	32.4	30.7	32.9	34.7	35.4	35.6	32.5	33.9	32.5	35.5	32.2
15	58.5	31.8	32	33.6	35.5	31.7	31.9	34.3	31.6	32.4	30.8	33	34.7	35.4	35.8	32.6	33.8	32.3	35.3	32
20	65.3	31.3	31	33	35.2	31.4	31.8	34.3	31.4	32.2	30.7	32.7	34.5	35.2	35.4	32.2	33.5	32.2	35.3	32
25	53.1	32.4	33.4	36.6	36.7	32.6	35.5	36.1	37.6	53.8	31.3	33.1	34.9	35.5	36.6	33.2	34.2	32.5	35.6	32.3
30	49.8	32.8	37.3	39.5	39.7	35	39.9	39.4	39.6	52	31	33.3	34.3	35	39.1	34.3	34.3	32.8	35.7	32.5
35	50.6	32.6	39.9	41.4	41.8	37.8	41.1	41.6	41.2	52.4	30.7	33.3	33.7	34.6	41.3	34.8	34.2	32.9	35.9	32.4
40	52	32.5	41.6	43.2	43.3	39.7	42.7	43.4	42.5	53.1	29.9	33.1	33.4	34.4	42.6	35.3	34	32.7	36.1	32.2
45	52.9	32.8	43.7	45.1	45	41.4	44.1	44.8	43.9	54.2	29.6	33.3	33.4	34.7	44.4	36	34	32.7	36.2	32.2
50	54.2	33.1	45.4	46.4	46.5	43.4	46	47	45.5	55.7	29.6	33.8	33.6	34.9	46.3	37	34.6	33.1	36.7	32.5
55	55.7	34.4	47.3	48.6	48.8	45.5	48	48.4	46.9	56.9	29.5	34.5	34.1	35.3	48	38	35.2	33.7	37.2	33.2
60	51	34.5	48.4	49.3	49.6	46.6	49.4	49.6	47.9	54	29.2	34.6	33.7	35.2	49.2	38.3	35.4	34.3	38	33.7
65	54.5	36.4	50.4	51.3	51.4	49	50.9	51.1	49.4	55.9	30.3	35.5	34.6	36.1	50.4	39.5	36.5	35.3	38.8	34.6
70	54.9	37.1	51.2	51.9	52.3	49.7	52.1	51.9	50.2	57	30.3	35.9	34.6	36.2	51.5	39.9	36.8	35.5	39.1	35.1
75	51.6	38.2	52.3	52.7	52.9	50.7	52.4	52.8	50.5	54.2	30.8	36.6	35.1	36.8	52.2	40.6	37.5	36.4	39.7	35.7
80	56.8	39	52.6	53.3	53.4	51.1	53.1	53	50.8	57	31.1	37.2	35.6	37.3	52.7	41.1	37.7	36.7	39.8	36.1
85	52.7	40	53.5	54.2	54.4	52.3	53.9	54.1	51.6	55.5	31.7	37.4	35.2	37.1	53.7	41.9	38.2	37.3	40.1	36.8
90	54.3	41.1	54.1	54.4	54.5	52.7	53.9	54.4	51.8	55.1	32.7	38.1	36	37.6	53.8	42.6	38.6	38	40.8	37.6
95	54.7	41.6	54.2	54.6	54.9	53.3	54.5	55	53	57.5	33.3	38.4	36	37.8	54.3	43.5	38.8	38.1	40.9	37.8
100	52.3	42.9	55.1	55.4	55.6	53.9	55.1	55.3	52.8	54.9	33.4	38.5	36.1	38.2	54.7	46.9	39.2	38.8	41.5	38.4
105	55.9	43.6	55	55.2	55.4	54	55	55.4	52.7	56.4	34	38.9	36.6	38.7	54.6	47.8	39.4	39	41.9	38.5
110	54.3	44.2	55.2	55.6	55.8	54	55.2	55.6	53.1	56.5	33.8	38.9	36.5	39	55.2	48.3	39.1	38.7	42	38.4
115	52.3	54.1	55.8	56	56	54.5	55.4	55.7	53.3	54.9	34.3	39.4	36.9	39.8	55.2	49.1	39.6	39.1	42.7	38.8
120	55.7	46.1	56	56.2	56.1	54.9	55.8	56.1	53.5	56.7	35.1	39.9	37.6	40.7	55.3	49.9	39.9	39.8	43.7	39.3
125	54.5	46.6	56.6	56.7	56.7	55.4	56.3	56.5	54.3	57.1	35.4	39.9	37.8	41	56.1	50.5	40.3	40.1	44.3	39.8

## ANNEXE C

130	52.6	47.1	56.6	56.5	56.6	55.4	56.1	56.4	53.9	55.1	35.2	40.2	38.5	41.6	56.3	51.1	40.6	40.2	44.8	39.7
135	54.8	47.7	56.6	56.6	56.7	55.6	56.3	56.4	53.6	55.6	35.2	40.4	39.2	42.1	56	51.2	40.7	40.5	45.3	40.1
140	55	47.9	56.6	56.7	57	55.7	56.4	56.7	54.5	57.5	35.5	40.4	39.5	55.7	56.1	51.4	40.7	40.6	45.7	40.6
145	53	48.6	56.8	57	57	55.9	56.8	57.2	54.2	55.8	36.1	41.1	40.2	43	56.6	51.8	41	40.9	46.2	40.5
150	52.6	49.2	57.2	57.1	57.2	56	56.5	56.8	53.9	54.6	36.5	41.4	40.8	43.4	56.5	52.1	41.5	41.1	46.8	41.3
155	56.3	49.4	56.9	57.1	57	56	56.6	56.9	54.6	58.1	36.9	41.6	41.2	43.7	56.6	52.2	41.6	41.3	47	41.7
160	53.9	49.7	57.2	57.3	57.2	56.3	57	57.3	54.9	56.6	37.2	42	41.8	44.4	56.7	52.3	42.2	42	47.6	42.6
165	52.1	50	57.1	57.4	57.6	56.5	57	57.2	54	54.7	37.1	42.6	41.9	44.5	56.8	52.6	42.9	42.6	47.8	43.2
170	55.2	50.1	56.6	56.9	57.1	56.1	56.7	57.1	53.6	55.7	37.5	43.4	42.6	44.9	56.6	52.7	44	43.6	48.3	43.6
175	54.9	50.6	57.2	57.5	57.5	56.3	56.9	57.2	54.7	57.2	38.6	44.5	43.4	45.6	56.8	52.8	44.8	44.3	48.6	44.5
180	53.2	50.8	57.3	57.4	57.4	56.4	57	57.2	54.3	55.6	39.3	45.3	44.2	46.2	56.9	52.9	45.6	45	49.2	45
185	52	50.9	57.4	57.5	57.5	56.4	56.9	57.3	54.1	54.5	40	45.8	44	46.5	56.6	53.1	46.4	45.8	49.5	45.8
190	56.9	51.1	57	57.1	57.1	56.1	56.7	57.2	54.4	57.7	40.5	46.5	44.6	46.8	56.8	53.4	47.1	46.7	49.7	46.4
195	54.3	51.3	57.3	57.4	57.4	56.3	57	57.4	54.8	56.7	41.2	47.1	45.2	47.3	57.1	53.4	47.6	47.1	50	46.7
200	52.8	51.7	57.5	57.5	57.5	56.5	56.9	57.4	54.4	55.3	41.7	47.7	45.3	47.1	57.1	53.6	48.1	47.7	50.2	47.2
205	52.8	51.8	57.4	57.5	57.5	56.5	56.9	57.2	53.9	54.3	42.7	48	46	47.5	57.1	53.7	48.6	48.2	50.5	47.7
210	56.1	51.9	57.2	57.5	57.6	56.6	57.3	58	55.1	58.4	43.1	48.3	45.7	47.3	56.8	53.7	48.9	48.6	50.6	48
215	54	52.1	57.5	57.8	57.7	56.5	57.2	57.5	54.7	56.2	43	49	46.7	47.8	57.2	54	49.2	48.9	50.8	48.7
220	52.2	52.3	57.7	57.8	57.8	56.8	57.2	57.4	54.3	54.9	43.1	49.2	46.7	47.8	57.3	54.2	49.6	49.4	51.1	48.7
225	54.2	51.9	57	57.3	57.5	56.4	56.9	57.4	53.8	54.7	43.6	49.2	46.2	47.4	57	54.1	49.7	49.6	51.1	49
230	55.6	52.3	57.3	57.5	57.5	56.3	57.1	57.5	55.1	57.8	44	49.6	46.6	47.5	56.8	54.1	49.9	49.9	51.2	49.2
235	53.7	52.3	57.7	57.7	57.6	56.7	57.3	57.5	54.7	56.1	44.5	49.9	46.9	47.9	57.1	54.4	49.9	50	51.2	49.5
240	52.1	52	57.2	57.2	57.4	56.5	56.9	57.4	54.4	54.7	44.1	49.8	47	47.8	56.6	54.2	50.1	50	51.3	49.6
245	56.5	52.4	57.4	57.4	57.5	56.6	57.2	57.4	54.6	57	44.8	50	46.7	47.5	57	54.6	50.5	50.2	51.5	49.8
250	54.5	52.5	57.6	57.8	57.8	56.8	57.4	57.6	55	56.8	44.7	50.1	47.1	47.8	57	54.6	50.4	50.3	51.4	49.9
255	52.7	52.5	57.6	57.7	57.8	56.9	57.4	57.7	54.6	55.3	44.7	50.2	47.4	47.9	56.8	54.6	50.6	50.7	51.7	50
260	51.9	52.5	57.3	57.6	57.7	56.6	56.9	57.4	54	54.2	44.6	50.3	47.1	47.8	57	54.8	50.9	50.8	51.9	50.3
265	56.8	52.6	56.8	57.3	57.5	56.3	57	57.6	54.3	55.6	44.7	50.5	47.8	48	56.9	54.7	50.9	50.9	51.8	50.3
270	54.3	52.8	57.5	57.7	57.7	56.5	57.1	57.5	54.7	56.5	45	50.8	47.7	48.1	57	54.8	50.8	50.9	51.8	50.4
275	52.6	52.7	57.7	57.7	57.8	56.9	57.3	57.5	54.8	55.1	45.2	50.7	47.8	48.3	57.2	55.2	51.2	51.1	51.9	50.5
280	53.9	52.8	57.3	57.5	57.6	56.4	56.9	57.5	54	54.8	45.3	51	47.6	48.1	57.1	55.1	51.2	51.2	52	50.6

## ANNEXE C

285	55.2	52.9	57.6	57.9	58	56.9	57.4	57.7	55.2	57.7	45.5	50.9	47.5	48.1	57.2	55.3	51.3	51.3	52	50.6
290	53.7	53	57.9	57.9	57.8	56.9	57.4	57.5	55	55.9	45.4	51.1	47.6	48.2	57.4	55.5	51.4	51.2	52	50.7
295	52.4	52.5	57.5	57.5	57.3	57.5	56.7	57.1	54.6	54.8	45.3	50.8	47.4	48	57.2	55.6	51.7	51.4	52.1	50.8
300	56.3	52.6	57.1	57.1	57.3	56.3	56.7	57.4	54.3	56.2	45.3	51	47.6	48	56.8	55.2	51.4	51.3	52.1	50.9
305	54.8	53	57.6	57.9	57.9	56.7	57.4	57.6	55.1	56.8	45.1	50.9	47.4	48	57.1	55.4	51.5	51.5	52.3	50.9
310	53	53.1	57.7	58	58.1	57.1	57.6	57.8	54.7	55.4	45	51.1	47.8	48.3	57.2	55.6	51.5	51.6	52.3	50.9
315	51.8	52.7	57	57.3	57.5	56.4	56.9	57.5	54	54.4	44.9	51	48	48.4	56.9	55.1	51.1	51.3	52	50.8
320	57	52.7	56.5	57.1	57.3	56	56.6	57.3	54	56.9	44.9	51.1	48	48.5	56.8	55.1	51.2	51.2	51.9	50.6
325	54.2	52.8	57.1	57.6	57.7	56.5	57.4	57.7	54.8	56.5	44.8	51.2	48.3	48.6	56.9	55.2	51.4	51.5	52.3	50.9
330	52.7	53.1	57.7	57.8	57.9	57	57.6	57.9	54.8	55.5	45.4	51.3	48	48.6	57.1	55.6	51.7	51.9	52.5	51.2
335	52.6	53.1	57.4	57.8	58	56.8	57.3	57.8	54.2	54.4	45.4	51.7	48.4	48.7	57.1	55.6	51.8	51.7	52.7	51.2
340	56	53.5	57.7	58	58.1	57	57.5	57.9	55	58.1	45.7	51.5	48.4	49.1	57.1	55.6	52	52	52.7	51.4
345	53.5	52.9	57.8	57.9	58	57.2	57.7	57.8	55.1	56.2	45.9	51.5	48.1	48.9	57.5	55.9	51.9	51.8	52.5	51.2
350	52.4	53.1	57.7	58	58.1	57.1	57.6	58	54.6	55	45.6	51.5	48.2	49	57.1	55.7	52	52.1	52.8	51.3
355	54.7	53.3	57.4	57.9	58.1	56.8	57.4	57.9	54.3	55.5	45.5	51.5	48.2	49	57.2	55.6	52.1	52.9	51.4	51.4
360	55.3	53.5	57.8	58.1	58.1	56.8	57.3	57.7	55.1	57.4	45.6	51.6	48.3	49.3	57.4	55.7	51.9	52	52.7	51.2
365	53.4	53.4	57.9	58.2	58.2	57.1	57.6	57.9	54.9	57.7	45.5	51.6	48.3	49.6	57.3	55.8	52	52	52.8	51.5
370	52.1	53.3	57.7	57.9	58	57	57.4	57.7	54.3	57.6	45.5	51.3	48	49.5	57.1	55.5	51.8	51.9	52.6	51.3
375	57.9	53	57.1	57.5	57.6	56.5	57.1	57.6	54.4	56.7	46	51.7	48.1	49.7	57.1	55.5	51.8	51.9	52.7	51.6
380	54.6	53.1	57.4	57.8	57.8	56.5	57	57.6	54.7	56.7	45.3	51.4	48.1	49.9	57.4	55.6	51.7	51.7	52.6	51.9
385	53	53.3	57.9	58	58.1	57.2	57.8	58	54.9	55.6	45.9	51.7	48.1	50	57.1	55.8	52.1	52.2	53	51.6
390	51.8	53.2	57.6	57.9	58.1	57	57.4	57.9	54.5	54.5	46.2	51.7	48.1	50.3	57.2	55.8	52.1	52.2	53.1	51.7
395	57.1	53.2	57.2	57.7	57.8	56.8	57.3	57.8	54.9	57.8	46.4	51.7	48.5	50.6	57	55.5	51.9	52.1	52.9	51.7
400	54.1	53.3	57.5	58	58.1	57	57.8	58.1	55.1	56.8	45.8	51.8	48.7	50.6	57	55.5	51.9	52.1	53	51.5
405	52.5	53.5	58	58.2	58.4	57.5	58	58.2	54.7	55.4	46.4	52	48.4	51	57.5	56.1	52.4	52.5	53.3	51.5
410	51.7	52.7	56.8	57.3	57.6	56.4	56.8	57.6	53.9	53.9	45.8	51.5	47.4	50.4	57.1	55.6	51.9	52.1	52.8	51.7
415	56.3	53.1	57	57.7	57.8	56.6	57.5	57.7	54.7	58	45.7	51.5	48.3	51.2	57	55.4	52.1	52.1	53.1	51.4
420	54	52.6	56.9	57.4	57.5	56.2	57.1	57.6	54.5	55.9	45.7	51.4	47.8	50.9	57.1	55.4	51.6	51.8	52.8	51.3
425	52.6	52.8	57.4	57.5	57.6	56.4	56.7	57.3	54	54.5	45.6	51.5	47.5	50.9	57.3	55.8	51.8	51.9	52.8	51.3
430	54.4	52.5	56.6	57	57.2	55.7	56.1	56.9	53.3	53.4	44.6	51.2	47.8	51.3	56.9	55.1	51.6	51.6	52.7	50.9
435	56.1	52.6	56.7	57.2	57.3	55.8	56.4	57.1	54.4	57.2	45	51.3	47.7	50.8	57	55.3	52	51.9	51.9	51.2



## ANNEXE C

440	53.8	52.3	57.2	57.4	57.6	56.2	57	57.6	54.6	55.8	45.8	51.6	47.9	51.1	57.2	55.6	51.8	52.9	51.2	51.2
445	52.2	52.8	57.3	57.5	57.7	56.6	57.2	57.7	54.2	54.8	45.5	51.6	48.2	51.5	57	55.4	51.9	52	53.1	51.3
450	56.2	53.3	57.3	57.7	57.9	56.8	57.3	57.9	54.1	55.5	46.1	52.1	48.6	51.6	57.3	55.6	52.3	52.4	53.6	51.6
455	55.5	53.2	57.4	57.9	57.8	56.4	57.1	57.8	55	57.5	45.8	52.1	48.8	51.7	57.3	55.6	52.2	52.1	53.5	51.5
460	53.6	53.3	57.7	57.8	57.9	56.7	57.3	57.8	54.7	55.8	45.6	51.9	48.9	52	57.4	55.6	52	52.1	53.6	51.6
465	52.2	53.5	58	57.9	57.9	57	57.2	57.7	54.7	55	46.1	52.2	49	52.1	57.4	55.8	52.4	52.3	53.9	51.5
470	55.4	53.4	57.4	57.9	58.1	57	57.5	58.1	54.4	55.5	46.9	52.2	48.9	51.7	57.5	55.9	52.5	52.5	54.1	52
475	55.4	53	56.9	57.6	57.9	56	56.9	57.6	54.6	57	45.6	51.9	48.5	51.4	57.4	55.8	52.2	52.3	54.1	51.4
480	53.2	53.4	57.9	58.3	58.4	57.3	58.1	58.2	55.1	55.9	45.9	51.9	48.4	51.5	57.8	56.2	52.5	52.6	54.4	52.2
485	52	52.5	57.5	57.8	57.9	56.7	57.6	57.9	53.5	53	46.3	51.8	48.2	51.7	57.3	56.3	52.4	52.3	53.1	51.5
490	51.2	52.7	57.3	57.6	57.8	56.2	57.4	57.8	51.5	52.2	46.5	52	48	52.6	57.7	56.1	52.5	52.3	53.1	51.3
495	56.8	53.4	56.7	57.5	57.6	56.1	57.2	57.7	54	56	46.8	51.7	47.8	51.4	57.6	56	52.3	52.6	53.6	50.8
500	54.4	53.6	57.6	58	58.2	57	57.9	58.3	55.2	57.1	47.4	52.2	48.2	52.1	58	56.7	52.7	52.9	54.4	51.9
505	53.1	53.8	58.2	58.2	58.2	57.3	58	58.4	54.9	55.7	47.1	51.9	48.2	52.4	58.2	56.9	52.8	52.7	54.6	51.8
510	53.2	53.4	57.5	57.8	57.9	56.8	57.4	58	54.1	54.2	47.3	52.1	48.1	52.2	58.1	56.8	52.7	53	54.6	51.9
515	57	53.2	57.3	57.9	57.9	56.5	57.2	57.8	54.7	54.7	46.9	51.8	47.8	51.8	57.8	56.5	52.7	53	54.6	51.6
520	54.5	53.5	57.9	58.3	58.4	56.9	57.9	58.1	54.9	56.5	47	51.8	48.1	52.1	58.2	56.7	52.6	52.9	55.1	51.3
525	52.7	53.2	57.8	58.1	58.3	57.2	57.7	58.2	54.5	54.8	47	51.8	47.9	51.9	57.8	56.6	52.6	52.9	54.9	51.5
530	51.9	53.3	57.5	57.9	57.9	56.6	57.1	57.8	54	54.2	47.4	51.7	48	52	57.8	56.5	52.5	52.8	55.4	51.2
535	56.4	53.8	57.6	58.3	58.4	57.1	57.9	58.4	55.2	58.2	47.8	52.2	48.6	52.6	58.3	56.9	53	53	55.6	51.8
540	53.9	53.4	58.1	58.3	58.4	57.5	58.3	58.5	55.1	56.5	48.1	52.2	48.5	52.2	58.4	57.2	53.2	53.3	56	52.3
545	52.4	53.2	57.8	58.2	58.3	57.3	57.9	58.4	54.5	55.1	48.4	51.9	48.1	51.9	58	57	52.7	53	55.7	52
550	57.7	53.5	57.6	58	58.2	56.8	57.4	58	54	55.5	48.8	52.1	48.6	52.3	58.2	56.9	53	53.3	55.9	51.9
555	55.3	53.4	57.8	58.4	58.6	57.4	58.1	58.5	55.4	57.6	49	52.2	48.5	52	58.3	57	53.1	53.2	55.9	52
560	53.4	53.7	58.3	58.6	58.6	57.4	58.1	58.4	54.9	55.8	49.1	52.3	49	52.6	58.4	57	52.7	52.8	56	51.6
565	51.8	53.5	58	58.3	58.4	57.3	58	58.4	54.4	54.8	49.6	52.3	48.9	52.3	58.1	56.7	52.9	53.1	56	51.6
570	56.9	53.2	57.3	57.9	58	56.9	57.6	58.2	54.4	57.8	49.9	52	48.9	52.4	57.9	56.6	52.5	52.9	55.5	51.3
575	54.2	53.5	58.2	58.4	58.4	57.4	58.1	58.1	55.1	56.5	50.5	52	49	52.4	58.2	57	53	53.2	55.9	52.2
580	52.4	53.4	58	58.3	58.5	57.5	58.1	58.5	54.6	55	51.1	52.2	49.2	52.1	58.3	57.1	53.2	53.2	56.1	52.1
585	53.5	53.5	57.7	58.1	58.2	56.9	57.5	58	53.9	54.1	51.6	52.1	49.3	52.2	58.2	57	53	52.9	56.1	51.9
590	56.1	53.4	57.6	58.1	58.2	56.8	57.5	58	54.8	58	52.1	52.2	49.4	52	58.1	56.9	52.9	53	55.7	51.7

## ANNEXE C

595	53.6	53.4	57.9	58.2	58.3	57.2	58	58.3	54.8	56.1	52.7	52.3	49.7	52.3	58.3	57	53	53	56.1	51.4
600	52	53.4	58	58.2	58.4	57.2	57.7	58.1	54.2	54.7	53	52.1	49.8	52.3	58.3	57	52.9	52.9	55.9	51.5

**Tableau n°5 : La phase de déstockage pour un débit de 0.023 L /s**

Le système se démarre le 05/10/2013 à 9 :23 :38 avec un pas du temps de 5min pour chaque enregistrement des données.

$\Delta t$ (min)	Température des thermocouples de [1-20] [°C]																			
	Ré	1	5	9	13	3	7	11	Sort	Entr	21	24	26	28	15	30	25	23	27	22
0	48.7	52.5	56.1	56.7	57	55.2	56.1	56.7	49.4	50.6	52.1	55.1	53.8	54.8	57	56.3	56.8	53.3	55.1	52.2
5	48.3	52.3	56.2	56.7	57	55.1	56.3	56.9	49	50.6	52.5	55.1	53.7	54.8	56.9	56.1	56.7	53.2	55	52.2
10	47.5	51.8	55.4	56.2	56.4	54.3	55.9	56.6	48	50.2	52.2	55.1	53.3	53.4	56.5	55.7	56	52.9	54.9	52.2
15	46.6	52.7	56	56.6	56.9	54.6	56.2	56.9	48	50.7	52.8	55.2	53.5	53.7	57	56	56.4	53.5	54.8	52.1
20	46	52.3	55.7	56.2	56.6	54.2	55.6	56.4	47.2	49.9	52.6	55.2	53	53	56.7	56	56.3	53.7	55.1	52.4
25	44.6	52.4	55.8	56.5	56.9	54.7	56.3	57	47.2	50.3	52.9	55.2	53.7	53.7	56.7	55.9	56.2	53.8	55.2	52.5
30	44.6	52	55.3	56.1	56.4	53.7	55.6	56.3	46.5	50	52.6	55.1	53.5	53.6	56.7	55.8	56.1	53.9	55	52.4
35	43.7	52.3	55.8	56.5	56.8	54.6	56.2	56.7	46.8	50.2	52.9	55.2	53.4	53.3	56.7	56.1	56.5	54.1	54.7	52.8
40	43.3	52.5	56.1	56.9	57.1	54.8	56.5	57.1	46.8	50.1	53.3	55.7	53.7	53.8	57	56.3	56.7	54.3	55	53.1
45	42.5	52.4	56	56.7	56.9	54.5	56.2	56.8	46.4	49.9	53.1	55.3	53.3	53.5	56.8	56.1	56.5	54.6	55	53.1
50	41.9	52.2	55.5	55.3	56.3	56.7	54.3	56.7	46.2	50	53.2	55.3	53.2	53.3	56.6	55.9	56.4	54.4	54.7	52.9
55	41.4	52.1	55.6	56.4	56.8	54.4	56.2	56.8	46.1	50	53.3	55.4	53.5	53.5	56.7	56	56.4	54.8	55.1	53.3
60	41	51.9	55.3	56.1	56.6	54.1	55.8	56.4	45.7	49.6	53	55.1	53.1	53.1	56.3	55.8	56.1	54.6	54.9	53.1
65	40.6	51.7	55.1	56.1	56.4	53.8	55.8	56.5	45.6	49.7	53.2	55.1	53.3	53.1	56.5	55.7	56	54.3	54.4	52.7
70	40.1	52	55.3	56.1	56.4	53.7	55.7	56.4	45.6	49.7	53.2	55.1	53.3	53.4	56.4	55.5	56	54.6	54.8	53.1
75	39.6	52	54.9	55.9	56.2	53.6	55.4	56.1	45.3	49.8	53.2	54.9	52.5	52.6	56.2	55.3	55.7	54.4	54.3	52.8
80	39.2	52	55.2	56	56.3	53.6	55.5	56.1	45.4	49.6	53.2	54.9	53.3	53.4	56.5	55.5	55.9	54.6	54.5	53
85	38.6	51.3	54.5	55.6	56	53.2	55.2	56	45	49.2	52.8	54.5	52.6	52.8	55.9	55	55.3	54.4	53.9	52.8
90	38.4	51.1	54.1	55.1	55.6	52.4	54.5	55.3	44.8	49.2	52.4	54.5	52.1	52.1	55.7	55	55.2	54.4	53.9	52.7
95	37.9	51.3	54.4	55.4	55.7	52.8	54.8	55.5	44.7	49.2	52.7	54.4	52.3	52.4	55.8	54.8	55.2	54.2	54	52.6
100	37.8	51.2	54.3	55.3	55.7	52.8	54.8	55.5	44.7	49	52.6	54.4	52.1	52.1	55.7	55.1	55.5	54.6	53.8	53.2
105	37.3	51.2	54.2	55.2	55.5	52.6	54.6	55.4	44.7	49	52.7	54.4	51.9	52	55.7	54.8	55	54.3	53.4	52.7
110	36.6	50.4	53.5	54.7	55.2	52	54.2	55.2	44.4	48.8	52.6	54.2	51.9	52	55.2	54.4	54.6	54	53.5	52.5
115	36.8	51	54.1	55.2	55.5	52.6	54.6	55.3	44.5	48.8	52.5	54	52	52.1	55.5	54.6	55	54.5	53.7	53

## ANNEXE C

<b>120</b>	36.6	50.4	53.5	54.7	55.2	52	54.2	55.2	44.4	48.8	52.6	54.2	51.9	52	55.2	54.4	54.6	54	53.5	52.5
<b>125</b>	37.3	51.2	54.2	55.2	55.5	52.6	54.6	55.4	44.7	49	52.7	54.4	51.9	52	55.7	54.8	55	54.3	53.4	52.7
<b>130</b>	36.6	50.4	53.5	54.7	55.2	52	54.2	55.2	44.4	48.8	52.6	54.2	51.2	52	55.2	54.4	54.6	54	53.5	52.5
<b>135</b>	36.8	51	54.1	55.2	55.5	52.6	54.6	55.3	44.3	48.8	52.5	54	52	52.1	55.5	54.6	55	54.5	53.7	53
<b>140</b>	36.4	50.6	53.9	55	55.4	52.6	54.7	55.4	44.6	49.1	52.8	54.2	52	52.1	55.4	54.4	54.8	54.3	53.4	52.8
<b>145</b>	36.2	50.2	53.3	54.5	55	51.9	54.2	55	44.2	48.8	52.1	54	51.2	51.3	54.9	54.2	54.6	54.3	53.6	53.1
<b>150</b>	36.1	50.7	53.7	54.9	55.3	52.4	54.4	55.3	44.5	48.8	52.9	54.3	52.5	52.5	55.5	54.5	54.8	54.3	53.8	53.1
<b>155</b>	36.2	50.3	53.3	54.6	55	52.1	54.1	55	44.3	48.7	52.5	54	51.9	51.9	55	54.3	54.5	54.1	53.2	52.7
<b>160</b>	36.4	50.7	53.8	54.9	55.3	52.2	54.2	54.9	44.4	48.6	52.7	54.1	52.1	52.2	55.3	54.5	54.8	54.3	53.3	53
<b>165</b>	35.6	50.4	53.6	54.8	55.2	52.4	54.5	55.1	44.3	48.6	52.5	53.6	51.6	51.8	55.1	54.1	54.6	54.4	53.2	52.9
<b>170</b>	35.4	50.2	53.4	54.5	54.9	52.1	54.3	54.9	44.3	48.7	52.3	53.6	51.6	51.7	54.9	54	54.3	54.3	53.2	52.8
<b>175</b>	35.3	50	53	54.3	54.8	51.9	54	54.7	44	48.2	52.3	53.5	51.2	51.2	54.8	54	54.3	54.3	53.1	52.9
<b>180</b>	34.9	50	53.2	54.4	54.8	51.9	54.1	54.8	44.2	48.2	52.6	53.7	51.8	51.8	54.8	53.9	54.1	54	53.1	52.8
<b>185</b>	35	50.2	53.1	54.2	54.6	51.6	53.6	54.5	44	48.5	52.4	52.4	53.7	51.6	51.8	53.9	54	53.9	52.9	53
<b>190</b>	34.7	49.6	52.6	53.7	54.2	51.2	53.5	54.3	43.8	48.3	52	53.3	51.2	51.4	54.2	53.7	53.8	54	52.7	52.9
<b>195</b>	34.6	50.1	53.2	54.3	54.6	51.4	53.6	54.4	44	48.2	52.4	54	51.7	51.8	54.7	54.1	54.3	53.9	52.9	53
<b>200</b>	34.4	49.9	53	54	54.3	51.3	53.4	54.2	43.8	48	52.3	53.8	51.3	51.2	54.3	53.9	54.1	53.9	52.4	53.1
<b>205</b>	34.1	50	53	54	54.4	51.7	53.8	54.5	43.9	48	52.2	53.8	51.5	51.6	54.5	54.1	54.5	54.2	52.9	53.1
<b>210</b>	34	49.8	52.8	53.9	54.2	51.4	53.5	54.3	43.9	47.9	52.4	53.9	51.4	51.2	54.2	53.9	54.3	54.1	52.9	53.3
<b>215</b>	33.7	49.8	52.9	54	54.3	51.3	53.3	54.1	43.7	47.8	52.3	54	51.6	51.5	54.3	53.8	54.1	54	52.8	53.1
<b>220</b>	33.6	49.3	52.3	53.5	53.9	50.8	53	53.9	43.4	47.7	52.1	53.6	50.9	50.6	53.9	53.6	54	53.9	52.4	53
<b>225</b>	33.2	49.4	52.5	53.6	54	51.2	53.4	54.1	43.6	47.6	52	53.6	51.5	51.6	54.1	53.7	54.3	54.2	52.9	53.1
<b>230</b>	32.8	49.1	52.4	53.6	53.9	51	52.9	53.6	43.3	47.4	51.8	53.7	51.4	51.3	53.9	53.5	54	53.8	52.5	52.9
<b>235</b>	32.8	49	52.1	53.2	53.6	50.7	52.9	53.7	43.4	47.7	51.8	53.5	51.3	51.3	53.6	53.4	54	54	52.6	52.9
<b>240</b>	32.7	48.9	51.9	53.1	53.4	50.2	52.4	53.3	43.1	47.3	51.6	53.5	51	51.1	53.7	53.3	53.9	53.8	52.5	52.6
<b>245</b>	32.7	48.9	52	53.2	53.5	50.3	52.5	52.5	43.2	47.4	51.7	53.6	51.3	51.4	53.6	53.2	53.8	53.6	52.5	52.8
<b>250</b>	32.2	48.6	51.7	53	53.4	50.3	52.4	53.1	42.8	47	51.3	53.2	51.1	51.2	53.5	53.1	53.7	53.7	52.5	52.5
<b>255</b>	32.4	48.9	51.8	53	53.3	50.3	52.4	53.1	43	47.2	51.4	53.4	51.2	51.4	53.5	53.2	53.9	53.8	52.6	52.7
<b>260</b>	32	49	52.2	53.3	53.6	50.7	52.6	53.3	43.2	47.4	51.6	53.8	52	51.9	53.6	53.3	54.1	53.9	52.9	53
<b>265</b>	32	48.6	51.6	52.7	53.2	50.4	52.4	53.2	43.1	47.3	51.5	53.5	51.3	51.2	53.2	53	53.9	53.8	52.7	52.9
<b>270</b>	32	48.6	51.7	52.9	53.2	50	52.3	53	42.9	47	51.2	53.3	51.2	51.2	53.3	52.9	53.9	53.9	52.7	52.8

## ANNEXE C

<b>275</b>	31.4	48.3	51.3	52.7	53.1	50	52.3	53.2	43	47	51.3	53.4	51.1	51	53	52.9	54	53.9	52.6	52.9
<b>280</b>	31.4	48.1	51	52.3	52.9	49.5	51.9	52.8	42.7	46.8	50.9	53.3	51.3	51.2	52.9	52.8	53.8	53.8	52.9	52.8
<b>285</b>	31.3	48.1	51.2	52.5	53	49.8	52.1	52.9	42.8	46.7	51	53.4	51.1	51	53	52.9	54.1	54	52.9	53
<b>290</b>	31.5	48.1	50.9	52.3	52.8	49.3	51.5	52.5	42.6	46.7	50.6	53.3	51.2	51	52.7	52.7	53.8	53.8	52.8	53
<b>295</b>	30.9	48	51	52.3	52.8	49.8	52	52.8	42.7	46.7	50.9	53.3	51	51	52.7	52.7	54	53.9	52.9	52.9
<b>300</b>	30.9	47.6	50.6	51.9	52.3	49.1	51.5	52.4	42.5	46.9	50.9	53.5	50.9	50.8	52.6	52.4	53.7	53.7	52.6	52.4
<b>305</b>	30.9	48	50.9	52.1	52.5	49.5	51.7	52.5	42.7	46.9	51.1	53.5	51.8	51.9	52.7	52.5	53.9	53.7	52.4	52.6
<b>310</b>	30.9	48	50.9	52.2	52.6	49.3	51.4	52.3	42.5	46.5	50.7	53.3	51.2	51.3	52.6	52.4	53.9	53.7	52.6	52.7
<b>315</b>	30.7	48	50.9	52.1	52.4	49.3	51.4	52.1	42.5	46.8	50.7	53.4	51.5	51.5	52.6	52.5	54	53.7	52.8	52.6
<b>320</b>	30.4	47.7	50.8	52.1	52.6	49.7	51.8	52.6	42.6	46.5	50.8	53.3	51.1	51.1	52.6	52.4	54.1	53.8	52.7	52.8
<b>325</b>	30.2	47.9	50.9	52.3	52.7	49.7	51.9	52.6	42.7	46.6	50.9	53.5	51.3	51.3	52.5	52.5	54.3	53.9	53	53
<b>330</b>	30.5	47.7	50.6	51.8	52.2	48.8	51.1	52	42.2	46.2	50.5	53.5	51.4	51.3	52.3	52.2	53.8	53.7	52.8	52.5
<b>335</b>	30.4	47.9	50.8	52	52.4	49.2	51.2	52	42.3	46.2	50.6	53.3	51.4	51.5	52.3	52.2	54	53.8	53	52.8
<b>340</b>	30.3	47.5	50.3	51.5	51.9	48.4	50.8	51.8	42.1	46.3	50.4	53.7	51.5	51.5	51.9	52	53.8	53.6	52.7	52.8
<b>345</b>	30	47.8	50.7	52	52.4	49.5	51.5	52.4	42.6	46.4	51	53.9	51.8	51.7	52.5	52.4	54.3	53.8	52.9	52.9
<b>350</b>	30.1	47.8	50.6	52	52.4	49.2	51.1	52.1	42.3	46	50.7	53.5	51.3	51.2	52.3	52.2	54.1	53.7	52.8	52.8
<b>355</b>	29.8	47.3	50.1	51.4	51.9	48.7	51	51.8	42.4	46.6	50.2	53.4	51.3	51	51.9	51.8	54	53.4	52.5	52.5
<b>360</b>	29.8	47.4	50.4	51.6	51.9	48.7	51	51.8	42.3	46.1	50.3	53.7	51.8	51.4	52.1	52.1	54.2	53.7	52.8	52.8
<b>365</b>	29.8	47.6	50.6	51.8	52.1	49.1	51.2	51.8	42.3	46	50.4	53.6	52.1	51.6	52.2	52.1	54.4	53.9	53.1	52.9
<b>370</b>	29.6	47.2	50.3	51.6	51.9	48.8	50.9	51.7	42	45.8	50.1	53.4	51.7	51.3	52	51.9	54.1	53.7	52.8	52.7
<b>375</b>	29.4	47	50.1	51.5	51.9	48.9	51.1	51.9	42.2	46.1	50.3	53.6	51.6	51.1	51.8	51.8	54	53.6	52.7	52.8
<b>380</b>	29.5	47.1	50	51.3	51.7	48.5	50.5	51.4	41.9	45.6	49.9	53.4	51.8	51.3	51.7	51.7	54	53.7	52.9	52.7
<b>385</b>	29.3	47.3	50.2	51.5	51.9	48.9	51	51.7	42.1	45.9	50	53.4	51.7	51.1	51.7	51.8	54.3	53.8	52.8	52.9
<b>390</b>	29.1	47	49.8	51.3	51.8	48.7	50.8	51.7	42	45.8	50.1	53.4	51.5	51.1	51.5	51.5	54	53.7	52.9	52.8
<b>395</b>	29.2	47.1	50	51.4	51.8	48.6	50.7	51.5	41.9	45.6	49.9	53.4	51.8	51.3	51.6	51.6	54.2	53.8	53.1	52.8
<b>400</b>	29	47.3	50.2	51.6	52	49	50.9	51.6	42	45.6	50.2	53.8	52.2	51.7	51.9	51.9	54.5	54.2	53.4	53.1
<b>405</b>	29.1	47.2	50	51.3	51.7	48.7	50.6	51.4	41.8	45.4	50.1	53.5	51.7	51.4	51.8	51.6	54.3	53.7	52.8	52.6
<b>410</b>	29.1	46.9	49.7	51.1	51.5	48.2	50.3	51.2	41.8	45.5	49.9	53.5	51.8	51.3	51.6	51.4	54	53.6	52.8	52.5
<b>415</b>	28.7	46.7	49.6	51	51.5	48.5	50.6	51.4	41.7	45.5	49.9	53.2	51.7	51.4	51.2	51.1	53.9	53.7	53	52.6
<b>420</b>	28.7	46.3	49.1	50.6	51.2	47.7	50.1	51	41.5	45.2	49.5	53.2	51.6	51	51.1	51.1	54	53.5	52.7	52.4
<b>425</b>	28.6	46.6	49.4	50.8	51.3	48.1	50.2	50.9	41.4	45.2	49.5	53.2	51.8	51.3	51.2	51.1	54.1	53.6	52.9	52.3

## ANNEXE C

<b>430</b>	28.4	46.4	49.3	50.6	51.2	48.2	50.2	51.1	41.5	45	49.5	53.3	51.8	51.2	51.1	51.1	54.2	53.6	53.1	52.6
<b>435</b>	28.3	46.3	49.2	50.6	51.1	48.1	50.2	51.1	41.5	45.1	49.7	53.4	51.7	51.1	51	50.9	53.3	53.3	52.7	52.3
<b>440</b>	28.6	46.8	49.5	50.9	51.3	48.2	50.1	51	41.5	45	49.5	53.5	51.8	51.3	51.3	51.2	54.3	53.7	52.8	52.6
<b>445</b>	28.3	46.2	48.9	50.4	50.9	47.7	50	50.9	41.5	45.3	49.5	53.5	51.8	51.2	50.9	50.7	53.9	53.2	52.6	52.2
<b>450</b>	28.6	46.4	49	50.5	50.8	47.4	49.7	50.7	41.3	45	49.3	53.5	51.8	51.3	51.1	50.9	54	53.5	52.7	52.2
<b>455</b>	28.2	46.4	49.2	50.5	51	48.1	50.2	51.1	41.7	45.3	49.6	53.6	51.9	51.3	50.9	50.9	54.3	53.7	52.9	52.6
<b>460</b>	28.5	46.3	49.1	50.4	50.8	47.6	49.6	50.5	41.2	44.8	49.2	53.4	51.6	51.1	50.9	50.8	54.1	53.4	52.5	52.1
<b>465</b>	28.3	46.3	49	50.3	50.6	47.5	49.6	50.4	41.2	45	49.2	53.4	51.6	51	50.7	50.6	54	53.3	52.5	52.1
<b>470</b>	27.9	46.3	49.1	50.5	51	47.9	50.1	50.8	41.5	45	49.2	53.4	51.8	51.1	50.7	50.7	54.3	53.9	53.1	52.4
<b>475</b>	28.2	46.3	49.1	50.4	50.7	47.1	49.6	50.5	41.2	45	49.1	53.6	51.6	50.9	50.8	50.6	54.1	53.3	52.8	52.1
<b>480</b>	27.8	46	48.8	50.3	50.8	47.7	49.8	50.5	41.2	44.7	48.8	53.5	51.8	51.3	50.8	50.6	54.2	53.4	52.8	52.1
<b>485</b>	28.2	46.3	49	50.3	50.6	47.4	49.6	50.6	50.5	47.4	49.1	53.5	51.7	51	50.6	50.5	54.2	53.3	52.6	52.2
<b>490</b>	27.7	45.9	48.8	50.2	50.7	47.6	49.7	50.5	41.3	44.9	48.6	53.2	51.7	51.1	50.5	50.5	54.3	53.5	52.8	51.9
<b>495</b>	27.9	46.2	48.9	50.4	50.7	47.5	49.6	50.4	41.1	44.5	48.9	53.4	51.6	50.9	50.5	50.4	54.1	53.5	52.9	52
<b>500</b>	27.6	46	48.9	50.3	50.7	47.6	49.7	50.6	41.3	44.8	49	53.7	51.8	51.2	50.6	50.5	54.3	53.4	52.8	51.8
<b>505</b>	27.7	46.1	48.7	50	50.4	47.3	49.4	50.2	41	44.6	48.9	53.5	51.9	51.3	50.6	50.4	54.3	53.5	53	51.6
<b>510</b>	27.7	46.3	48.9	50.2	50.6	47.5	49.5	50.3	41.1	44.5	48.9	53.8	52.1	51.4	50.7	50.6	54.7	53.6	53	51.8
<b>515</b>	27.2	45.8	48.6	50	50.4	47.4	49.5	50.4	41	44.5	48.9	53.7	51.9	51.2	50.4	50.2	54.2	53.4	52.7	51.3
<b>520</b>	27.3	45.7	48.4	49.8	50.2	47	49.1	50.1	40.8	44.5	48.6	53.5	51.4	50.6	50.4	50.3	54.4	53.3	52.5	51.3
<b>525</b>	27.4	45.7	48.3	49.6	50.2	47	49.1	50	40.8	44.6	48.3	53.3	51.7	50.9	50.1	50.1	54.4	53.3	52.6	51.1
<b>530</b>	27.3	45.5	48.3	49.8	50.1	46.6	48.9	49.7	40.6	44	47.9	53.1	51.3	50.8	49.9	49.9	54.2	53.2	52.6	50.9
<b>535</b>	27.2	45.7	48.5	49.8	50.1	47	49	49.9	40.8	44.4	48.5	53.4	51.6	50.8	49.9	49.9	54.2	53.3	52.7	50.9
<b>540</b>	27.1	45.6	48.3	49.8	50.2	46.8	48.9	49.7	40.7	44.2	47.9	53.2	51.7	50.9	49.7	49.8	54.2	53.1	52.6	50.6
<b>545</b>	27.2	45.8	48.4	49.8	50.2	47.1	49.1	49.8	40.8	44.2	48	53.2	51.6	50.8	50	49.9	54.6	53.2	52.7	50.8
<b>550</b>	27.2	45.7	48.3	49.6	50.1	46.8	48.9	49.7	40.8	44.3	47.9	53.3	51.7	50.7	49.9	49.9	54.6	53.3	52.7	50.8
<b>555</b>	26.8	45.3	48.1	49.5	49.8	46.8	48.9	49.7	40.5	44.2	48	53.3	51.5	50.8	49.7	49.5	54.1	53	52.6	50
<b>560</b>	27	45.3	48	49.4	49.6	46.5	48.6	49.4	40.4	44	47.8	53.4	51.7	50.9	49.8	49.7	54.3	53	52.7	50.2
<b>565</b>	26.9	45.1	47.8	49.2	49.7	46.6	48.7	49.6	40.7	44.4	47.7	53.1	51.2	50.1	49.5	49.3	54.1	52.7	52.2	49.9
<b>570</b>	26.9	45.1	48	49.3	49.6	46.4	48.5	49.2	40.3	44.2	47.3	52.8	50.9	49.9	49.4	49.4	54.3	52.9	52.2	49.7
<b>575</b>	26.7	45	47.8	49.3	49.7	46.7	48.7	49.4	40.3	43.8	47.5	52.8	51.1	50.2	49.5	49.4	54.3	52.9	52.3	49.6
<b>580</b>	26.8	45.1	47.8	49.2	49.4	46.4	48.5	49.3	40.4	44	47.4	53	51.1	50.3	49.6	49.3	54.2	52.8	52.3	49.6

## ANNEXE C

<b>585</b>	26.8	45.3	47.9	49.3	49.7	46.5	48.5	49.3	40.3	43.9	47.6	53.2	51.6	50.5	49.6	49.3	54.2	52.6	52.3	49.4
<b>590</b>	26.8	45	47.7	49	49.3	46.2	48.3	49.2	40.4	43.9	47.3	53.2	51.3	50.1	49.3	49.3	54.2	52.5	52.1	49.3
<b>595</b>	26.6	44.7	47.3	48.7	49.1	45.8	48.1	49	40.1	43.8	47.1	53	51	49.8	49.1	49	53.9	52.4	52	48.9
<b>600</b>	26.5	44.8	47.4	49	49.3	46.2	48.4	49.3	40.3	43.8	47.2	52.8	50.8	49.6	49	49	54.1	52.6	52.1	49.1
<b>605</b>	26.5	44.5	47.2	48.6	49.1	46.1	48.2	49	40.2	43.6	46.6	52.7	50.7	49.4	49	48.8	54.1	52.3	52	48.5
<b>610</b>	26.4	44.6	47.2	48.5	48.9	45.7	47.7	48.5	39.8	43.2	46.4	52.7	50.7	49.1	48.9	48.7	54.2	51.9	51.8	48.1
<b>615</b>	26.2	44.3	46.9	48.2	48.6	45.1	47.6	48.3	39.6	43.3	46.2	52.6	50.8	49.1	48.6	48.4	54	51.7	52	47.8
<b>620</b>	26.2	44	46.7	48	48.4	45.4	47.2	48	39.5	42.8	45.9	52.3	50.3	48.6	48.4	48	54.1	51.3	51.5	47.6
<b>625</b>	26.1	43.8	46.4	47.7	48.1	45	47.1	48	39.3	43.2	46	52.2	50.3	48.2	48.1	47.8	53.9	50.9	51.3	47.2
<b>630</b>	25.9	43.7	46.3	47.6	47.9	44.7	47	47.9	39.3	43	45.8	52.1	49.9	47.6	47.8	47.6	53.6	50.6	51.2	47
<b>635</b>	25.7	43.7	46.4	47.4	47.7	44.7	47	47.7	39.3	42.8	45.3	51.7	49.6	46.9	47.8	47.6	53.6	50.3	51.2	46.8
<b>640</b>	25.7	43.5	46.2	47.5	47.9	45	46.9	47.6	39.3	42.6	44.8	51.3	49.7	46.6	47.6	47.4	53.7	49.6	50.6	46.2
<b>645</b>	25.6	43.1	45.9	47.2	47.5	44.5	46.5	47.2	39	42.5	44.3	51	49.2	45.9	47.2	47	53.5	49.1	50.3	46
<b>650</b>	25.5	43	45.7	46.9	47.2	44.3	46.3	47.2	39.1	42.6	44.6	50.8	48.9	45.5	47.1	46.8	53.4	48.9	49.8	45.8
<b>655</b>	25.2	43.1	45.6	47.1	47.4	44.4	46.3	46.9	38.6	42.1	44.2	50.6	48.9	45.4	47.1	46.8	53.4	48.9	49.8	45.6
<b>660</b>	25.1	42.8	45.3	46.6	46.9	44	46.1	46.8	38.7	42.3	44.5	50.7	49	45.6	47	46.6	53	48.4	49.7	45.4
<b>665</b>	25.4	43.3	45.8	47	47.2	44.4	46.2	46.8	38.8	42.3	44.1	50.5	48.9	45.5	46.9	46.6	53.2	48.5	49.5	45.6
<b>670</b>	25.2	42.7	45.3	46.6	46.9	44.1	46.1	46.9	38.9	42.3	44.4	50.3	48.7	45.2	46.9	46.4	53	48.1	49.3	45.3
<b>675</b>	25.2	42.6	45	46.5	46.9	44	46	46.8	38.6	42	44.1	50.1	48.4	44.9	46.8	46.4	52.9	48.2	49.1	45.2
<b>680</b>	25.3	42.4	44.8	46.1	46.4	43.4	45.4	46.3	38.2	41.7	44	49.9	48.4	44.9	46.3	46	52.4	47.8	48.7	45
<b>685</b>	25	42.6	45.4	46.6	46.9	44.1	46	46.6	38.7	42.1	43.6	49.6	48.2	44.9	46.7	46.3	52.8	47.8	48.5	49.9
<b>690</b>	25.1	42.6	45.2	46.5	46.7	43.9	45.8	46.6	38.7	42.2	44.1	49.9	48.4	45	46.7	46.2	52.6	47.6	48.3	44.8
<b>695</b>	25	42.5	44.9	46.3	46.7	43.7	45.5	46.2	38.2	41.5	43.7	49.4	48.1	44.7	46.4	46.1	52.2	47.5	48.2	44.8
<b>700</b>	25.1	42.7	44.9	46.2	46.5	43.7	45.6	46.4	38.5	42	43.9	49.5	48	44.7	46.3	45.9	52.1	47.3	48.1	44.8
<b>705</b>	24.9	42.5	45.1	46.5	46.7	44.1	45.9	46.6	38.7	42.1	43.6	49.3	47.7	44.7	46.5	46.1	52.3	47.5	47.9	44.9
<b>710</b>	25.3	42.7	45	46.2	46.5	43.6	45.4	46.2	38.4	41.9	43.8	49.4	48.1	44.8	46.3	45.9	51.8	47.1	47.8	44.8
<b>715</b>	25	42	44.3	45.7	46	43.3	45.1	46	38.1	41.4	43.4	48.6	47.3	44.1	45.9	45.6	51.4	47	47.4	44.5
<b>720</b>	25	42	44.4	45.8	46.1	43.2	45	45.9	38	41.4	43.1	48.5	47.3	44.1	45.9	45.5	51.1	46.6	47.1	44.3
<b>725</b>	25	42	44.5	45.9	46.1	43.3	45.1	45.8	38.1	41.4	43.1	48.1	46.6	43.8	45.9	45.4	51	46.7	47	44.2
<b>730</b>	24.7	42.1	44.7	46	46.2	43.4	45.2	45.8	38.1	41.7	43	48.3	47.1	44.1	46.1	45.7	50.9	46.9	47.1	44.3
<b>735</b>	25	42	44.4	45.6	45.8	42.9	44.9	45.7	37.9	41.6	43.2	48.2	46.8	43.8	45.7	45.3	50.3	46.4	46.9	44.3

## ANNEXE C

<b>740</b>	25	41.9	44.2	45.6	45.9	43	44.6	45.4	37.8	41.1	43	47.7	46.5	43.8	45.8	45.2	50	46.1	46.2	43.8
<b>745</b>	24.9	41.4	43.8	45.1	45.5	42.7	44.6	45.5	37.7	41.1	42.7	47.3	46.1	43.5	45.4	44.9	49.6	46	46.2	43.8
<b>750</b>	24.7	41.5	44	45.3	45.6	42.8	44.8	45.6	37.9	41.4	42.9	47.3	46	43.6	45.5	44.8	49.2	45.7	46	43.6
<b>755</b>	25	42.1	44.2	45.5	45.9	42.9	44.8	45.6	38	41.5	43	47.5	46.3	43.9	45.8	45.2	49.3	45.9	46.3	43.9
<b>760</b>	24.9	42.1	44.3	45.6	45.8	42.9	44.6	45.4	37.9	41.3	42.8	47.2	45.9	43.6	45.8	45	48.9	45.7	45.8	43.7
<b>765</b>	24.9	42.2	44.4	45.6	45.9	43.1	44.8	45.6	38.1	41.5	42.9	47.1	45.8	43.6	45.9	45.2	48.9	45.8	45.9	43.8
<b>770</b>	24.9	42	44.3	45.6	45.8	42.9	44.6	45.4	37.8	41.4	42.9	47	45.7	43.7	45.6	44.9	48.4	45.5	45.9	43.9
<b>775</b>	24.8	42	44.3	45.8	45.8	43	44.9	45.6	38.1	41.8	42.9	46.8	45.7	43.5	45.6	45	48.4	45.5	45.9	43.9
<b>780</b>	24.5	41.8	44.1	45.4	45.6	42.8	44.8	45.4	37.9	41.3	42.8	46.4	45.3	43.5	45.7	49.9	48.1	45.5	45.7	43.7
<b>785</b>	24.7	41.8	44	45.4	45.7	42.8	44.6	45.4	37.9	41.1	42.7	46.3	45.1	43.4	45.6	44.9	47.8	45.4	45.5	43.7
<b>790</b>	24.6	41.3	43.7	45.1	45.4	42.7	44.5	45.2	37.7	40.9	42.3	45.6	44.4	42.9	45.2	44.5	47.4	45.1	45.1	43.3
<b>795</b>	24.7	41.4	43.7	44.9	45.2	42.4	44.2	45	37.7	41	42.6	45.8	44.7	43.3	45.4	44.5	47.2	44.9	45.1	43.1
<b>800</b>	24.8	41.6	43.9	45	45.3	42.6	44.2	45	37.7	41.2	42.5	45.8	44.7	43.1	45.2	44.4	46.9	44.8	45.1	43.2
<b>805</b>	24.5	41.6	43.9	45.2	45.5	42.9	44.6	45.3	37.8	41.2	42.5	45.6	44.4	43.1	45.3	44.5	47	45.1	45.3	43.5
<b>810</b>	24.4	41.7	44.1	45.3	45.6	42.9	44.8	45.4	37.9	41.4	42.4	45.6	44.5	43	45.2	44.5	46.9	45	45.2	43.5
<b>815</b>	24.6	41.7	43.8	44.9	45.3	42.5	44.2	45	37.8	41.2	42.4	45.6	44.3	42.8	45.2	44.5	46.5	44.7	44.9	43.2
<b>820</b>	24.6	41.5	43.7	44.8	45.1	42.4	44.1	45	37.6	40.9	42.4	45.3	44.4	43.2	45	44.1	46.2	44.4	44.7	43
<b>820</b>	24.4	41.6	43.9	45.1	45.4	42.7	44.6	45.3	38	41.3	42.3	45.2	44.2	42.8	45.2	44.4	46.4	44.7	44.9	43.3
<b>825</b>	24.7	41.4	43.5	44.6	45	42.2	43.9	44.8	37.4	40.6	42.3	45	43.8	42.7	45	44.1	45.9	44.1	44.3	42.7
<b>830</b>	24.7	41.5	43.7	44.8	45	42.4	44	44.8	37.5	40.9	42.2	45	44	42.9	45	44.1	45.9	44.2	44.5	42.8
<b>835</b>	24.6	41.4	43.9	44.9	45.1	42.3	44.2	44.9	37.7	40.9	42.1	44.8	43.8	42.6	44.9	44.1	45.8	44.2	44.4	42.8
<b>840</b>	24.4	40.9	43.2	44.4	44.7	42	43.8	44.7	37.4	40.6	42.1	44.7	43.6	42.5	44.8	44	45.6	44	44.1	42.6
<b>845</b>	24.3	41.1	43.4	44.7	44.9	42.3	44.1	44.9	37.7	40.9	42.1	44.6	43.5	42.4	44.8	43.8	45.4	44	44.2	42.7
<b>850</b>	24.3	41.1	43.3	44.5	45	42.4	44	44.8	37.6	40.7	41.9	44.3	43.4	42.5	44.7	43.9	45.5	44.1	44.2	42.7
<b>855</b>	24.5	41.4	43.5	44.7	45	42.4	43.9	44.6	37.4	40.4	41.8	44.3	43.3	42.4	44.9	43.9	45.4	43.9	43.9	42.5
<b>860</b>	24.5	41	43.1	44.2	44.4	41.9	43.5	44.2	37.3	40.4	41.8	44.1	42.9	42.3	44.5	43.5	45	43.6	43.7	42.2
<b>865</b>	24.5	41	43.1	44.2	44.5	41.9	43.5	44.3	37.3	40.5	41.9	44.2	42.8	42.1	44.5	43.5	45	43.4	43.4	42.3
<b>870</b>	24.5	41.1	43.2	44.3	44.6	41.9	43.5	44.2	37.2	40.4	41.8	44	43	42.3	44.6	43.6	45	43.7	43.8	42.3
<b>875</b>	24.3	40.9	42.9	44	44.4	41.9	43.5	44.3	37.2	40.5	41.7	44.1	42.9	42	44.2	43.4	44.8	43.4	43.7	42.4
<b>880</b>	24.4	41.2	43.2	44.4	44.8	42.2	44	44.6	37.5	40.5	41.7	44.1	43.2	42.2	44.7	43.9	45.1	43.7	43.9	42.5
<b>885</b>	24.4	40.9	43.1	44.1	44.3	41.8	43.4	44.2	37.2	40.4	41.7	43.8	42.5	41.7	44.2	43.3	44.6	43.5	43.5	42.3

## ANNEXE C

<b>890</b>	24.1	40.7	42.8	44	44.3	41.9	43.5	44.2	37.3	40.2	41.6	43.6	42.5	41.8	44.1	43.2	44.6	43.4	43.5	42.3
<b>895</b>	24.3	40.7	42.7	43.9	44.1	41.6	43.2	44	37.2	40.2	41.6	43.7	42.6	41.9	44.1	43.2	44.4	43.1	43.3	42
<b>900</b>	24.2	40.7	42.7	43.8	44.2	41.7	43.3	44	37.1	40.2	41.6	43.6	42.4	41.8	44.1	43.1	44.4	43.2	43.3	42
<b>905</b>	24.4	41	43	44.1	44.3	41.7	43.2	44	37	40.1	41.5	43.7	42.5	41.9	44.3	43.4	44.6	43.3	43.4	42
<b>910</b>	24	40.5	42.7	43.9	44.2	41.8	43.3	43.9	36.9	39.9	41.3	43.2	42.2	41.8	44	43.1	44.3	43.2	43.3	41.9
<b>915</b>	24	40.7	42.9	44	44.4	41.9	43.5	44.3	37.3	40.3	41.6	43.5	42.3	41.7	44.1	43.1	44.3	43.2	43.2	42.2
<b>920</b>	24.1	40.8	42.9	44	44.2	42	43.5	44.2	37.2	40.5	41.6	43.6	42.5	41.7	44.1	43.2	44.4	43.4	43.5	42.4
<b>925</b>	24.2	40.9	42.9	44	44.2	41.7	43.2	43.8	36.8	39.9	41.4	43.4	42.5	41.7	44.1	43.2	44.3	43.3	43.5	42.1
<b>930</b>	24	40.7	42.7	43.9	44.2	41.8	43.2	43.8	36.9	39.8	41.2	43.3	42.5	41.9	44	43.1	44.2	43.2	43.2	42.2
<b>935</b>	24.2	40.8	42.9	43.9	44.1	41.5	43.1	43.7	36.9	40	41.2	43.3	42.1	41.5	44	43.2	44.1	43.1	43.1	42
<b>940</b>	23.9	40.6	42.8	43.9	44.1	41.5	43.3	43.9	37.1	40	41.1	43.3	42.1	41.3	43.9	43	44.2	43.2	43.2	42.2
<b>945</b>	23.9	40.7	42.7	43.8	44.1	41.6	43.1	43.7	36.7	39.8	41.1	43.1	42.1	41.5	43.8	42.9	44	43	43.1	42.1
<b>950</b>	24.1	40.6	42.6	43.5	43.8	41.4	42	43.6	36.9	40	41.3	43.4	42.2	41.3	43.8	42.9	44	42.8	43	42
<b>955</b>	24	40.4	42.4	43.4	43.6	41.2	42.8	43.5	36.8	39.8	41.3	43.2	42.1	41.5	43.6	42.7	43.8	42.8	42.9	41.8
<b>960</b>	23.8	40.5	42.5	43.6	43.8	41.3	43.1	43.7	36.8	40	41.2	43.2	42.1	41.2	43.7	42.7	43.7	42.8	43	41.9
<b>965</b>	23.8	40	42	43.1	43.5	41.2	42.6	43.3	36.5	39.3	40.9	42.5	41.4	40.8	43.2	42.4	43.6	42.6	42.4	41.7
<b>970</b>	24.1	40.5	42.3	43.5	43.7	41.2	42.7	43.3	36.6	39.4	40.9	42.9	41.9	41.3	43.5	42.6	43.6	42.7	42.8	41.8
<b>975</b>	23.9	40.2	42.1	43.1	43.4	41	42.6	43.3	36.6	39.7	41	42.9	41.7	41	43.2	42.4	43.4	42.5	42.6	41.8
<b>980</b>	23.6	40.1	42.1	43.3	43.4	41	42.8	43.4	36.6	39.7	40.8	42.7	41.4	40.8	43.3	42.3	43.4	42.6	42.5	41.7
<b>985</b>	23.6	40.2	42.2	43.3	43.5	41.1	42.9	43.4	36.5	39.6	40.8	42.7	41.7	41	43.2	42.3	43.3	42.6	42.6	41.7
<b>990</b>	23.6	40.2	42.2	43.3	43.5	41.1	42.9	43.4	36.5	39.6	40.8	42.7	41.7	41	43.2	42.3	43.3	42.6	42.6	41.7
<b>995</b>	23.9	40.1	41.9	43	43.3	40.8	42.2	42.9	36.2	39.1	40.9	42.6	41.6	41.1	43.2	42.3	43.3	42.4	42.3	41.4
<b>1000</b>	23.6	40	42	43.1	43.4	41.1	42.5	43	36.3	39.3	40.6	42.6	41.4	40.8	43.3	42.4	43.4	42.5	42.4	41.5
<b>1005</b>	23.8	40.2	42.1	43.1	43.4	41.1	42.4	43	36.3	39.1	40.6	42.4	41.3	40.7	43	42.2	43.3	42.4	42.3	41.7
<b>1010</b>	23.6	39.8	41.6	42.7	42.9	40.6	42.2	42.8	36.2	39.2	40.9	42.5	41.2	40.8	42.9	41.9	42.9	42.1	42.1	41.1
<b>1015</b>	23.6	39.7	41.7	42.8	43	40.6	42.2	42.7	36.1	38.9	40.3	42.2	41.1	40.5	43	42	43	42.3	42.1	41.2
<b>1020</b>	23.5	39.7	41.7	42.8	43.2	41	42.4	43	36.4	39.1	40.4	42.3	41.1	40.6	43.1	42.1	43.2	42.3	42.1	41.3
<b>1025</b>	23.6	39.3	41.3	42.3	42.6	40.3	41.8	42.6	36	38.9	40.6	42.2	41	40.5	42.6	41.8	42.7	41.8	41.6	41
<b>1030</b>	23.7	39.8	41.8	42.8	43	40.6	42	42.6	36.2	38.9	40.4	42.2	41	40.5	42.9	42	43.1	42.1	42	41.2
<b>1035</b>	23.8	39.9	41.8	42.7	42.9	40.5	42.1	42.7	36.3	39.2	40.6	42.5	41.3	40.7	42.9	42	43	42.1	41.9	41.3



## ANNEXE C

**Tableau n°6 :** Les phases de stockage et déstockage pour un débit de 0.023 L /s avec chaleur sensible.

Le système se démarre le 05/10/2013 à 9 :23 :38 avec un pas du temps de 10min pour chaque enregistrement des données.

$\Delta t$ [min]	Températures des thermocouples [°C]										
	Rés	1	5	9	13	3	7	11	Sort	Entre	15
0	51.5	28.3	30.7	32.7	32.9	28.7	32.1	32.7	35.7	49.7	33.3
10	50.4	28.1	35.8	37.6	38	33.6	37.5	38.1	39	49.5	37.9
20	53.2	28.5	40.2	41.8	42	38	41.5	42.1	42.5	52	41.7
30	55.8	29.8	43.9	45.3	45.8	42.1	45.4	46.2	45.8	54.8	45.9
40	55.1	31.7	47.1	48.1	48.4	45.2	47.8	48.7	47.8	53.7	48.7
50	51.9	33.9	49.8	50.5	50.9	47.9	50.3	50.7	49.5	52.6	50.7
60	52.8	35.9	51	51.6	52.1	49.2	51.4	52	51.1	54.5	52.3
70	55.4	38.2	52.1	52.7	53.4	51	52.8	53.5	52.4	56.5	53.4
80	55.5	40.4	53.5	53.6	53.9	51.9	53.5	53.8	52.1	53.6	53.9
90	52.9	42.2	54.3	54.7	55	52.9	54.3	54.9	53.3	54.2	54.7
100	56.1	43.8	54.3	54.7	55.2	53	54.4	55	54	57	55.3
110	52.1	45.3	55.2	55.4	55.6	53.9	55	55.4	53.6	53.5	55.4
120	54.6	46.3	55.1	55.6	55.8	54	55.2	55.8	54.5	55.7	55.9
130	51.9	47.3	55.2	55.5	55.7	54.2	55.2	55.9	53.9	53.3	56
140	54.2	48.2	55.6	56.1	56.5	55	56	56.6	55	55.9	56.4
150	53.2	48.7	55.5	56	56.4	54.5	55.7	56.4	54.1	53.4	56.2
160	54.2	49.4	55.8	56.2	56.4	54.8	56.2	56.7	55.2	55.7	56.7
170	51.9	49.9	55.9	56.2	56.6	55	56	56.6	54.4	53.6	56.6
180	54.3	50.2	56	56.4	56.8	55.2	56.5	57	55.5	56.1	57
190	52.2	50.9	56.2	56.6	56.9	55.1	56	56.7	54.5	53.6	56.7
200	54.8	50.7	55.9	56.5	56.9	55.4	56.5	57	55.5	55.9	56.7
210	52.5	51.4	56.5	56.7	57	55.1	56.2	56.8	54.7	53.8	57
220	55.8	51.5	56	56.7	57	55.4	56.6	57.3	55.7	57.3	57.4
230	52.6	51.7	56.5	57.1	57.3	55.9	56.8	57.4	55	54.2	57.1
240	56.9	51.7	56	56.7	56.9	55.4	56.6	57.3	55.4	57.2	57.4
250	53.2	52.2	56.9	57.4	57.6	56.3	57	57.5	55.1	54.5	57.3
260	58.5	52.1	56.2	57.1	57.5	55.9	56.9	57.2	55	56.1	57.2

## ANNEXE C

---

<b>270</b>	53.1	52.1	56.8	57.2	57.4	56.3	57.2	57.6	55.2	54.8	57.6
<b>280</b>	56.1	52.3	56.3	57	57.4	55.9	56.7	57.4	54.5	54.9	57.5
<b>290</b>	53.9	52.6	57	57.5	57.6	56.1	57.1	57.5	55.3	55.3	57.6
<b>300</b>	53.6	52.5	56.5	57.3	57.6	56.2	56.9	57.7	54.4	53.7	57.7
<b>310</b>	54.3	52.9	57.2	57.6	57.8	56.6	57.3	57.6	55.2	55.4	57.5
<b>320</b>	51.9	52.7	56.8	57.3	57.5	55.8	56.6	57.4	54.5	53.8	57.6
<b>330</b>	54.4	52.5	56.7	57.3	57.6	56.3	57.4	57.9	55.5	56.3	57.6
<b>340</b>	52.1	52.7	56.9	57.4	57.7	56.5	57.2	57.8	54.5	54.1	57.9
<b>350</b>	55	53	57.2	57.7	57.8	56.4	57.4	57.7	55.5	56.8	57.7
<b>360</b>	52.4	53	57.3	57.5	57.7	56.5	57.2	57.7	54.5	54.3	57.8
<b>370</b>	55.9	53.2	57.2	58.1	58.2	56.7	57.8	58.3	55.7	57.9	58.2
<b>380</b>	52.8	53.2	57.7	57.9	58.1	56.8	57.5	57.8	54.7	54.6	57.9
<b>390</b>	56.1	53.1	57.1	57.8	58	56.8	57.7	58.2	55.6	58	58.2
<b>400</b>	52.9	53.5	57.9	58.1	58.3	56.9	57.6	58	54.7	54.9	58
<b>410</b>	56.8	53.6	57.8	58.4	58.4	57	58.2	58.2	55.6	58.6	58.4
<b>420</b>	53.2	53.7	58.1	58.3	58.5	57.3	58	58.5	55	55.5	58.6
<b>430</b>	56.9	53.7	57.9	58.6	58.5	57.2	58	58.6	55.4	58.4	58.5
<b>440</b>	52.9	53.8	58.4	58.6	58.7	57.6	58.5	58.8	54.9	55.6	58.9
<b>450</b>	56.4	53.6	57.9	58.5	58.6	57.3	58.1	58.5	55.4	58.1	58.2
<b>460</b>	52.7	53.7	58.1	58.6	58.7	57.7	58.3	58.6	54.7	55.1	58.3
<b>470</b>	56.2	53.8	58.1	58.6	58.6	57.1	58.5	58.8	55.4	58.5	58.7
<b>480</b>	52.5	53.8	58.3	58.7	58.8	57.7	58.1	58.4	54.5	55.1	58.3
<b>490</b>	50.8	54	58.2	58.2	58.4	57.1	58	58.5	51.4	53.1	58.4
<b>500</b>	48.8	53.8	57.7	58.2	58.3	56.4	57.6	58.2	49.5	51.8	58
<b>510</b>	47.2	53.6	57.5	57.9	58	56.2	57.4	57.8	48.5	51.6	57.7
<b>520</b>	46	53.5	57.2	57.6	57.8	56.1	57.5	57.9	47.7	51.7	58
<b>530</b>	44.8	53.2	56.8	57.2	57.4	55.5	56.9	57.4	47	51.4	57.6
<b>540</b>	43.5	53	56.8	57.1	57.1	55.2	56.6	57.1	46.5	51.2	57.4
<b>550</b>	42.6	52.9	56.4	56.9	57.1	55.1	56.7	57.2	46.3	51	57
<b>560</b>	41.2	52	55.7	56.3	56.5	54.3	56	56.6	45.7	50.6	56.8
<b>570</b>	40.4	52	55.6	56.4	56.6	54.3	55.9	56.6	45.5	50.6	56.7
<b>580</b>	39.7	52.4	55.9	56.4	56.6	54.3	55.9	56.5	45.3	50.7	56.7

## ANNEXE C

---

<b>590</b>	38.7	51.6	55.1	56	56.4	53.8	55.6	56.1	44.9	50	56
<b>600</b>	37.8	51.3	54.9	55.9	56.1	53.7	55.4	55.9	44.7	49.7	55.8
<b>610</b>	37.2	51.2	54.8	55.8	56	53.6	55.3	55.7	44.5	49.6	55.8
<b>620</b>	36.9	51.1	54.5	55.3	55.6	53	54.7	55.3	44.4	49.5	55.3
<b>630</b>	35.9	50.7	54.4	55	55.3	52.9	54.7	55.2	44.2	49.7	55.5
<b>640</b>	35.4	50.6	54.2	55.1	55.5	53.1	54.8	55.4	44.1	49.4	55.2
<b>650</b>	35.2	50.8	54.3	55.1	55.3	52.7	54.5	55.1	44	49.3	55.1
<b>660</b>	34.3	50.1	53.7	54.7	54.9	52.2	54	54.5	43.5	48.7	54.7
<b>670</b>	33.7	49.7	53.4	54.3	54.6	51.7	53.6	54.2	43.5	48.8	54.5
<b>680</b>	33.4	49.7	53.2	54.1	54.4	51.8	53.6	54.3	43.5	48.8	54.5
<b>690</b>	33	49.7	53.2	54.3	54.5	51.7	53.6	54.2	43.2	48.3	54.1
<b>700</b>	32.6	49.4	52.8	53.8	54	51.3	53.3	54	43.1	48.5	54.3
<b>710</b>	31.9	49.5	53	54.2	54.4	51.8	53.6	54.1	43	48.2	54.1
<b>720</b>	31.8	49.3	52.9	53.5	53.7	50.7	52.7	53.5	42.8	48.6	53.6
<b>730</b>	31.3	48.9	52.6	53.2	53.4	50.5	52.4	53.1	42.7	48.3	53.3
<b>740</b>	30.9	48.6	52.2	53.1	53.4	50.6	52.6	53.5	42.6	48.1	53.5
<b>750</b>	31.1	48.5	51.9	52.9	53.1	50.1	52.2	52.8	42.3	47.5	53
<b>760</b>	30.7	48.4	51.9	52.6	52.9	49.9	52	52.8	42.3	47.9	53
<b>770</b>	30.3	48	51.5	52.2	52.5	49.7	51.7	52.3	42.1	47.3	52.3
<b>780</b>	30	48.3	51.9	52.6	52.8	49.8	51.7	52.5	42.1	47.7	52.6
<b>790</b>	29.8	47.3	50.6	51.6	52	49	51.3	52.1	42	46.8	52.1
<b>800</b>	29.4	47.5	51	52	52.4	49.4	51.6	52.4	42	47.1	52.3
<b>810</b>	29.3	47.9	51.4	52	52.3	49.7	51.6	52.3	42.1	47.8	52.3
<b>820</b>	29	47.1	50.7	51.4	1.8	49	51.2	51.9	41.7	47	51.9
<b>830</b>	29	47.4	50.8	51.6	51.9	48.9	50.8	51.7	41.6	46.7	51.7
<b>840</b>	28.7	47.4	51	51.6	51.8	49	50.9	51.5	41.5	47	51.6
<b>850</b>	28.4	46.9	50.5	51.2	51.5	48.4	50.4	51.1	41.3	46.5	51.1
<b>860</b>	28.1	46.7	50.1	50.9	51.1	48.3	50.4	51.2	41.3	46.5	51.3
<b>870</b>	27.9	47	50.5	51.4	51.7	48.8	50.7	51.4	41.3	46.7	51
<b>880</b>	27.7	46.9	50.4	51.3	51.6	48.8	50.6	51.4	41.2	46.6	51
<b>890</b>	27.5	46.6	50	50.9	51	48.4	50.2	50.9	40.9	46.1	50.8
<b>900</b>	27.6	46.5	50	50.6	50.8	47.9	49.6	50.4	40.8	46.2	50.6

## ANNEXE C

---

<b>910</b>	27.6	45.8	49	50.1	50.4	47.5	49.5	50.1	40.5	45	50
<b>920</b>	27.2	45.6	49	49.9	50.3	47.5	49.4	50.1	40.5	45.2	49.9
<b>930</b>	27.1	45.6	49.1	49.6	49.9	47.3	49.2	50.1	40.7	46	50
<b>940</b>	26.9	44.9	47.9	49.2	49.7	46.7	48.9	49.6	40.3	44.5	49.5
<b>950</b>	27	45.3	48.4	49.4	49.7	46.8	48.8	49.5	40.2	44.8	49.5
<b>960</b>	26.9	45.4	48.2	49.1	49.5	46.5	48.4	49.2	40.2	45	49.4
<b>970</b>	26.6	44.9	47.9	49.1	49.5	46.6	48.6	49.4	40.1	44.7	49.3
<b>980</b>	26.5	44.5	47.5	48.5	49	46.3	48.3	49	40.1	44.4	48.9
<b>990</b>	26.5	44.6	47.4	48.5	48.8	45.9	48.1	48.9	39.9	44.2	49
<b>1000</b>	26.5	44.8	47.8	48.5	48.8	45.9	47.9	48.7	39.9	44.7	49
<b>1010</b>	26.2	44.6	47.5	48.5	48.9	46	48	48.7	39.8	44.2	48.5
<b>1020</b>	26.4	44.8	47.8	48.5	48.8	45.9	47.9	48.6	39.8	44.5	48.7
<b>1030</b>	26.2	44.6	47.5	48.3	48.6	45.9	47.8	48.4	39.6	44.2	48.4
<b>1040</b>	26.2	44.5	47.6	48.1	48.4	45.8	47.6	48.5	39.8	44.5	48.4
<b>1050</b>	26.1	44	46.8	47.9	48.2	45.3	47.3	47.9	39.3	43.4	48
<b>1060</b>	25.8	44.6	47.3	48.4	48.8	46.2	47.9	48.5	39.4	43.6	48.3
<b>1070</b>	25.6	43.5	46.2	47.4	47.9	45.2	47.1	47.7	39.2	43	47.8
<b>1080</b>	25.7	43.7	46.5	47.5	47.9	45	47	47.7	39.1	43.2	47.6
<b>1090</b>	25.5	43.2	46	47.2	47.5	44.5	46.6	47.5	38.9	42.5	47.4
<b>1100</b>	25.3	43.6	46.4	47.5	47.9	45.2	46.9	47.5	38.9	43.3	47.7
<b>1110</b>	25.5	44.1	46.8	47.7	48	45.1	47.1	47.7	38.9	43.2	47.9
<b>1120</b>	25.1	42.8	45.5	46.7	47.1	44.4	46.4	47.1	38.6	42.8	47
<b>1130</b>	25.1	42.8	45.6	46.6	47	44.4	46.3	47	38.6	42.7	46.9
<b>1140</b>	25.4	42.9	45.7	46.5	46.8	44.2	45.8	46.6	38.5	42.5	46.5
<b>1150</b>	25.1	42.5	45.2	46.1	46.5	43.9	45.8	46.6	38.4	42.5	46.7
<b>1160</b>	24.9	42.9	45.9	46.6	46.9	44.3	45.9	46.6	38.4	42.9	46.7
<b>1170</b>	25.1	42.2	44.6	45.7	46.2	43.6	45.5	46.2	38.3	41.9	46.3
<b>1180</b>	24.9	42.3	44.7	45.8	46.2	43.8	45.5	46.3	38.3	42	46.2
<b>1190</b>	24.8	42	44.9	45.6	46	43.2	45	45.9	38.3	42.4	45.8
<b>1200</b>	25	42.1	44.8	45.4	45.8	43.3	44.8	45.7	38.2	42.5	45.6
<b>1210</b>	24.9	40.4	43.1	44.1	44.6	42.3	44	44.3	37.7	40.7	44.3
<b>1220</b>	24.9	39.9	42.8	43.7	44	41.7	43.4	44.1	37.8	41	44.3

## ANNEXE C

---

<b>1230</b>	25.1	40	42.8	43.4	43.7	41.5	43.2	44	37.9	41.3	44.3
<b>1240</b>	24.9	39.7	42.4	43.4	43.7	41.5	43.4	43.6	38.1	41.2	43.9
<b>1250</b>	25.3	39.1	42.5	42.8	42.7	40.9	42.5	42.8	38	41.1	43.3
<b>1260</b>	25.2	40.3	43	43.9	44.3	42	43.7	44.3	38.6	41.6	44.4
<b>1270</b>	25.1	41	43.4	44.3	44.9	42.3	44.2	44.9	38.9	41.8	44.8
<b>1280</b>	25.2	41.3	43.8	44.7	45.1	42.5	44.3	44.9	38.8	41.7	45
<b>1290</b>	25.1	41	43.5	44.5	44.9	42.5	44.3	45	39	42	45.2
<b>1300</b>	25	41.2	43.5	44.7	45.1	42.7	44.5	45.1	38.9	41.8	45.1
<b>1310</b>	25.2	41.3	43.2	44.3	44.9	41.9	43.9	44.7	38.7	41.7	44.8
<b>1320</b>	25.2	41	43.2	44.2	44.7	42.4	44.1	44.7	38.6	41.3	44.6
<b>1330</b>	25.2	40.4	42.9	43.7	44.2	41.8	43.3	43.9	38.3	41.1	44
<b>1340</b>	25.2	39.8	42.3	43.2	43.7	41.4	43.1	43.7	38.3	41.2	43.9
<b>1350</b>	25.4	40.5	42.7	43.6	44	41.4	43.1	43.8	38.4	41.2	44.1
<b>1360</b>	25.3	40	42.4	43.3	43.7	41.4	43.1	43.9	38.3	41	44.2

## ANNAXE B

## L'étalonnage des instruments de mesure

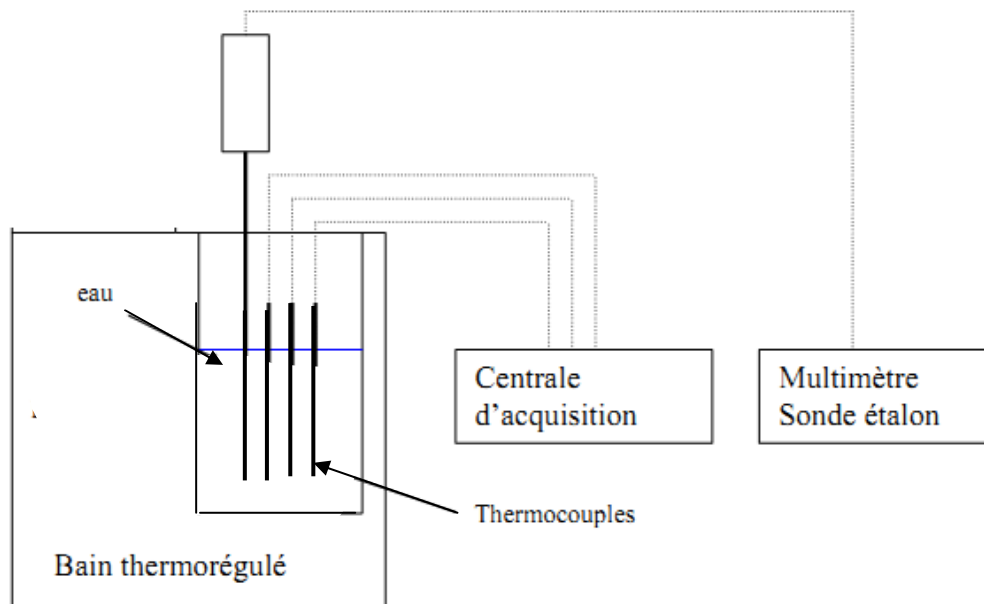
## B.1. Etalonnage des thermocouples :

Afin de mesurer les valeurs correctes de température, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage préalable des thermocouples (TC) que l'on va utiliser. Dans notre cas, il s'agit des thermocouples de type K.

L'étalonnage permet de déterminer une équation polynomiale du second degré pour chaque capteur, équation que l'on rentre ensuite dans le logiciel de MATLAB pour obtenir des valeurs corrigées.

Pour réaliser cet étalonnage, on dispose de l'appareillage suivant : (Figure B.1)

- Un bain thermo régulé,
- Une résistance branchée sur un multimètre donnant la température standard= sonde étalon,
- La centrale d'acquisition qui sera utilisée pour les futures expériences.



*Figure B.1* : Schéma du dispositif d'étalonnage des TC.

Les résultats obtenus à partir de l'expérience de l'étalonnage des thermocouples sont comme les suivants :

**Tableau B.1** : les résultats obtenus à partir de l'expérience de l'étalonnage des TC

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC1 [°C]
0	28.8	28.9
2	34.3	34.5
4	38.6	38.4
6	42.2	42.3
8	45.6	46
10	49.8	49.5
12	53.9	53.6
14	56.7	56.4
18	63.0	62.5

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC2 [°C]	TC3 [°C]
0	22.0	22.0	22.0
6	34.6	34.6	34.9
12	45.5	45.1	45.8
18	53.4	53.5	53.7
24	59.5	59.0	59.8
32	64.2	64.4	64.6
52	68.5	68.4	68.3

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC4 [°C]	TC5 [°C]	TC6 [°C]	TC7 [°C]
0	7.8	8.0	7.9	7.8	8.0
4	19.8	20.5	20.5	21	20.6
8	30.8	31.4	31.4	31.8	31.8
12	39.7	40.1	40.1	40.5	40.5
18	50.0	50.0	50.2	50.2	50.6
24	59.0	58.8	59.0	59.2	59.3
28	63.0	63.0	63.6	63.1	63.7

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC8 [°C]	TC9 [°C]	TC10 [°C]	TC11 [°C]
0	11.0	11.0	11.1	11.4	11.2
4	18.9	19.7	19.6	19.8	19.7
8	26.8	28.1	27.7	27.5	28.0
12	34.2	35.3	35.1	34.7	35.1
16	40.8	41.7	41.1	40.7	41.2
20	45.8	45.7	46.0	46.0	45.9
24	50.2	51.0	51.1	50.9	51.4

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC12 [°C]	TC13 [°C]	TC14 [°C]	TC15 [°C]
0	8.7	8.6	8.5	8.6	8.9
5	14.8	15.0	14.8	14.9	15.0
10	23.0	23.4	22.8	22.8	23.0
15	29.4	29.5	29.5	29.5	29.7
20	35.3	35.2	35.2	35.3	35.3
25	41.0	41.0	40.9	41.0	41.0
30	45.6	45.5	45.6	45.6	45.6
35	49.7	50.2	49.9	49.8	49.9
40	53.9	53.5	53.6	53.8	53.9

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC16 [°C]	TC17 [°C]	TC18 [°C]
0	24.6	24.7	24.7	24.7
5	29.3	29.3	29.3	29.4
10	34.4	34.5	34.5	34.6
15	39.0	39.0	39.0	39.1
20	43.0	43.0	43.0	43.1
25	47.2	47.3	47.3	47.3
30	50.2	50.4	50.5	50.5
35	54.0	54.2	54.2	54.2



Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC19 [°C]	TC20 [°C]	TC21 [°C]
<b>0</b>	7.1	7.3	7.2	7.2
<b>5</b>	14.1	14.1	14.1	14.3
<b>10</b>	21.6	21.7	21.7	21.7
<b>15</b>	28.9	28.9	29.2	29.2
<b>20</b>	35.1	35.0	35.1	35.2
<b>25</b>	40.8	41.0	41.0	41.0

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC22 [°C]	TC23 [°C]	TC24 [°C]	TC25 [°C]
<b>0</b>	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3
<b>5</b>	26.2	26.3	26.4	26.5	26.4
<b>10</b>	32.6	32.7	32.6	33.0	32.8
<b>15</b>	38.3	38.5	38.4	38.7	38.5
<b>20</b>	43.4	43.5	43.4	43.5	43.4
<b>25</b>	48.0	48.0	48.2	48.0	48.0
<b>30</b>	52.1	52.0	52.0	52.0	52.2
<b>35</b>	55.8	56.0	56.0	56.0	56.0
<b>40</b>	59.1	59.1	59.0	58.9	58.9
<b>45</b>	62.8	63.0	61.8	61.5	61.5
<b>50</b>	63.1	63.2	63.4	63.5	63.3

Le temps de teste [min]	Tf [°C]	TC26 [°C]	TC27 [°C]	TC28 [°C]	TC29 [°C]
0	12.8	13.0	12.8	13.0	13.2
5	18.9	19.0	19.0	19.1	19.3
10	26.0	26.2	26.2	26.2	26.5
15	33.3	33.1	33.2	33.3	33.4
20	41.0	41.1	41.1	41.2	41.1
25	46.0	46.1	46.0	46.1	46.3
30	50.7	50.5	50.5	50.7	50.7
35	54.9	54.7	54.7	54.9	54.7
40	84.4	84.3	84.4	84.3	84.1

Thermocouple N°	L'erreur	Polynôme de correction
TC1	0.23116	$Y = 0.7435 + 0.9489T_{mesuré} + 7.65352 T_{mesuré}^2$
TC2	0.29781	$Y = -0.6425 + 1.0359T_{mesuré} - 3.8514 T_{mesuré}^2$
TC3	0.18281	/
TC4	0.2117	$Y = -0.1186 + 0.9693T_{mesuré} + 5.7312 T_{mesuré}^2$
TC5	0.31543	$Y = -0.1422 + 0.9809T_{mesuré} + 2.8564 T_{mesuré}^2$
TC6	0.33059	$Y = 0.2946 + 0.9246T_{mesuré} + 0.0014 T_{mesuré}^2$
TC7	0.23474	$Y = 0.0437 + 0.9514T_{mesuré} + 6.4922 T_{mesuré}^2$
TC8	0.48328	$Y = 1.1496 + 0.8612T_{mesuré} + 0.0021 T_{mesuré}^2$
TC9	0.39268	$Y = 0.2905 + 0.9402T_{mesuré} + 0.7421 T_{mesuré}^2$
TC10	0.39526	$Y = -0.7738 + 1.0118T_{mesuré} - 6.8799 T_{mesuré}^2$
TC11	0.53183	$Y = 0.053 + 0.9504T_{mesuré} + 7.0828 T_{mesuré}^2$
TC12	0.30299	$Y = 0.1317 + 0.9786T_{mesuré} + 3.9439 T_{mesuré}^2$
TC13	0.17212	/
TC14	0.11791	/
TC15	0.1264	/
TC16	0.05453	/
TC17	0.08016	/
TC18	0.07377	/
TC19	0.11523	/
TC20	0.14187	/
TC21	0.0983	/
TC22	0.10892	/
TC23	0.36691	$Y = 0.4119 + 0.9696T_{mesuré} + 4.3508 T_{mesuré}^2$
TC24	0.4751	$Y = 0.5792 + 0.9498T_{mesuré} + 7.4362 T_{mesuré}^2$
TC25	0.42781	$Y = 0.7285 + 0.9472T_{mesuré} + 7.5534 T_{mesuré}^2$
TC26	0.14945	/
TC27	0.13633	/
TC28	0.07539	/
TC29	0.15478	/

## ANNEXE A

**Les méthodes de détermination des propriétés thermophysiques des MCP :**

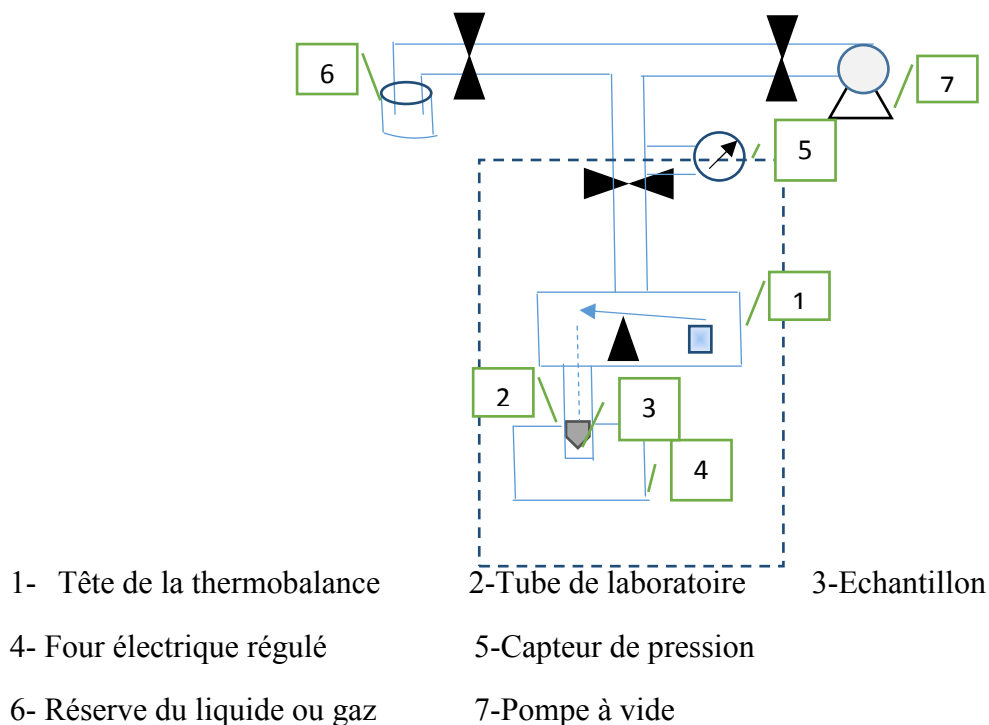
La stabilité thermique et les propriétés thermophysiques des MCP doivent être déterminées par des méthodes d'analyse thermique. Parmi les méthodes conventionnelles on trouve la thermogravimétrie (TG), l'analyse thermique différentielle (DTA) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) qui sont utilisées pour mesurer les propriétés thermophysiques des MCP. Une nouvelle méthode appelée « méthode T-history » est développée par Jinping et al. (1999). [41]

**A.1. Thermogravimétrie (TG) :**

Thermogravimétrie (TG) est la méthode qui mesure les changements de masse de matière en fonction de la température en vertu d'un programme de température contrôlée. Le dispositif expérimental de thermogravimétrie se compose d'une balance de précision, un four et un système d'enregistrement de la masse et de la température.

Pour la thermogravimétrie Akrouch Amina (2011) [29] a utilisé cette méthode pour déterminer les caractéristiques thermophysiques de leur matériau à changement de phase par la procédure d'utilisé un échantillon d'une masse d'environ 3mg est calciné à 500°C sous air puis activé à 420°C sous vide dynamique de l'ordre de  $10^{-3}$  Pa pendant quatre heures. La montée en température est fixée à 5°C/min. L'échantillon a amorcé une décomposition à 170°C. Avant cette température qui se site bien au-delà du domaine de leur étude et ne constate aucune variation de masse.

Le schéma de principe du montage thermogravimétrie est donné sur la figure suivante :



**Figure A.1 :** Montage thermogravimétrie employé. [42]

### A.2. Analyse Thermique Différentielle (DTA) :

Analyse thermique différentielle (DTA) est le dispositif le plus utilisée pour mesurer les températures de fusion et l'ébullition des matériaux organiques et inorganiques. Cette méthode est basée sur la mesure de la différence de température entre l'échantillon et la référence.

C'est une technique dans laquelle la différence de température entre l'échantillon et la référence est mesurée en fonction de temps ou de la température lorsque la température de cet ensemble est programmée dans une atmosphère contrôlée.

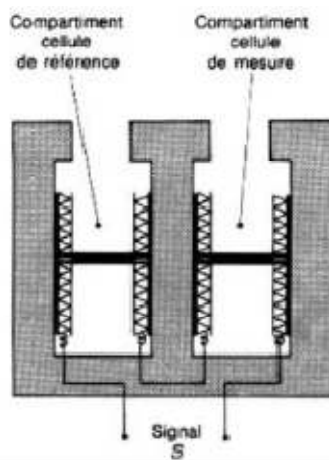
### A.3. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) :

La calorimétrie différentielle (DSC) mesure la différence de vitesse de flux de chaleur entre l'échantillon et la référence sous le même programme de température.

Il existe deux types de DSC :

- DSC à flux de chaleur.
- DSC à compensation de puissance.

Dans la DSC à flux thermique l'échantillon et la référence sont soumis à la même source de chaleur. On détermine la différence dans le flux de chaleur entre l'ambient et l'échantillon et entre l'ambient et la référence.



*Figure A.2* : Principe de montage DSC a flux de chaleur. [42]

En compensation de puissance les températures de l'échantillon et de la référence sont indépendamment contrôlées par des sources de chaleur identiques et distinctes.

Les courbes DTA ou DSC en fonction de la température de chauffage contiennent des séries de pics orientés négativement (vers de bas) ou positivement (vers le haut) de l'axe de flux de chaleur. Les positions des pics sur l'axe de température et leur nombre permettent d'identification qualitative du matériau analysé. Quant aux aires de pics ; elles permettent les calculs des chaleurs de réactions ; de transition ; de fusion ; ou cristallisation. Parfois ; des informations sur les cinétiques de réactions peuvent être obtenues à partir des courbes DTA/DSC.

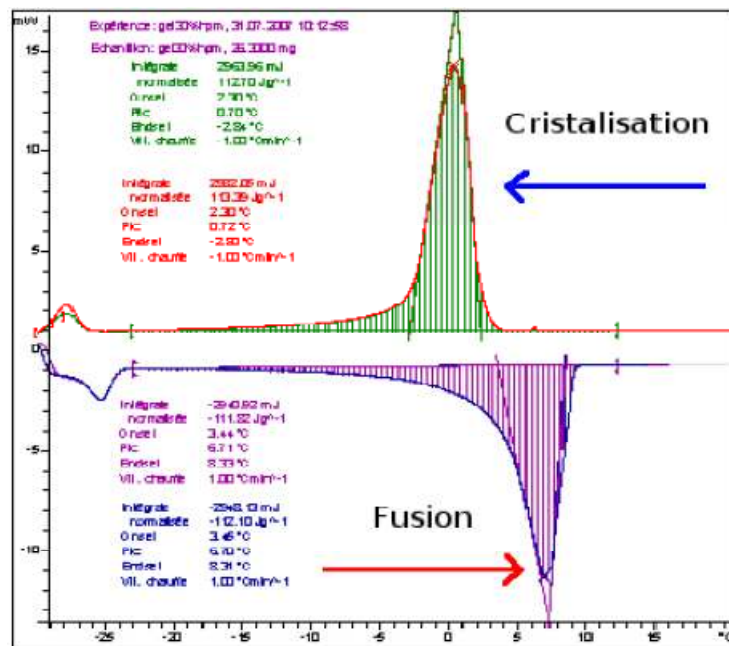


Figure A. 3 : Thermo gramme de la fusion et la cristallisation d'un MCP. [42]

Pour le type de DSC à compensation en puissance Akrouch Amina (2011) [29] a utilisé cette méthode pour déterminer les caractéristiques thermophysiques de leur matériau à changement de phase par la procédure d'utilisé un appareillage qui constitué de deux fours dans la même enceinte calorifique, dans le premier récipient on met une quantité de masse  $m$  de leur échantillon « mélange de paraffines », tandis que le récipient de référence reste vide. Ces deux récipient sont soumis aux même conditions ou environnement thermique, le four chauffe les deux récipients à une vitesse de chauffe de  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  jusqu'à  $70^{\circ}\text{C}$ . On enchaîne par refroidissement avec la même vitesse de chauffe jusqu'à  $-30^{\circ}\text{C}$  afin de balayer les fractions de paraffine qui sont en dessous de la température ambiante, et enfin un second chauffage jusqu'à  $70^{\circ}\text{C}$ .

#### A.4. Méthode « T-history » :

En 1999, Yinping et Yi[41] ont proposé une nouvelle technique expérimentale, appelée la méthode T-history, destinée à la détermination simultanée des propriétés thermophysiques de produits soumis au changement de phase (solidification et/ou fusion). Elle a reçu ce nom car elle est basée sur l'analyse de la courbe transitoire de la température d'un produit lors de son changement de phase. Le dispositif expérimental est composé de deux tubes de mêmes dimensions en verre, un contenant l'échantillon et l'autre rempli d'eau, qui sont initialement mis dans un premier bain d'eau (bain-1) à température homogène  $T_{\text{eau}1}$  est supérieure à la température de changement de phase  $T_f$  du produit en étude.

Les deux tubes sont laissés dans ce bain jusqu'à ce que la température d'échantillon et celle de l'eau deviennent égale à  $T_0$  ( $T_0 = T_{\text{eau}}$ ). A l'instant  $t=0$ , les deux tubes sont retirés du premier bain et mis dans un deuxième bain d'eau (bain-2) à température  $T_{\text{eau}2}$  légèrement inférieur à la température de changement de phase du produit. Un thermocouple placé dans chaque tube mesure l'évolution temporelle de la température du produit et de l'eau.