

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



*En vue de l'obtention du Diplôme Master
Option :Energétique*

Thème :

***Etude d'un Système de Chauffage d'eau
Passif***

Proposé et dirigé par :
I. BOUMRAR

Réalisé par :
**MAZARI AZOUAOU
HAMDANI LYES**

Promotion : 2019-2020

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU de nous avoir accordé la

Puissance et la volonté de terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à notre

encadreur Monsieur I. BOUMRAR enseignant à l'Université

Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou qui nous a permis et aidé, sous sa

direction, à réaliser ce travail ainsi que pour ses précieux conseils et

sa disponibilité tout le long de la recherche.

Nous remercions vivement les membres de jurys d'avoir accepté de

juger notre travail.

Nos sincères remerciements pour tous ceux qui ont contribué,

de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes ces années de sacrifice.

Mon frère (Bilal) et ma sœur (Lamia)

Ma copine (C.H.M)

Toute ma famille

Mes chers amis et amies, mes collègues de l'étude surtout les étudiants de génie de la construction

Tous les étudiants de ma promotion

H.Lyes

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes ces années de sacrifice.

Mes frères et mes sœurs

Toute ma famille

Mes chers amis et amies, mes camarades d'étude surtout les étudiants de Génie de la Construction

Tous les étudiants de ma Promotion

M. Azouaou

Sommaire

Remerciements	
Dédicaces	
Introduction Générale	01
Chapitre I : Matériaux à Changement de Phase (MCP)	
I.1- Introduction	03
I.2- Le changement de phase d'un point de vue énergétique	03
I.2.1- Changement de phase d'un corps pur idéal	03
I.2.2- Changement de phase d'un corps pur réel	06
I.3- Stockage thermique des matériaux à changement de phase	06
I.3.1- Stockage par chaleur sensible	07
I.3.2- Stockage par chaleur latente	07
I.3.3- Stockage par voie thermochimique	09
I.4- Propriétés des matériaux à changement de phase	09
I.4.1- Critères thermodynamiques	10
I.4.2- Critères cinétiques	10
I.4.3- Critères chimiques	10
I.4.4- Critères économiques	10
I.5- Applications des MCP	11
I.5.1- Le transport des produits alimentaires	11
I.5.2- Le stockage de l'énergie thermique	11
I.5.3- Applications médicales	11
I.6- Base théorique des matériaux à changement de phase	11
I.6.1- Température de fusion	11
I.6.2- La cristallisation	13
I.7- Classification des MCP	14
I.7.1- Les MCP Organiques	15
I.7.1.1- Les composés organiques paraffinés	15
I.7.1.2- Les composés organiques non-paraffinés	17
I.7.2- Les MCP Inorganiques	18
I.7.2.1- Les sels hydratés	19
I.7.2.2- Sels	21
I.7.2.3- Métaux	21

I.7.3- Les eutectiques.....	22
I.8- conclusion	23

Chapitre II : Stockage de l'Energie Thermique

II.1- Généralités	24
II.2- Classification et caractéristiques des systèmes de stockage	25
II.3- Stockage de la chaleur sensible.....	27
II.3.1- Stockage avec réservoir d'eau	29
II.3.2- Stockage souterrain	30
II.3.3- Stockage sur lit de galets	31
II.4- Stockage de la chaleur latente.....	33
II.4.1- Caractéristiques des MCP	36
II.4.1.1- Les MCP organiques	37
II.4.1.2- Les MCP inorganiques	38
II.4.1.3- Eutectique.....	39
II.4.1.4- Confinement des MCP	39
II.5- Stockage de l'énergie chimique.....	40
II.6- Stockage de l'énergie thermique froide.....	43
II.7- Conclusion.....	45

Chapitre III : Réalisation Expérimentale

III.1- Introduction.....	46
III.2- Les équipements de module expérimental	46
III.2.1- Le choix de MCP	46
III.2.2- Le fluide stockeur par chaleur sensible.....	46
III.2.3- Le module de stockage thermique	47
III.2.4- Concentrateur solaire	47
III.2.5- L'isolant thermique.....	48
III.2.6- Mesure de température.....	48
III.3- La réalisation du model.....	49
III.4- Conclusion	55

Chapitre IV : Présentation des Résultats Expérimentaux

IV.1- Essai au laboratoire n°01	56
IV.1.1- Résultats obtenus avec le dispositif D1	56
IV.1.2- Résultats obtenus avec le dispositif D2	56
IV.1.3- Résultats obtenus avec le dispositif D3	57
IV.1.4- Résultats obtenus avec le dispositif D4	57

IV.2- Essai au laboratoire n°02	58
IV.2.1- Résultats obtenus avec le dispositif D1	58
IV.2.2- Résultats obtenus avec le dispositif D2	59
IV.2.3- Résultats obtenus avec le dispositif D3	59
IV.2.4- Résultats obtenus avec le dispositif D4	60
IV.3- Essai sur site n°01 (18/05/2021)	61
IV.3.1- Résultats obtenus avec le dispositif D3 (stockage).....	61
IV.3.2- Résultats obtenus avec le dispositif D3 (déstockage).....	61
IV.4- Essai sur site n°02 (25/05/2021)	62
IV.4.1- Résultats obtenus avec le dispositif D3 (stockage).....	62
IV.4.2- Résultats obtenus avec le dispositif D3 (déstockage).....	63
IV.5- Conclusion	63

Chapitre V : Analyse des Résultats

V.1- Essais au niveau du laboratoire	64
V.1.1- Essai n°01.....	64
V.1.2- Essai n°02.....	65
V.2- Essais sur le site	66
V.2.1- Evolution de la température de l'eau et de MCP au cours de stockage de la chaleur entre les deux essais	66
V.2.2- Evolution de la température de l'eau et de MCP au cours de déstockage de la chaleur entre les deux essais	67
V.3- Conclusion	68
Conclusion Générale	69

Bibliographie

Nomenclature

Liste des symboles :

A	Section transversale du lit (m^2)
cp_l	Chaleur massique à l'état liquide $J/(Kg.K)$
cp_s	Chaleur massique à l'état solide $J/(Kg.K)$
C_p	Capacité thermique massique $J/(Kg.K)$
E	Energie (KWh)
hl	Enthalpie à l'état liquide [J]
hs	Enthalpie à l'état solide [J]
L_f	Chaleur latente de changement de phase (f pour fusion) $[J/Kg]$
m	masse [kg]
m_f	Masse du fluide (Kg)
P	Pression [Pa]
T	Température [K]
$T_{l_{sol}}$	Température initiale du matériau en phase solide ($^{\circ}C$)
$T_{F_{liq}}$	Température finale du matériau en phase liquide ($^{\circ}C$)
T_f	Température de fusion ($^{\circ}C$)
t_i	Température initiale ($^{\circ}C$)
t_f	Température finale ($^{\circ}C$)
t_a	Température ambiante ($^{\circ}C$)
t	Temps [S]
V	Volume [m^3]
Q_s	Chaleur sensible à l'état solide (J)
$Q_{latente}$	Chaleur latente de fusion (J)
Q_L	Chaleur sensible à l'état liquide (J)
ρ_f	Densité du fluide

Δt	Déférence de temps [S]
ΔT	Différence de température [K]
Δh	Enthalpie spécifique (KJ/kg)
ΔH_r	Chaleur de réaction (J/mol)

Liste des figures

Chapitre I

Figure. I.1	Nomenclature des changements d'état	04
Figure. I.2	Transformation représentée dans le diagramme des phases.....	04
Figure. I.3	Réponse en température et en flux d'un corps pur idéal lors d'une solidification.....	05
Figure. I.4	Solidification d'un corps réel.....	06
Figure. I.5	Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible	08
Figure. I.6	Schéma représentatif de charge et décharge d'un MCP.....	12
Figure. I.7	Evolution de Q en fonction de T pour un corps pur.....	13
Figure. I.8	Evolution de Q en fonction de T pour un mélange	13
Figure. I.9	Classification des MCP D'après (Kośny, 2015)	14

Chapitre II

Figure II.1	Types de stockage d'énergie solaire.....	26
Figure II.2	Méthodes de stockage de l'énergie thermique (A) chaleur sensible, (B) chaleur latente, (C) réactions thermochimiques.....	28
Figure II.3	Un système typique utilisant le stockage de réservoir d'eau.....	29
Figure II.4	Système de stockage sur lit de galets.....	32
Figure II.5	Classification des MCP.....	37
Figure II.6	Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques	41

Figure II.7 Système de stockage thermique par adsorption saisonnière 45

Chapitre III

Figure III.1 Le module de stockage thermique..... 47

Figure III.2 Concentrateur solaire..... 47

Figure III.3 Isolant thermique 48

Figure III.4 Thermomètres électroniques et à mercure..... 48

Figure III.5 Pavé droit intérieure 49

Figure III.6 Pavés droit extérieurs 50

Figure III.7 Tôle galvanisé 50

Figure III.8 Bases et surfaces annulaires 51

Figure III.9 Perçage des trous 51

Figure III.10 Assemblage des pavés droits intérieurs et extérieures 51

Figure III.11 Pourcentages d'acide gras, de cire de bougie et de graffite mélangées. 52

Figure III.12 Bain-marie 52

Figure III.13 Température de fusion de MCP utilisé 52

Figure III.14 Injection de l'MCP 53

Figure III.15 L'isolation avec du polyester 53

Figure III.16 Formes finales des dispositifs 54

Figure III.17 Le récepteur des rayons solaire 54

Figure III.18 Le système opérationnel sur le site 54

Chapitre IV

Figure IV.1 L'évolution de la température d'eau en fonction de temps de dispositif D1 56

Figure IV.2 L'évolution de la température d'eau et de le MCP en fonction de temps de dispositif D2 56

Figure IV.3 L'évolution de la température d'eau et de le MCP en fonction de temps de dispositif D3 57

Figure IV.4 L'évolution de la température d'eau et de le MCP en fonction de temps de dispositif D4 57

Figure IV.5 L'évolution de la température d'eau en fonction de temps de dispositif D1 58

Figure IV.6 L'évolution de la température d'eau et de le MCP en fonction de temps de dispositif D2 59

Figure IV.7 L'évolution de la température d'eau et de le MCP en fonction de temps de dispositif D3 59

Figure IV.8 L'évolution de la température d'eau et de le MCP en fonction de temps de dispositif D4 60

Figure IV.9 L'évolution de la température d'eau et de MCP en fonction de temps de dispositif D3 pendant le stockage de la chaleur (Essai 1) 61

Figure IV.10 L'évolution de la température d'eau et de MCP en fonction de temps de dispositif D3 pendant le déstockage de la chaleur (Essai 1) 61

Figure IV.11 L'évolution de la température d'eau et de MCP en fonction de temps de dispositif D3 pendant le stockage de la chaleur (Essai 2) 62

Figure IV.12 L'évolution de la température d'eau et de MCP en fonction de temps de dispositif D3 63

Chapitre V

Figure V.1	Evolution de la température de l'eau des dispositifs étudiés pendant 24h.....	64
Figure V.2	Evolution de la température du MCP des dispositifs étudiés pendant 24h.	65
Figure V.3	Evolution de la température de l'eau des dispositifs étudiés pendant 24h.....	65
Figure V.4	Evolution de la température du MCP des dispositifs étudiés pendant 24h.	66
Figure V.5	Evolution de la température de l'eau du dispositif D3 effectué sur le site (stockage)	66
Figure V.6	Evolution de la température de l'MCP du dispositif D3 effectué sur le site (stockage)	67
Figure V.7	Evolution de la température de l'eau du dispositif D3 effectué sur le site (déstockage).	67
Figure V.8	Evolution de la température de l'MCP du dispositif D3 effectué sur le site (déstockage).	68

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau. I.1	Quelques matériaux pour le stockage par chaleur sensible	07
Tableau. I.2	Propriétés de différentes paraffines Tiré de (Kośny, 2015).....	15
Tableau. I.3	propriétés thermo-physiques des matières organiques non paraffinés... ..	17
Tableau. I.4	propriétés thermo-physiques des acides gras.....	18
Tableau. I.5	Liste de quelques Eutectiques.....	22

Chapitre II

Tableau II.1	Paramètres typiques des systèmes TES.....	27
Tableau II.2	Liste des matériaux solide-liquide sélectionnés pour le stockage sensible de la Chaleur	28
Tableau II.3	Propriétés des matériaux à changement de phase	37
Tableau II.4	Principales caractéristiques thermo-physiques de certains hydrates de sel.....	40
Tableau II.5	Fusion et chaleur latente de fusion pour les métaux	40
Tableau II.6	Propriétés de la paraffine, du gallium, de l'air et de l'aluminium utilisés pour le Calcul	41
Tableau II.7	Quelques réactions chimiques pour le stockage de l'énergie thermique	42

Introduction Générale

La maîtrise de l'énergie est un enjeu majeur du développement économique qui va de pair avec le développement durable. Tous les pays sont confrontés au problème de la rareté des ressources énergétiques, cette rareté débouche vers un grand défi, celui de savoir gérer efficacement et surtout raisonnablement ces mêmes ressources afin de répondre de la façon la plus adéquate à la soif croissante en énergie de leurs populations.

Actuellement, bien que les ressources énergétiques renouvelables soient utilisées à grande échelle, l'acceptabilité sociale reste un défi à relever. La faible densité du rayonnement solaire à la surface terrestre et ses fluctuations encourage à l'introduction d'un moyen de stockage d'énergie par chaleur latente, c'est-à-dire par l'utilisation des matériaux appelés matériaux à changement de phase (MCP).

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

L'objectif du présent travail est la réalisation d'un système de stockage de l'énergie thermique à long terme. L'expérience consiste à capter l'énergie solaire via un concentrateur solaire parabolique pour ensuite stocker cette énergie dans un système de stockage (Eau/MCP) pour un usage pendant la nuit

fraîche de cette eau sanitaire chaude, l'énergie thermique (chaleur de l'eau chaude) est stockée en utilisant un MCP.

Le premier chapitre est consacré aux matériaux à changement de phase MCP, et nous permet aussi de découvrir les différentes familles des MCP existantes.

Le second chapitre illustre les généralités sur le stockage de l'énergie thermique solaire.

Le troisième chapitre est consacré à la réalisation expérimentale du système de stockage (Eau/MCP) en mettant l'accent sur toutes les étapes de mise en œuvre des quatre dispositifs ainsi que le prototype à concentrateur du rayonnement solaire et son utilité.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats expérimentaux récoltés durant deux tests effectués au laboratoire et deux essais effectués sur site.

Un cinquième chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus, en utilisant des comparaisons et à la fin on termine avec une conclusion générale qui retrace les différents résultats importants.

Chapitre I

Matériaux à Changement de Phase

Chapitre I Matériaux à changement de phase

I.1- Introduction

Le matériau à changement de phase (MCP) tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Un matériau à changement de phase met à profit sa capacité d'absorber ou de libérer de l'énergie pendant son changement de phase. Quand le point de fusion est atteint, le MCP passe de la phase solide à la phase liquide, ce qui est accompagné d'une absorption d'énergie (chaleur située aux alentours), ce processus aide ainsi à réduire l'augmentation de la température ambiante. Quand le changement de phase est inversé, c'est-à-dire lorsque le matériau passe de l'état liquide à l'état solide, la chaleur absorbée est libérée. Les changements de phase se produisent sans variation de température, ce qui signifie que de grandes quantités d'énergie peuvent être stockées et relâchées sans changement de température des matériaux, Un MCP permet donc de stocker la chaleur du milieu lorsque la température ambiante dépasse la température de fusion et de libérer cette chaleur quand la température devient inférieure. [1]

I.2- Le changement de phase d'un point de vue énergétique

I.2.1- Changement de phase d'un corps pur idéal

Une phase d'un corps pur est définie comme : « une zone dans l'espace des paramètres thermodynamiques (T, P, V) d'un système composé uniquement d'un corps pur, dans lequel l'énergie libre est une fonction analytique ». Pour un volume V d'un corps pur, le diagramme des phases représente l'espace occupé par chacune des phases dans le plan d'abscisse la température et d'ordonnée la Pression. Les trois états les plus répandus pour la matière sont solide, liquide et gazeux. Ces états sont directement associés aux phases du diagramme des phases. Les frontières entre les différentes phases représentent les changements d'état, solidification pour le passage de l'état liquide à l'état solide, fusion pour le passage de l'état solide à l'état liquide. Voir figure (I.1)

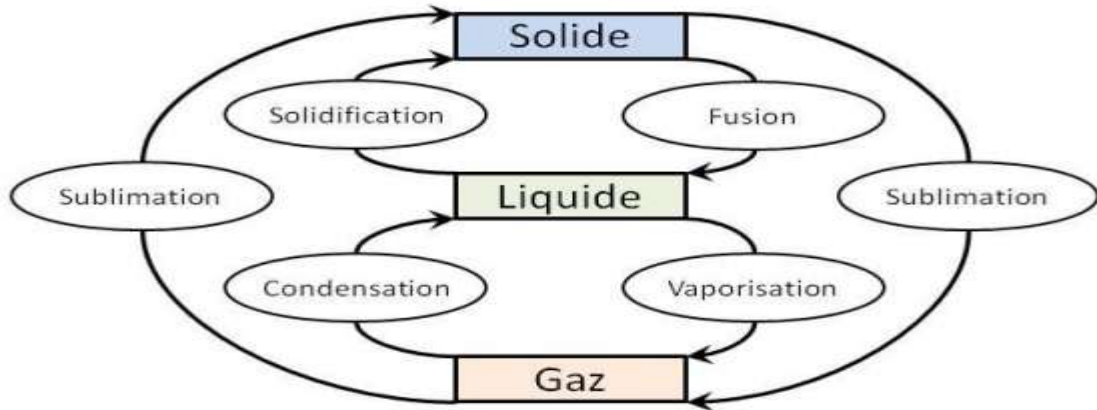


Figure. I.1 : Nomenclature des changements d'état [2]

La pression peut être considérée comme constante durant le processus de transformation pour les mises en œuvre de matériaux qui nous intéressent. Il s'agit soit de la pression atmosphérique soit de la pression dans le système pour les cas d'intégration de MCP dans des systèmes actifs.

La Figure (I.2) représente un changement d'état à une pression donnée pour un passage de l'état solide à l'état liquide repéré sur le diagramme des phases. L'évolution de la température du système se traduit par un déplacement sur la ligne bleue horizontale. Cette ligne coupe la frontière liquide / solide donc lorsque la température du système atteint ce point sur la frontière, il y a changement de phase et la température est appelée température de fusion.

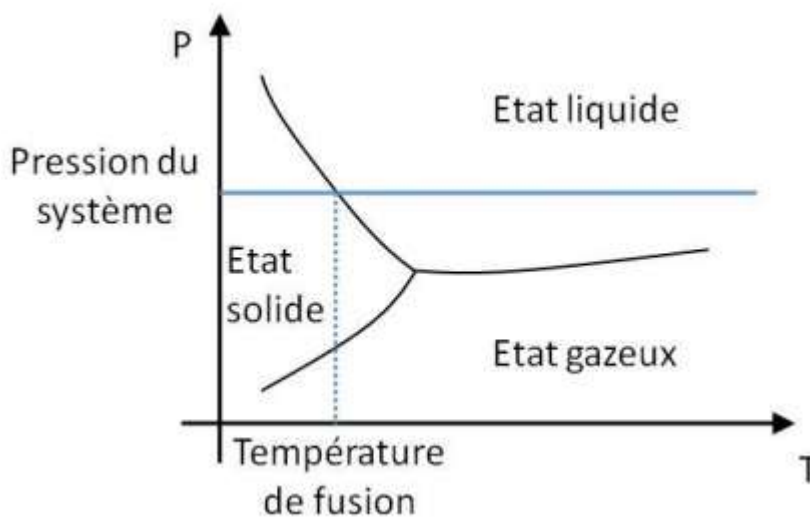


Figure. I.2 : Transformation représentée dans le diagramme des phases [2]

D'un point de vue dynamique, le passage d'un équilibre thermodynamique à un autre, pour une perturbation à l'instant (t) va s'achever à $(t+\Delta t)$. Soit un échelon de température ΔT imposé à un corps pur idéal de masse m . Cet échelon permet la solidification du matériau. Le passage de l'état thermodynamique initial stable à l'état thermodynamique final stable se fait en trois étapes comme décrites sur la Figure (I.3). Premièrement, il y a le refroidissement du liquide où le corps pur libère de la chaleur sensible pour abaisser sa température de manière à revenir à l'équilibre. Cette étape s'achève lorsque la température de fusion est atteinte. Ensuite, c'est le changement de phase à température constante égale à la température de fusion. La chaleur latente est dégagée. Cette étape s'achève quand tout le corps pur est en phase solide. Troisième étape, le corps pur à l'état solide se refroidit en libérant de la chaleur sensible pour atteindre la température finale d'équilibre T_2 . L'énergie totale libérée pendant cette transformation avec le passage de T_1 à T_2 vaut :

$$1^{\text{ère}} \text{ Etape: } hl = m * cp_l * (T_1 - T_f) \quad (\text{I.1})$$

$$2^{\text{ème}} \text{ Etape : } \quad m * L_f \quad (\text{I.2})$$

$$3^{\text{ème}} \text{ Etape : } hs = m * cp_s * (T_f - T_2) \quad (\text{I.3})$$

Avec cp_l la capacité calorifique massique du liquide, cp_s la capacité calorifique massique du solide et L_f la chaleur latente de fusion. L'aire sous la courbe de flux représente cette énergie échangée.

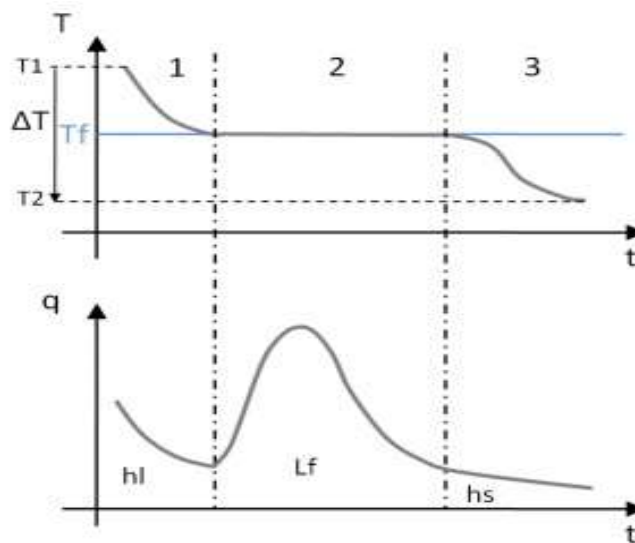


Figure. I.3 : Réponse en température et en flux d'un corps pur idéal lors d'une Solidification [2]

I.2.2- Changement de phase d'un corps pur réel

Dans le cas précédent d'un corps pur idéal le changement de phase a lieu à température constante. Dans le cas d'un corps pur réel et encore plus pour des mélanges, le changement de phase a lieu sur une plage de température plus ou moins étroite suivant les cas. La Figure (I.4) montre cette plage de température dans la deuxième étape. Un autre phénomène peut également apparaître lors de changement de phase de corps réels, il s'agit du phénomène de surfusion. La solidification d'un matériau est amorcée par la formation de petits cristaux, les nucléis qui s'étendent pour former la phase solide. Le taux de nucléation d'un matériau est sa capacité à former des nucléis lorsque sa température descend sous sa température de fusion. Si ce taux de nucléation est trop bas, alors la température du matériau peut descendre sous la température de fusion sans que la phase liquide devienne solide. Alors la solidification s'amorce un peu plus tard dès que le nombre de nucléis formé est suffisant et subitement la température interne du matériau remonte à la température de fusion. [2]

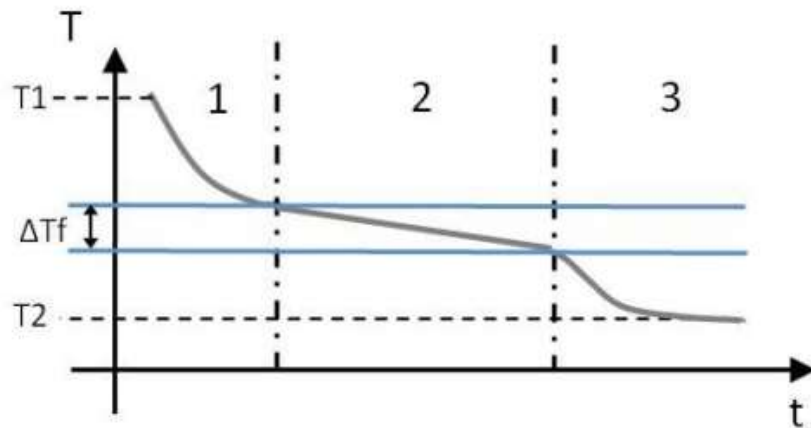


Figure. I.4 : Solidification d'un corps réel [2]

I.3- Stockage thermique des matériaux à changement de phase

Le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. La chaleur peut être stockée sous plusieurs formes :

- La chaleur sensible : stockage dans des matériaux inertes
- La chaleur latente : utilisation de matériaux à changement de phase qui emmagasinent l'énergie à mesure qu'ils changent de phase.
- La chaleur des réactions : thermochimie et absorption [3]

I.3.1-stockage par chaleur sensible

Consiste à mettre en contact un corps à haute température (exemple : fluide caloporteur) avec le milieu, fluide ou solide, support du stockage et qui se trouve à température plus basse. Le résultat de cette opération est l'augmentation de la température du milieu stockant. Huiles synthétiques, vapeur d'eau sous pression, sels fondus sans changement de phase, céramiques et béton sont les milieux généralement utilisés pour stocker de l'énergie thermique à haute température. La capacité calorifique est présentée par l'équation suivante :

$$E_{sensible} = \int m * c_p * dT \quad (I.4)$$

Dans ces types de stockage, le matériau de stockage se présente soit sous forme liquide, soit sous forme solide, soit les deux.

Matière	Gamme de température (°C)	Densité (kg/m ³)	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
Pierres communes	20	2560	879
Briques	20	1600	840
Béton	20	1900-2300	880
Eau	0-100	1000	4190
Caloria HT 43	12-260	867	2200
Huile de moteur	Jusqu'à 160	888	1880
Ethanol	Jusqu'à 78	790	2400

Tableau. I.1 : Quelques matériaux pour le stockage par chaleur sensible [4]

La quantité d'énergie stockée par chaleur sensible dépend de la masse de matériau, de sa capacité thermique massique et du différentiel de température. Le Tableau (I.1) donne des valeurs pour la capacité de stockage par chaleur sensible pour quelques matériaux sélectionnés.

I.3.2- stockage par chaleur latente

Est lié au changement d'état des corps : solide-liquide, solide-gaz, liquide-gaz ou encore solide-solide (polymorphisme). Ces transformations se produisent généralement à température et pression constantes (pour les corps purs) et mettent en jeu des quantités d'énergie thermique considérables (> 100 kJ/kg). Par rapport au stockage par chaleur sensible, le stockage par chaleur latente permet de stocker de plus grandes quantités d'énergie avec des masses et des variations de température bien plus faibles. On peut s'attendre toutefois à ce qu'il demande une technologie plus élaborée. A haute température, les matériaux à

changement de phase le plus couramment utilisés sont les métaux et les sels (transformations liquide-solide). [4]

La quantité de chaleur stockée est présentée par l'équation suivante :

$$E_{latent} = m * \Delta h_{S-L \text{ ou } L-G} \quad (I.5)$$

La quantité de chaleur stockée dans un système latente est présentée sur le graphe température énergie de la figure (I.5)

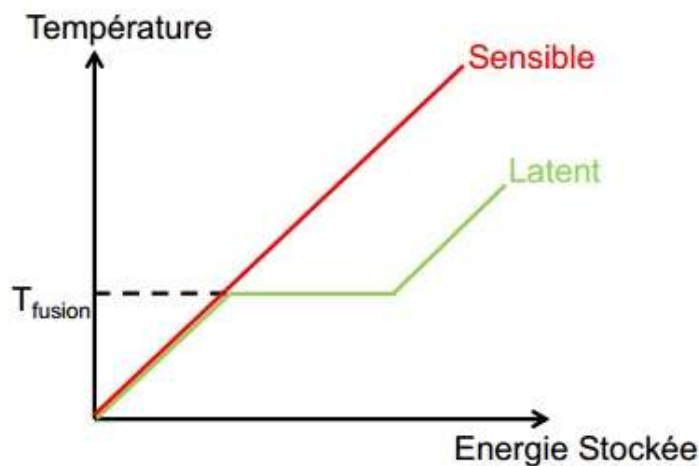


Figure. I.5 : Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible. [5]

Lorsque le matériau est chauffé, il accumule d'abord une quantité d'énergie sensible lui permettant d'atteindre la température de changement de phase. A ce stade, l'énergie apportée au matériau cesse de le chauffer et est utilisée à la place pour accomplir le changement de phase. La chaleur est stockée de façon isotherme à condition que le corps soit pur sous forme de chaleur latente. Une fois que la transformation est complète, la température augmente de nouveau proportionnellement à l'énergie apportée jusqu'à atteindre la température de la source de chaleur. Il est donc impossible de ne stocker que la chaleur latente puisque pour arriver au point de changement de phase, le matériau doit subir une montée en température, stockant inévitablement une part d'énergie sensible. [5]

❖ Les avantages du stockage par chaleur latente

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.

I.3.3- Stockage par voie thermochimique

La troisième façon de stocker l'énergie thermique consiste en l'utilisation de l'énergie endothermique des réactions chimiques réversibles. La chaleur de réaction qui est stockée est souvent associée à la dissociation des réactifs chimiques en deux composants. Tout ou partie de cette chaleur peut être récupérée plus tard lorsque la réaction de synthèse a lieu.



Avec

A Réactif solide ou liquide

ΔH_r Chaleur de réaction en J/mol

B et C Produits sous forme gaz, liquide ou solide

Une condition pour que le stockage ait une taille suffisamment petite est que les réactifs soient plutôt solides ou liquides. Les produits obtenus peuvent être indépendamment des gaz, liquides ou solides. Lorsque la réaction se fait avec un gaz, le système de stockage peut se présenter sous la forme d'un réacteur à lit fluidisé. Par ailleurs, dans ce type de stockage, les produits obtenus sont stockés pour être utilisés ultérieurement et ce système est propice au stockage inter-saisonnier.[3]

I.4- Propriétés des matériaux à changement de phase

Un grand nombre de matériaux à changement de phase possède une température de fusion dans la gamme de température (0-120°C).Cependant ils peuvent être utilisés comme

matériaux de stockage que lorsqu'ils possèdent certaines propriétés thermodynamiques, cinétiques et chimiques, qui sont définies à partir d'un nombre de critères.

I.4.1-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.

I.4.2-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.

I.4.3-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 action corrosive sur les matériaux de construction ou sur leur contenant.
- Aussi le matériau ne doit pas être nocif, il doit être non inflammable et non explosif.

I.4.4-Critères économiques

Le matériau de 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 : les composés minéraux et les composés organiques et les mélanges de ces composés. [8]

I.5- Applications des MCP

I.5.1-Le transport des produits alimentaires :

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver.

I.5.2-Le stockage de l'énergie thermique :

Les MCP stockent l'énergie en changeant de phase solide-liquide (fusion) puis ils restituent la chaleur par le changement de phase liquide-solide (solidification). Le choix de MCP le plus approprié est fondé sur un certain nombre de facteurs : le prix, la chaleur latente et la conductivité thermique (phases liquide et solide), etc. Un MCP connu pour cette application est l'acétate de sodium tri-hydraté ayant un point de fusion vers 58 °C. Ce matériau a été mis en œuvre dans des conteneurs déplaçables par camions pour stocker la chaleur évacuée d'incinérateurs d'ordures ménagères. La restitution de l'énergie se fait alors à distance sur des stations équipées, à une température d'environ 50 °C. [9]

I.5.3-Applications médicales :

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang. D'autres applications médicales peuvent être des coussins et chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps. [10]

I.6-Base théorique des matériaux à changement de phase :

I.6.1-Température de fusion :

C'est une des caractéristiques essentielle du matériau. Elle représente la limite à laquelle se déclenche le stockage ou le déstockage de chaleur latente.

Les échanges entre le matériau et le milieu extérieur à température T_e s'effectuent par des cycles de charge et décharge. La figure 1.6 ci après en est une représentation :



Figure. I.6 : Schéma représentatif de charge et décharge d'un MCP [11]

Ainsi la quantité de chaleur stockée par un MCP qui passe de l'état solide à l'état liquide est composée de trois termes qui sont :

$$\text{La chaleur sensible à l'état solide } Q_s = m * C_{p_{sol}} (T_{fus} - T_{l_{sol}}) \quad (I.7)$$

$$\text{La chaleur latente de fusion } Q_{latente} = m * L_{fus} \quad (I.8)$$

$$\text{La chaleur sensible à l'état liquide } Q_L = m * C_{p_{liq}} (T_{F_{liq}} - T_{fus}) \quad (I.9)$$

$$Q_T = Q_{liq} + Q_{sol} + m * L_{fus} \quad (I.10) \quad \text{avec ; } Q \text{ en } (J) , L_{fus} \text{ en } \left(\frac{J}{kg} \right)$$

$C_{p_{sol}} \left(\frac{J}{kg} . ^\circ C \right)$: Chaleur spécifique moyenne du matériau à l'état solide ;

$T_{l_{sol}} (^\circ C)$: Température initiale du matériau en phase solide ;

$T_{F_{liq}} (^\circ C)$: Température finale du matériau en phase liquide ;

$C_{p_{liq}} \left(\frac{J}{kg} . ^\circ C \right)$: Chaleur spécifique moyenne du matériau à l'état liquide ;

Dans le cas des corps purs, la quantité de chaleur stockée en fonction de la température est illustrée par la figure (I.6) suivante :

Ces schémas figures (I.6, I.7) symbolisent respectivement le stockage mixte (sensible/latent) d'un corps pur figure(I.6) et d'un corps composé figure(I.7) observé pendant le changement

d'état. Le changement de phase est isotherme dans le cas du corps pur, pour les corps composés la transition de phase se s'effectue sur une gamme de température.

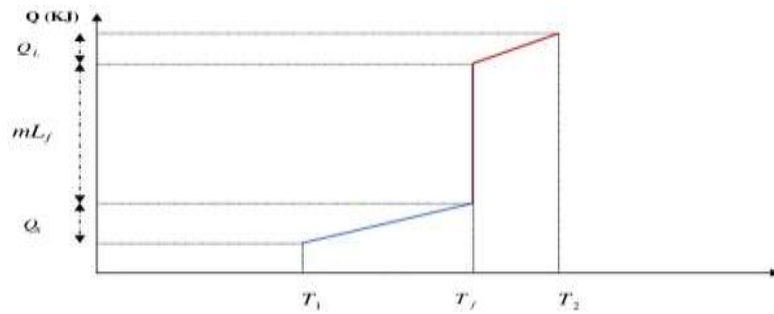


Figure. I.7 : Evolution de Q en fonction de T pour un corps pur [11]

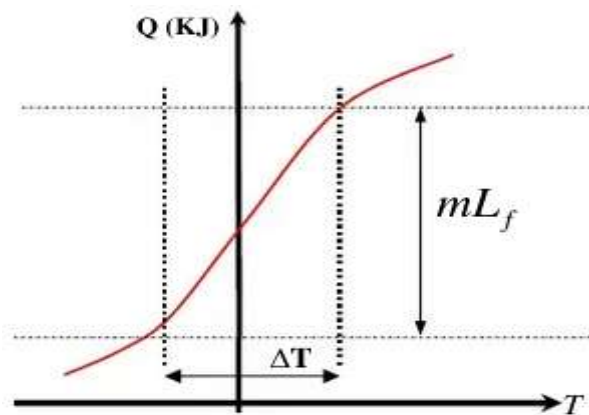


Figure. I.8 : Evolution de Q en fonction de T pour un mélange [11]

L'effet prédominant (liquide et solide) dépend du facteur x défini par la relation suivante :

$$x = \frac{mL_{fus}}{Q_{sol} + Q_{liq}} \quad (I.11)$$

Si le transfert de chaleur ne s'effectue que par chaleur latente sans perte alors on peut obtenir la quantité de chaleur par la relation suivante :

$$Q = mL_{fus} \quad (I.12)$$

t étant le temps nécessaire pour stocker ou restituer toute la chaleur latente.

I.6.2- La cristallisation :

Le changement de phase liquide/solide permet d'obtenir un solide cristallisé à partir de solutions aqueuses : c'est la cristallisation.

L'état cristallin ainsi obtenu est caractérisé par un arrangement régulier des atomes, des molécules ou des ions suivant un modèle rigide appelé réseau. C'est cet arrangement moléculaire qui fait la différence entre un solide cristallin et un solide amorphe (solide sans structure régulière) ;

La cristallisation est le résultat de deux processus successifs : la nucléation puis la formation d'un cristal macroscopique. La cristallisation est un processus qui s'accompagne d'un transfert de masse et de chaleur, elle résulte de deux transformations successives :

- La nucléation : genèse de noyaux solides.
- La croissance des noyaux et formation du cristal macroscopique

Dans le cas des hydrates salins (sels hydratés), le non déclenchement d'un des deux processus susmentionnés engendre un phénomène de surfusion. [11]

I.7- Classification des MCP

De nombreux MCP solide-liquide existent. Ils sont classés suivant leur température de fusion, leur chaleur latente de changement de phase ainsi que leurs caractéristiques thermo-physiques.[12]

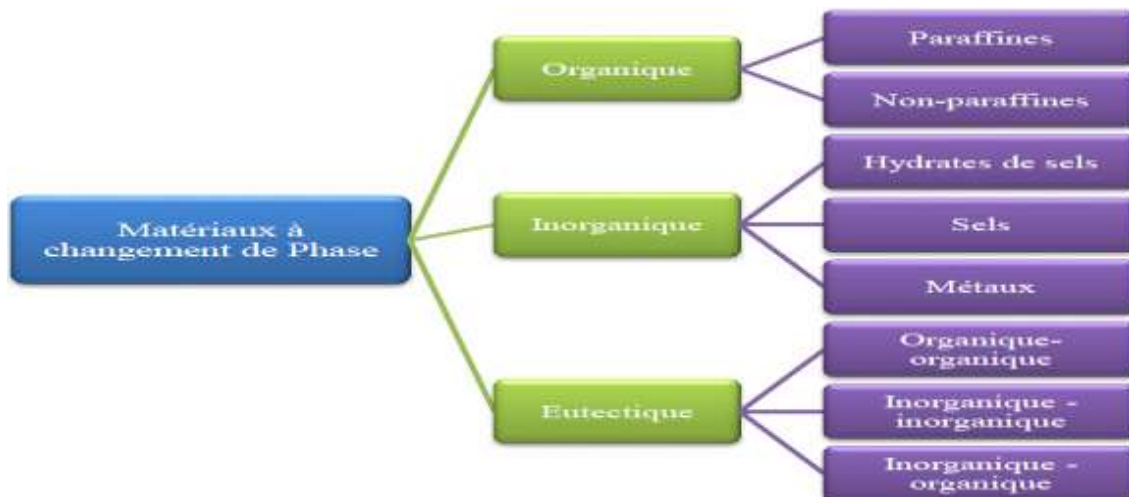


Figure. I.9 : Classification des MCP [3]

On peut classer les MCP selon trois catégories :

- Les composés organiques: paraffines, corps non paraffinés.
- Les composés inorganiques: hydrates de sels, sels et métaux.
- Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques. [3]

I.7.1- Les MCP Organiques :

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0° C et 150°. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. [13]

I.7.1.1- Les composés organiques paraffinés

Les MCP paraffinés ont été les MCP les plus couramment utilisés depuis le XXème siècle dans le domaine de la construction grâce à leur synthèse facile à mettre en œuvre et leur facilité à être micro-encapsulé. Une paraffine est un alcane d'hydrocarbures de formule générale C_nH_{n+2} . Le potentiel de stockage de chaleur latente est induit par la cristallisation de la chaîne CH_3 . Habituellement, l'enthalpie de changement d'état pour ces composés varie de 150 à 270 kJ/kg et dépend de sa pureté. La température de fusion et l'enthalpie de changement d'état sont conditionnées par la longueur de la chaîne carbonée. Le tableau (I.2) présente les propriétés thermiques de paraffines couramment utilisées. Les MCP paraffinés sont peu dispendieux et présentent une forte chaleur latente comparée aux MCP non paraffinés. En revanche, ils sont inflammables. C'est l'une des raisons qui font qu'aujourd'hui l'utilisation d'autres types de MCP est parfois préférée. [14]

NOM	FORMULE CHIMIQUE	TEMPÉRATURE DE FUSION (°C)	CHALEUR LATENTE DE FUSION (J/G)	MASSE MOLÉCULAIRE (G/MOL)
N-TETRADECANE	$C_{14}H_{30}$	6	228	198.39
N-PENTADECANE	$C_{15}H_{32}$	10	205	212.42
N-HEXADECANE	$C_{16}H_{34}$	18	237	226.44
N-HEPTADECANE	$C_{17}H_{36}$	22	213	240.47
N-OCTADECANE	$C_{18}H_{38}$	28	244	254.5
N-NONADECANE	$C_{19}H_{40}$	32	222	268.53
N-EICOSANE	$C_{20}H_{42}$	37	246	282.55
N-HENICOSANE	$C_{21}H_{44}$	40.5	200	296.58
N-DOCOSANE	$C_{22}H_{46}$	44.5	249	310.61
N-TRICOSANE	$C_{23}H_{48}$	47.5	232	324.63
N-TETRACOSANE	$C_{24}H_{50}$	52	255	338.66
N-PENTACOSANE	$C_{25}H_{52}$	54	238	352.69
N-HEXACOSANE	$C_{26}H_{54}$	56.5	256	366.71

Tableau. I.2 : Propriétés de différentes paraffines [14]

a) Les avantages des paraffines

La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.

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.K.

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 paraffinées 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

Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm.

La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³, et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. 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 paraffinées pures sont très coûteuses.

b) Les inconvénients des paraffines

Les cires paraffinées sont facilement inflammables.

Les cires paraffinées 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.

c) Conditionnement des paraffines

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

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

Les nodules.

Les cylindres avec ailettes ou non.

La micro-encapsulation.

Une autre méthode consiste à augmenter la conductivité apparente en incorporant une matrice métallique ou des fibres de carbone [15]

I.7.1.2- Les composés organiques non-paraffinés

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Lane (1983, 1989)[18], Abhat (1983) [17], Buddhi et coll. (1994) [31] ont mené une recherche approfondie sur les matières organiques et ont identifié un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols convenables pour le stockage de l'énergie. Les composés organiques non paraffinés sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines, qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Dans le tableau (I.3) des composés organiques non paraffinés sont donnés à titre d'exemple avec des propriétés thermo-physiques (Sharma et al, 2009) [16].

Matériaux	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (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
Docasyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120
Heptadécanone	41	201
1-Cyclohexylo octadécane	41	218
4-Heptadécanone	41	197

Tableau. I.3 : Propriétés thermo-physiques des matières organiques non paraffinés [16]

Les matières organiques non paraffinés sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques.

La formule chimique générale des acides gras est $\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{2n} \text{COOH}$ et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique

et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon (Abhat, 1983) [17]. Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs.

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

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

Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage d'énergie thermique à basse température sont représenté avec leurs propriétés thermo-physiques dans le tableau (I.4). [16]

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.

Matériaux	Formule	Point DE FUSION (°C)	Chaleur latente (kJ/kg)
Acide Acétique	CH ₃ COOH	16.7	184
Polyéthylène glycol 600	H(OC ₂ H ₂) _n -OH	20-25	146
Acide caprique	CH ₃ (CH ₂) ₈ -COOH	36	152
Acide elaidique	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ -COOH	47	218
Acide laurique	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ -COOH	49	178
Acide pentadécanoïque	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ -COOH	52.5	178
Tristéarine	(C ₁₇ H ₃₅ COO)C ₃ H ₅	56	191
Acide myristique	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ -COOH	58	199
Acide palmitique	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ -COOH	55	163
Acide stéarique	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ -COOH	69.4	199
Acétamide	CH ₃ CONH ₂	8.1	241
Fumarate de méthyle	(CH ₃ CO ₂ CNH ₂)	102	242

Tableau. I.4 : propriétés thermo-physiques des acides gras (Sharma et al.2009) [16]

I.7.2- Les MCP Inorganiques

Les MCP inorganiques (sels hydratés, sels, métaux, alliages.) ont une chaleur latente volumétrique importante, le point de fusion est net, la conductivité thermique est importante,

ils sont no-inflammable, facilement disponible et peu cher. En revanche, le phénomène surfusion est important.

I.7.2.1- Les sels hydratés

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale AB_nH_2O . Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

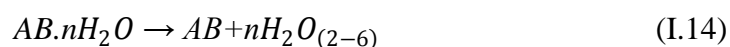
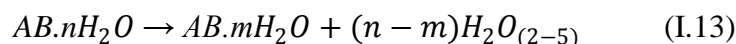
- La température de fusion élevée
- une haute enthalpie de fusion
- Une conductivité thermique élevée

En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement et d'être corrosifs

[16], [17].

Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase pour l'utilisation des hydrates de sels comme PCM sont l'addition d'un épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin. Dans la première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un polymère gel. En outre, un agent de nucléation est ajouté pour éviter les phénomènes de surfusion.

La transformation solide – liquide des hydrates de sels est en réalité une déshydratation du sel, bien que ce processus ressemble thermodynamiquement à la fusion/cristallisation. Un sel hydraté se transforme habituellement soit en un hydrate de sel appauvri de quelques moles d'eau, soit au même sel dans sa forme anhydre selon les équations chimiques suivantes :



Au point de fusion les cristaux d'hydrates se transforment en un sel anhydre ou en un sel faiblement hydraté et de l'eau. Un problème avec la plupart des sels hydratés est celle de la fusion incongruente causé par le fait que l'eau libérée ne suffit pas à dissoudre toute la phase

solide présente. En raison de la différence de densité, le sel anhydre se dépose au fond du récipient donnant lieu à une séparation des phases.

Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase dans l'utilisation des hydrates de sels comme PCM sont l'épaississement et la gélification. Dans la première méthode, un agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un gel polymère [18].

La plupart des sels hydratés ont aussi de pauvres propriétés de nucléation, impliquant la surfusion de la phase liquide avant la cristallisation. Une solution à ce problème consiste à ajouter un agent de nucléation, qui fournit le nucléon (germe) qui permet d'amorcer la cristallisation. Une autre possibilité consiste à conserver certains cristaux, dans une zone froide du milieu, pour servir de noyaux pour l'amorçage de la cristallisation. [19]

Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins

- La surfusion (ou sous-refroidissement) :

On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.

- 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. Comme agents épaississants on utilise de la cellulose, de la fécule, de la sciure, du 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

- 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.

- Leur caractère corrosif, ce qui les rend incompatibles avec de nombreux matériaux de construction utilisés dans les bâtiments.

Ce dernier problème a reçu un début de solution en encapsulant les MCP dans des capsules métalliques ou de matière plastique. On distingue la macro-encapsulation et la micro encapsulation. [7]

I.7.2.2. Sels

purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type. Les fluorures et les chlorures présentent ainsi une chaleur latente plus élevée que les nitrates ou les sulfates [8].

Les sels les plus connus sont les nitrates comme le NaNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 307 \text{ }^\circ\text{C}$), le KNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 333 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le LiNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$).

Avantages

Ces matériaux sont très intéressants pour leur utilisation dans le stockage thermique à haute température, car ils possèdent une température de fusion entre 250 et 1680 °C et des chaleurs latentes de fusion entre 68 et 1040 kJ/kg. L'intérêt des sels est qu'ils présentent une expansion volumique beaucoup plus faible que les composés organiques (de l'ordre de 7 %) [21].

Comme les hydrates de sels, un des avantages est leur coût relativement faible devant les composés organiques, ce qui les rend attractifs pour leur utilisation dans le stockage latent.

Inconvénients

Certains sels peuvent aussi présenter un peu de surfusion. Un autre point non négligeable est leur aptitude à corroder les métaux, ce qui rend la conception des réservoirs de stockage plus compliquée. Par ailleurs, les sels peuvent être des oxydants puissants et sont donc incompatibles avec les huiles thermiques, dont l'utilisation comme fluide caloporteur sera à proscrire. Enfin, quelques sels présentent des problèmes de stabilité thermique, leurs propriétés pouvant s'altérer avec le temps.

I.7.2.3. Métaux

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP,

. On peut citer notamment le Potassium ($T_{\text{fusion}} = 63.2 \text{ }^\circ\text{C}$), le Bi58Sn42 ($T_{\text{fusion}} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le Lithium ($T_{\text{fusion}} = 186 \text{ }^\circ\text{C}$).

Avantages

Les avantages que présentent les métaux sont leur conductivité thermique bien plus grande que les autres types de MCP, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique.

Inconvénients

Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse. De plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion. Les quelques MCP envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.

Les principaux points communs entre ces trois groupes sont

- Température de fusion élevée
- Grande chaleur latente
- Conductivité thermique plus élevée, surtout pour les métaux [3].

I.7.3- Les eutectiques

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont de températures de fusion très précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins.

Les eutectiques ont un potentiels important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire.

Les eutectiques sont classé en eutectiques organiques, eutectiques inorganiques, eutectiques organiques-inorganiques.

Sur le tableau [I.5] on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

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

Tableau. I.5 : Liste de quelques Eutectiques[3]

I.8- Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux généralités sur les matériaux à changement de phase MCP où on a défini le principe de changement de phase et parlé des propriétés de ces matériaux ainsi que leurs classifications.

Chapitre II

Stockage de l'Energie Thermique

Chapitre II Stockage de l'Énergie Thermique

II.1. Généralités

L'un des principaux aspects des systèmes solaires est le stockage. Le stockage d'énergie thermique (TES) est une technologie qui stocke l'énergie en chauffant ou en refroidissant un support de stockage afin que cette énergie puisse être utilisée ultérieurement pour des applications de chauffage et de refroidissement et la production de l'électricité. Les systèmes TES sont particulièrement utilisés dans les bâtiments et les processus industriels. Dans ces applications, environ la moitié de l'énergie consommée est sous forme d'énergie thermique dont la demande peut varier au cours d'une journée donnée et d'un jour à l'autre. Par conséquent, les systèmes TES peuvent aider à équilibrer la demande et l'offre d'énergie sur une base quotidienne, hebdomadaire et même saisonnière. Les avantages de l'utilisation du TES dans un système énergétique sont l'augmentation de l'efficacité globale et une meilleure fiabilité, mais cela peut également conduire à une meilleure économie, à une réduction des investissements et des coûts de fonctionnement, à moins de pollution de l'environnement et à moins d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) [21]. Les TES deviennent particulièrement important pour le stockage d'électricité en combinaison avec des centrales solaires à concentration (CSP) où la chaleur solaire peut être stockée pour la production d'électricité lorsque la lumière du soleil n'est pas disponible.

En Europe, il a été estimé qu'environ 1,4 million de GWh / an pourraient être économisés et 400 millions de tonnes d'émissions de CO₂ évitées, dans les secteurs du bâtiment et de l'industrie grâce à une utilisation plus étendue du stockage de chaleur et de froid [22].

La densité de stockage, en termes de quantité d'énergie par unité de volume ou de masse, est un enjeu important pour les applications afin d'optimiser un rapport solaire (quelle quantité de rayonnement solaire est utile à des fins de chauffage / refroidissement), l'efficacité des appareils électroménagers (capteurs solaires thermiques et refroidisseurs à absorption) et consommation des locaux. Pour ces raisons, il convient d'étudier la possibilité d'utiliser des matériaux à changement de phase (MCP) dans les applications du système solaire.

Le potentiel des MCP est d'augmenter la densité énergétique des réservoirs de stockage d'eau de petite taille, en réduisant le volume de stockage solaire pour une fraction solaire donnée ou en augmentant la fraction solaire pour un volume disponible donné [23].

Il est possible de penser au stockage thermique dans le côté chaud et / ou dans le côté froid de l'installation. Le premier permet le stockage de l'eau chaude des collecteurs (et du chauffage d'appoint) à fournir au générateur du refroidisseur à absorption (en mode refroidissement) ou directement aux utilisateurs (en mode chauffage). Ce dernier permet le stockage de l'eau froide produite par le refroidisseur à absorption aux bornes de refroidissement à l'intérieur du bâtiment.

Il est courant d'identifier les trois situations que l'on vient de décrire comme, respectivement, stockage «chaud», «chaud» et «froid» en raison des différentes plages de température. En règle générale, un réservoir chaud peut fonctionner entre (80 et 90°), un réservoir chaud entre (40 et 50°) et un réservoir froid entre (7 et 15°).

Alors que le stockage de chaleur du côté chaud des centrales solaires sont toujours présents en raison de la production de chauffage et / ou d'eau chaude sanitaire (ECS), le stockage DU froid est justifié dans les installations de plus grande taille. Les entrepôts frigorifiques sont utilisés non seulement pour obtenir des avantages économiques et des tarifs d'électricité (en cas de refroidisseur électrique à compression) en fonction de l'heure de la journée, mais aussi pour réduire la puissance de refroidissement installée et permettre un fonctionnement plus continu du refroidisseur [24].

Le soutien à la recherche et au développement (R et D) de nouveaux matériaux de stockage, ainsi que les mesures politiques et les incitations à l'investissement pour l'intégration des TES dans les bâtiments, les applications industrielles et la production d'énergie renouvelable variable, sont essentiels pour favoriser son déploiement.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse des technologies TES qui permettent de valoriser la chaleur solaire et de réduire la demande énergétique. Les principes de plusieurs méthodes de stockage d'énergie et le calcul des capacités de stockage sont décrits. Les technologies de stockage de chaleur sensible, y compris l'utilisation de l'eau, du sous-sol et du lit compact, sont brièvement passées en revue. Les systèmes de stockage de chaleur latente (LHS) associés aux MCP destinés à être utilisés dans le chauffage et le refroidissement solaires, les systèmes de chauffage, de pompe à chaleur solaires et le stockage de chaleur thermochimique sont également présentés. De plus, un modèle de simulation de transfert de chaleur tridimensionnel de TES à chaleur latente est développé pour étudier l'état quasi-stationnaire et le transfert de chaleur transitoire des MCP.

Les résultats des systèmes utilisant la paraffine RT20 sont présentés et des informations exceptionnelles sur les performances et les coûts des systèmes TES sont incluses.

II.2. Classification et caractéristiques des systèmes de stockage

Les principaux types de TES de l'énergie solaire sont présentés sur la (Fig. II.1). Une énergie du système de stockage peut être décrite en fonction des caractéristiques suivantes:

. La **capacité** définit l'énergie stockée dans le système et dépend du processus de stockage, du milieu et de la taille du système;

- . La puissance définit la vitesse à laquelle l'énergie stockée dans le système peut être déchargée (et chargée);
- . L'**efficacité** est le rapport entre l'énergie fournie à l'utilisateur et l'énergie nécessaire pour charger le système de stockage. Il tient compte de la perte d'énergie pendant la période de stockage et le cycle de charge / décharge;
- . La **période de stockage** définit la durée pendant laquelle l'énergie est stockée et dure des heures, mois (c.-à-d. heures, jours, semaines et mois pour le stockage saisonnier)

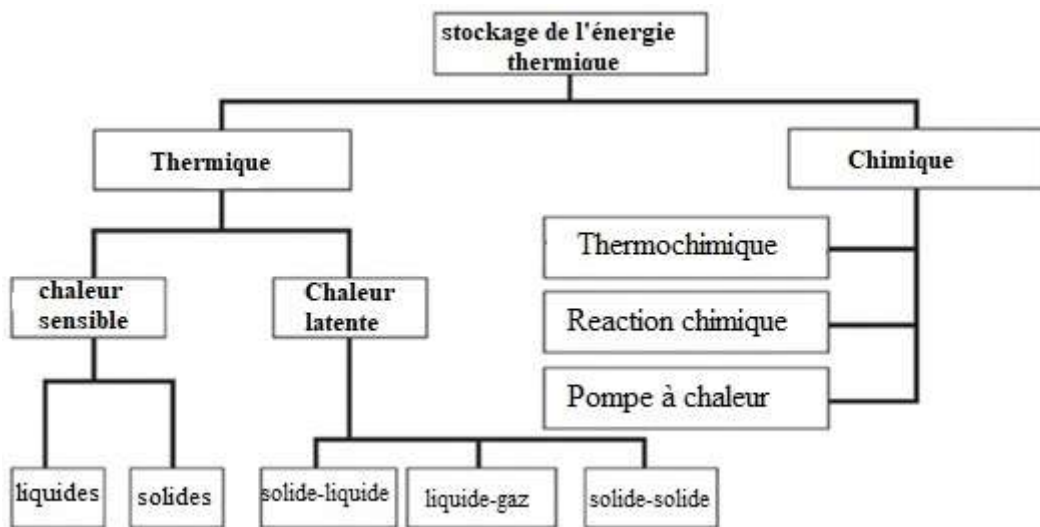


Figure II.1 : Types de stockage d'énergie solaire [25]

Les temps de charge et de décharge définissent le temps nécessaire pour charger / décharger le système; et Le coût fait référence à la capacité (V / kWh) ou à la puissance (V / kW) du système de stockage et dépend des coûts d'investissement et d'exploitation de l'équipement de stockage et de sa durée de vie (c'est-à-dire le nombre de cycles).

La capacité, la puissance et le temps de décharge sont des variables interdépendantes, et dans certains systèmes de stockage, la capacité et la puissance peuvent également dépendre l'une de l'autre.

Les paramètres typiques des systèmes TES sont indiqués dans le (tableau II.1) [25], y compris la capacité, la puissance, l'efficacité, la période de stockage et le coût. Une densité de stockage à haute énergie et une capacité de puissance élevée pour la charge et la décharge sont des propriétés souhaitables de tout système de stockage. Il est bien connu qu'il existe trois méthodes de TES à des températures comprises entre (40°C) et plus de (400°C) : la chaleur sensible, la chaleur

latente associée aux PCM et le stockage thermochimique (TCS) associé aux réactions chimiques (Fig. II.2) [26].

Le choix du support de stockage dépend de la nature du processus.

Pour le chauffage de l'eau, le stockage d'énergie sous forme de chaleur sensible de l'eau stockée est logique. Si des collecteurs de chauffage de l'air sont utilisés, le stockage sous l'effet de chaleur sensible ou latente dans des unités de stockage de particules est indiqué, comme la chaleur sensible dans un échangeur de chaleur à lit de galets. En chauffage passif, le stockage est fourni sous forme de chaleur sensible lors de la construction des éléments. Si des procédés photovoltaïques ou photochimiques sont utilisés, le stockage se fait logiquement sous forme d'énergie chimique.

II.3. Stockage de la chaleur sensible

Le stockage de chaleur sensible (SHS) (Fig. II.2A) est la méthode la plus simple basée sur le stockage de l'énergie thermique en chauffant ou en refroidissant un milieu de stockage liquide ou solide (par exemple, eau, sable, sels fondus ou roches), l'eau étant la moins chère option.

TES System	Capacity (kWh/t)	Power (MW)	Efficiency (%)	Storage Period	Cost (€/kWh)
Sensible (hot water)	10–50	0.001–10	50–90	days/ months	0.1–10
PCM	50–150	0.001–1	75–90	hours/ months	10–50
Chemical reactions	120–250	0.01–1	75–100	hours/ days	8–100

Tableau II.1 : Paramètres typiques des systèmes TES [27]

Le moyen de stockage de chaleur le plus populaire et commercial est l'eau, qui a un certain nombre d'applications résidentielles et industrielles. Le stockage souterrain de la chaleur sensible dans des milieux liquides et solides est également utilisé pour des applications généralement à grande échelle. SHS a deux avantages principaux: il est bon marché et sans les risques liés à l'utilisation de matériaux toxiques.

Le système SHS utilise la capacité thermique et le changement de température du support de stockage pendant le processus de charge et de décharge. La quantité de chaleur stockée dépend de la chaleur spécifique du milieu, du changement de température et de la quantité de matériau de stockage [27].

$$Q_s = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT \quad (\text{II.1})$$

Où Q_s est la quantité de chaleur emmagasinée, en J; m est la masse du milieu de stockage de chaleur, en kg; c_p est la chaleur spécifique, en $J/kg \cdot C^\circ$; T_i est la température initiale, en $^\circ C$; et T_f est la température finale, en $^\circ C$.

Les capacités SHS de certains matériaux solides liquides sélectionnés sont indiquées dans le (tableau II.2). L'eau semble être le meilleur liquide SHS disponible car elle est peu coûteuse et a une chaleur spécifique élevée. Cependant, au-dessus de $100C^\circ$, les huiles, fondus des sels, des métaux liquides, etc. sont utilisés. Pour les applications de chauffage de l'air, des matériaux de stockage de type lit de roche sont utilisés.

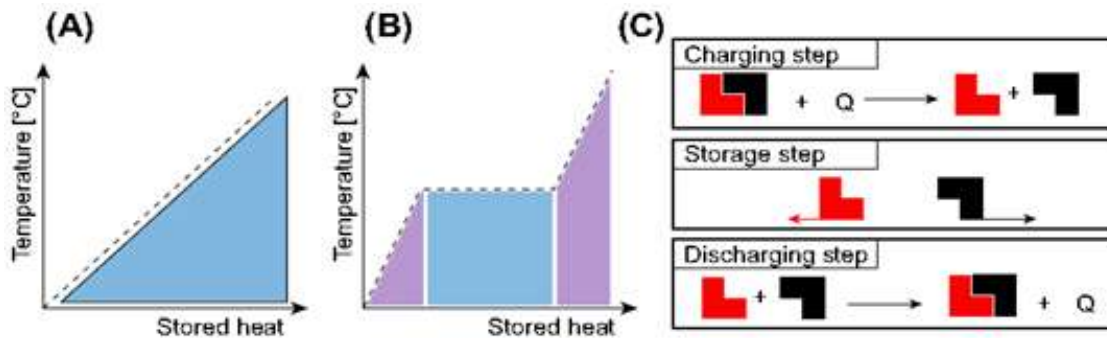


Figure II.2 : Méthodes de stockage de l'énergie thermique (A) chaleur sensible, (B) chaleur latente, (C) réactions thermo-chimiques [28]

Medium	Fluid Type	Temperature Range ($^\circ C$)	Density (kg/m^3)	Specific Heat ($J/(kg \cdot K)$)
Rock	–	20	2560	879
Brick	–	20	1600	840
Concrete	–	20	1900–2300	880
Water	–	0–100	1000	4190
Calorie HT43	Oil	12–260	867	2200
Engine oil	Oil	≤ 160	888	1880
Ethanol	Organic liquid	≤ 78	790	2400
Propane	Organic liquid	≤ 97	800	2500
Butane	Organic liquid	≤ 118	809	2400
Isotunaol	Organic liquid	≤ 100	808	3000
Isopentanol	Organic liquid	≤ 148	831	2200
Octane	Organic liquid	≤ 126	704	2400

Tableau II.2: Liste des matériaux solide-liquide sélectionnés pour le stockage sensible de la Chaleur [28]

II.3.1. Stockage avec réservoir d'eau

L'utilisation de réservoirs d'eau chaude est une technologie bien connue pour SET. Les réservoirs d'eau chaude servent à économiser de l'énergie dans les systèmes de chauffage de l'eau basés sur l'énergie solaire et dans les systèmes d'alimentation en énergie de cogénération (c.-à-d., Chaleur et électricité).

Des projets à la pointe de la technologie [28] ont montré que le stockage en réservoir d'eau est une option de stockage rentable et que son efficacité peut être encore améliorée en assurant une stratification optimale de l'eau dans le réservoir et une isolation thermique très efficace. Les activités de R&D d'aujourd'hui se concentrent, par exemple, sur la super isolation sous vide avec une conductivité thermique de $0,01 \text{ W/mK}$ à 90°C et $0,1 \text{ mbar}$ et sur une intégration système optimisée. Un système typique dans lequel un réservoir d'eau est utilisé est illustré à la (Fig. II.3). La capacité de stockage d'énergie d'une unité de stockage d'eau (ou d'un autre liquide) à température uniforme (c'est-à-dire entièrement mélangée ou non stratifiée) fonctionnant sur une différence de température finie est donnée par l'équation. (II.1) redéfini comme :

$$Q_s = mc_p \Delta T_s \quad (\text{II.2})$$

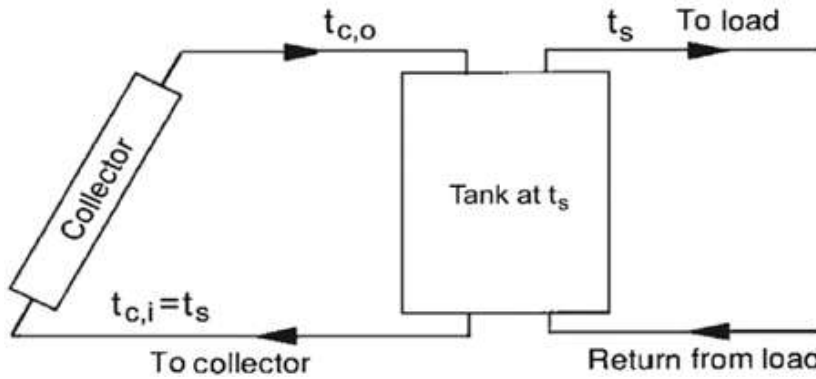


Figure II.3 : Un système typique utilisant le stockage de réservoir d'eau [30]

Où Q_s est la capacité thermique totale pour un cycle fonctionnant dans la plage de température ΔT_s et m , c_p sont respectivement la masse et la chaleur spécifique de l'eau dans l'unité. La plage de température sur laquelle une telle unité peut fonctionner est limitée à l'extrémité inférieure pour la plupart des applications par les exigences du processus. La limite supérieure peut être déterminée par le procédé, la pression de vapeur du liquide ou la perte de chaleur du collecteur. Un bilan énergétique sur le réservoir non stratifié est :

$$mc_p \frac{dT_s}{dt} = Q_u - Q_L - U_s A_s (T_i - T_a) \quad (\text{II.3})$$

Où Q_u et Q_L sont les taux d'addition ou de retrait d'énergie du collecteur et de la charge; U_s est le coefficient de perte de chaleur du réservoir de stockage; Tout comme la surface du réservoir de stockage; T_a est la température ambiante du réservoir. (t) est le temps.

Équation (II.3) doit être intégrée dans le temps pour déterminer les performances à long terme de l'unité de stockage et du procédé solaire. Des solutions analytiques utiles à long terme ne sont pas possibles en raison de la dépendance temporelle complexe de certains termes. Il existe de nombreuses méthodes d'intégration numérique possibles. L'utilisation d'une simple intégration d'Euler est généralement satisfaisante (c'est-à-dire, réécrire la dérivée de température comme $(T_s - T_i)/Ds$ et résoudre la température du réservoir à la fin d'un incrément de temps):

$$T_s = T_i + \frac{\Delta t}{mc_p} [Q_u - Q_L - U_s A_s (T_i - T_a)] \quad (\text{II.4})$$

Equation (II.4) peut être utilisée pour prévoir la température de stockage de l'eau en fonction du temps. Une fois que la température du réservoir est connue, d'autres quantités dépendantes de la température peuvent être estimées.

Les systèmes de stockage d'eau chaude utilisés comme stockage tampon pour la fourniture d'ECS sont généralement de l'ordre de 500 L à plusieurs mètres cubes (m^3). Cette technologie est également utilisée dans les installations solaires thermiques pour l'eau chaude sanitaire combinées avec les systèmes de chauffage des bâtiments (systèmes combinés). Les grands réservoirs d'eau chaude sont utilisés pour le stockage saisonnier de la chaleur solaire thermique en combinaison avec de petits systèmes de chauffage urbain. Ces systèmes peuvent avoir un volume allant jusqu'à plusieurs milliers de mètres cubes. Les températures de charge sont de l'ordre de (80 et 90°C). La différence de température utilisable peut être augmentée par l'utilisation de pompes à chaleur pour la décharge (jusqu'à des températures d'environ 10°C).

II.3.2. Stockage souterrain

Le stockage thermique souterrain est également une technologie de stockage largement utilisée, qui utilise le sol (par exemple, la terre, le sable, les roches et l'argile) comme moyen de stockage pour les accumulateurs de chaleur et de froid.

Des moyens doivent être prévus pour ajouter de l'énergie au milieu et l'en retirer.

Cela se fait en pompant des fluides caloporteurs à travers des réseaux de tuyaux dans le sol. Les tuyaux peuvent être des tubes en U verticaux insérés dans des puits (forages) qui sont espacés à des intervalles appropriés dans le champ de stockage ou bien des tuyaux horizontaux enfouis dans des tranchées. Les taux de chargement et de déchargement sont limités par la surface des réseaux de tuyaux et les taux de transfert de chaleur à travers le sol entourant les tuyaux. Si le milieu de stockage est poreux, le transport d'énergie peut se faire par évaporation et condensation et par le

mouvement de l'eau à travers le milieu, et une analyse complète d'un tel stockage doit prendre en compte à la fois les transferts de chaleur et de masse. Ces systèmes de stockage ne sont généralement pas isolés, bien qu'une isolation puisse être prévue à la surface du sol.

Les trous de forage (échangeurs de chaleur souterrains) sont également fréquemment utilisés en combinaison avec des pompes à chaleur où l'échangeur de chaleur souterrain extrait la chaleur à basse température du sol.

Le stockage en aquifère est étroitement lié au stockage souterrain, sauf que le principal moyen de stockage est l'eau, qui s'écoule à faible débit dans le sol. L'eau est pompée hors du sol et dans le sol pour le chauffer et en extraire de l'énergie. L'écoulement de l'eau fournit également un mécanisme d'échange de chaleur avec le sol lui-même. En pratique, les aquifères ne peuvent pas être isolés.

Seuls les aquifères qui ont un faible débit naturel à travers le champ de stockage peuvent être utilisés. Une autre limitation peut être liée aux réactions chimiques de l'eau chauffée avec les matériaux du sol.

Les aquifères, tout comme le stockage souterrain, fonctionnent sur des plages de température plus petites que les réservoirs d'eau. La plupart des applications concernent le stockage du froid hivernal pour le refroidissement de grands immeubles de bureaux et de processus industriels en été.

Le stockage en caverne et le stockage en fosse sont basés sur de grands réservoirs d'eau souterrains créés dans le sous-sol pour servir de systèmes TES. Les principes de fonctionnement des cavernes sont les mêmes que ceux des réservoirs évoqués dans la section précédente.

L'énergie est ajoutée ou retirée du stockage en pompant de l'eau dans ou hors de l'unité de stockage. La principale différence réside dans les mécanismes de perte de chaleur et dans l'éventuel couplage thermique avec le sol. Ces options de stockage sont techniquement réalisables, mais les applications sont limitées en raison des coûts d'investissement élevés

Pour les SHS à haute température (c'est-à-dire supérieure à 100°C), la technologie de choix repose sur l'utilisation de liquides (par exemple, l'huile ou les sels fondus, ces derniers pour des températures allant jusqu'à 550°C). Pour les températures très élevées, les matériaux solides (par exemple, la céramique, le béton) sont également pris en considération. Toutefois, la plupart de ces options de TES sensibles aux températures élevées sont encore en cours de développement ou de démonstration.

II.3.3. Stockage sur lit de galets

Une unité de stockage en lit de galets (packed-bed) utilise la capacité thermique d'un lit de particules non tassées pour stocker l'énergie. Un fluide, généralement de l'air, circule à travers le

lit pour ajouter ou retirer de l'énergie. Diverses matières solides peuvent être utilisées, les roches et les galets étant les matériaux les plus utilisés.

La (figure II.4) montre une unité de stockage sur lit de galets. En fonctionnement, le flux est maintenu à travers le lit dans une direction pendant l'ajout de chaleur (généralement vers le bas) et dans la direction opposée pendant le retrait de la chaleur. Notez que la chaleur ne peut pas être ajoutée et retirée en même temps, contrairement aux systèmes de stockage d'eau, où l'ajout et le retrait simultanés sont possibles.

L'un des principaux avantages d'un stockage en lit tas est son degré élevé de stratification.

Les galets situés près de l'entrée sont chauffés, mais la température des galets situés près de la sortie reste inchangée et la température de l'air de sortie reste très proche de la température initiale du lit. Au fil du temps, un front de température traverse le lit. Lorsque le lit est complètement chargé, sa température est uniforme.

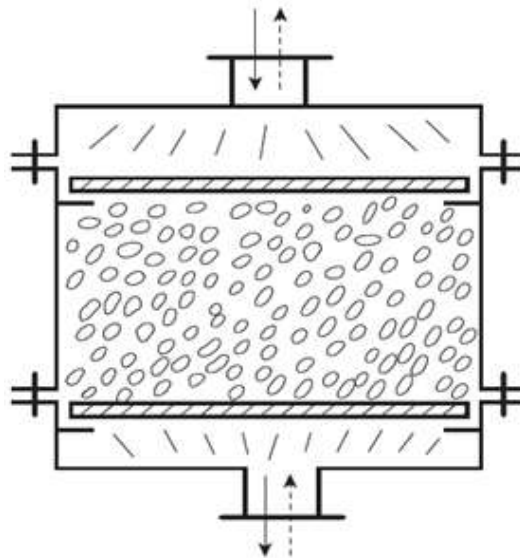


Figure II.4 : Système de stockage sur lit de galets [30]

Un lit à garnissage dans un système de chauffage solaire ne fonctionne normalement pas avec une température d'entrée constante. Pendant la journée, le rayonnement solaire variable, la température ambiante, la température d'entrée du capteur, les exigences de charge et d'autres conditions dépendantes du temps font que la température de sortie du capteur est variable.

De nombreuses études sont disponibles sur le chauffage et le refroidissement des lits à garnissage. La première étude analytique a été réalisée par Schumann [29] et les hypothèses de base qui ont conduit à ce modèle sont les suivantes : écoulement unidimensionnel, pas de conduction ou de dispersion axiale, propriétés constantes, pas de transfert de masse, pas de perte de chaleur dans l'environnement et pas de gradient de température dans les particules solides. Les équations différentielles pour les températures du fluide et du lit (T_f, T_b) sont les suivantes:

$$\rho_f c_{p,f} \varepsilon \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\frac{m_f c_{p,f}}{A} \frac{\partial T_f}{\partial x} + k_v (T_b - T_f) \quad (\text{II.5})$$

$$\rho_b c_{p,b} (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_b}{\partial t} = k_v (T_f - T_b) \quad (\text{II.6})$$

Où ρ_f est la masse volumique du fluide ; $c_{p,f}$ est la chaleur spécifique du fluide ; ε est la fraction de vide du lit ; m_f est la masse du fluide ; A est la section transversale du lit ; k_v est le coefficient de transfert de chaleur volumétrique (par unité de volume du lit) entre le lit et le fluide ; et t est le temps.

Pour un système à base d'air, le premier terme à gauche de l'équation (2.5) peut être négligé et les équations peuvent s'écrire [30] :

$$\frac{\partial T_f}{\partial (x/L)} = NUT (T_b - T_f) \quad (\text{II.7})$$

$$\frac{\partial t_b}{\partial \theta} = NUT (T_f - T_b) \quad (\text{II.8})$$

$$NUT = \frac{k_v AL}{m_f c_{p,f}} \quad (\text{II.9})$$

Et le temps sans dimension est :

$$\theta = \frac{t m_f c_{p,f}}{\rho_b c_{p,b} (1 - \varepsilon) AL} \quad (\text{II.10})$$

Où A est la section transversale du lit, L est la longueur du lit et NUT est l'efficacité.

Il existe des solutions analytiques à ces équations pour un changement progressif des conditions d'admission et pour un fonctionnement cyclique. Pour l'étude à long terme des systèmes d'énergie solaire, ces solutions analytiques ne sont pas utiles et des techniques numériques comme la méthode des différences finies doivent être employées.

II.4. Stockage de la chaleur latente

La densité de stockage d'énergie augmente et donc le volume est réduit, dans le cas de la LHS (Fig. II.2 B). La chaleur est principalement stockée dans le processus de changement de phase (à une température assez constante) et elle est directement liée à la chaleur latente de la substance. L'utilisation d'un système LHS utilisant des MCP est un moyen efficace de stocker l'énergie thermique et présente les avantages d'une densité de stockage élevée et de la nature isotherme du processus de stockage.

La LHS est basée sur l'absorption ou la libération de chaleur lorsqu'un matériau de stockage subit un changement de phase, passant de solide à liquide ou de liquide à gaz ou vice versa. La capacité de stockage Q_s , en J, du système LHS avec un milieu PCM [27] est donnée par :

$$Q_s = \int_{T_i}^{T_{fus}} mc_p dT + mf\Delta q + \int_{T_{fus}}^{T_f} mc_p dT \quad (\text{II.11})$$

$$Q_s = m[c_{ps}(T_{fus} - T_i) + f\Delta q + c_{pl}(T_f - T_{fus})] \quad (\text{II.12})$$

Où T_{fus} est la température de fusion, en °C ; m est la masse du milieu PCM, en kg ; c_{ps} est la chaleur spécifique moyenne de la phase solide entre T_i et T_{fus} , en kJ/(kg. K) ; c_{pl} est la chaleur spécifique moyenne de la phase liquide entre T_{fus} et T_f , en J/(kg. K) ; f est la fraction fondue ; et Δq est la chaleur latente de fusion, en J/kg.

Les techniques de mesure actuellement utilisées pour la chaleur latente de fusion et la température de fusion des PCM sont les suivantes :

(1) analyse thermique différentielle (DTA), et (2) calorimètre différentiel à balayage (DSC) [31]. Dans les techniques DSC et DTA, l'échantillon et les matériaux de référence sont chauffés à des taux constants. La différence de température entre eux est proportionnelle à la différence de flux thermique entre les deux matériaux et l'enregistrement est la courbe DSC. Le matériau de référence recommandé est l'alumine (Al_2O_3). La chaleur latente de fusion est calculée en utilisant l'aire sous le pic et la température de fusion est estimée par la tangente au point de plus grande pente sur la partie frontale du pic.

Morrison et Abdel-Khalik [32] ont développé un modèle applicable aux MCP dans de petits conteneurs, où la longueur dans la direction de l'écoulement est L , la section transversale du matériau est A , et le périmètre mouillé est P . Le HTF traverse l'unité de stockage dans la direction x au débit massique m et avec une température d'entrée $T_{f,i}$.

Le modèle peut être basé sur trois hypothèses :

- (1) pendant l'écoulement, la conduction axiale dans le fluide est négligeable ;
- (2) l'indice de Biot est suffisamment bas pour que les gradients de température normaux à l'écoulement puissent être négligés ; et (3) les pertes de chaleur du lit sont négligeables.

Un bilan énergétique sur la matière donne :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{\rho_s} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{UP}{\rho_s A} (T_f - T_s) \quad (\text{II.13})$$

Où u, T_s, λ_s et ρ_s sont l'énergie interne spécifique, la température, la conductivité thermique et la densité du MCP ; T_f, U sont la température du fluide circulant et le coefficient global de transfert de chaleur entre le fluide et le MCP ; et t est le temps.

Un bilan énergétique sur le fluide est :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + \frac{m}{\rho_f A_f} \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{UP}{\rho_f A_f c_{p,f}} (T_s - T_f) \quad (\text{II.14})$$

Où $\rho_f, A_f,$ et $c_{p,f}$ sont la masse volumique, la surface d'écoulement et la chaleur spécifique du fluide.

L'équation et les conditions limites du stockage MCP peuvent être simplifiées pour des cas particuliers. Il a été démontré que la conduction axiale pendant l'écoulement est négligeable, et si la capacité du fluide est faible, les équations (2.13) et (2.14) deviennent [30] :

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} = NUT(T_s - T_f) \quad (\text{II.15})$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial (x/L)} = NUT(T_f - T_s) \quad (\text{II.16})$$

Le processus de changement de phase se déroule selon différents modes : solide, liquide-gaz et solide-liquide. Dans le premier cas, la chaleur est stockée par transition entre différents types de formes de cristallisation. Dans le cas des systèmes à gaz liquide, la chaleur latente est très élevée, mais il y a quelques problèmes dans le contrôle du stockage en raison des fortes variations de volume pendant un changement de phase.

Les plus répandus sont les MCP solide liquides qui ont une variation de volume limitée pendant l'échange (généralement moins de 10%) et une chaleur latente de fusion assez élevée. Les processus de fusion impliquent des densités énergétiques de 100 kWh/ m³ (par exemple, de la glace), contre 25 kWh/ m³ en général pour les options SHS. Les MCP peuvent être utilisés pour le stockage d'énergie à court terme (quotidien) et à long terme (saisonnier), en utilisant une variété de techniques et de matériaux. Les applications possibles des MCP sont les suivantes :

. La mise en œuvre dans des plaques de plâtre, du plâtre, du béton ou d'autres matériaux de revêtement mural faisant partie de la structure du bâtiment pour améliorer la capacité des centrales thermiques, avec une utilisation principale dans le décalage des charges de pointe (et les économies) et l'énergie solaire [33]. Dans cette application, la température de fonctionnement typique est de 22 à 25°C, mais elle peut varier en fonction du climat et des charges de chauffage/refroidissement.

- . Stockage du froid pour les installations de refroidissement (température de fonctionnement 5 à 18°C) [34].
- . Stockage du chaud pour les installations de chauffage (45 a 60°C) [35].
- . Stockage du chaud pour le refroidissement et le chauffage solaires (>80°C) [36].

Tout système de stockage de chaleur latente possède donc au moins les trois composants suivants :

1. un MCP approprié dont le point de fusion se situe dans la plage de température souhaitée,
2. une surface d'échange thermique appropriée,
3. un conteneur approprié compatible avec la MCP.

II.4.1. Caractéristiques des MCP

Les principales propriétés des MCP sont les suivantes :

Thermo physiques (la chaleur latente de transition et la conductivité thermique doivent être élevées, la variation de densité et de volume pendant une transition de phase doit être respectivement élevée et faible afin de minimiser le volume de stockage) ; 1 cinétiques et chimiques (la sur-refroidissement doit être limité à quelques degrés, les matériaux devraient avoir une stabilité chimique à long terme, être compatibles avec les matériaux de construction, ne pas être toxiques, ne pas présenter de risque d'incendie) ; et 1 économie (le faible coût et la disponibilité à grande échelle des PCM sont également très importants).

Un grand nombre de PCM (organiques, inorganiques et eutectiques) sont disponibles dans toutes les plages de température requises. Les MCP sont classés en différents groupes selon la nature du matériau (paraffine, acides gras, hydrates de sel, etc.) (Fig. II.5).

Si l'on considère les applications réelles en matière de stockage d'énergie thermique, les matériaux les plus répandus sont la paraffine (organique), les sels hydratés (inorganiques) et les acides gras (organiques). Dans le stockage du froid, l'eau glacée est également très utilisée. Le (tableau II.3) présente certains des MCP les plus pertinents dans différentes plages de température avec leur température de fusion, leur enthalpie et leur densité.

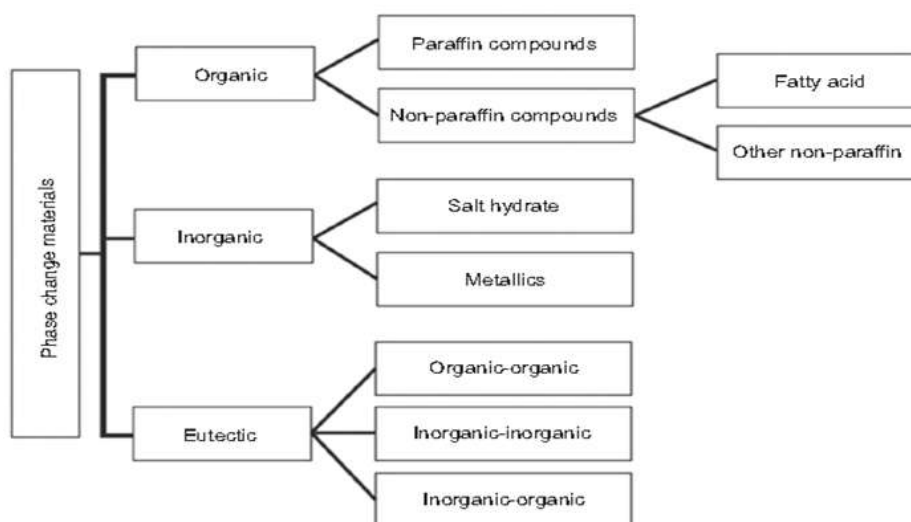


Figure II.5 : Classification des MCP[37]

PCM	Melting Temperature (°C)	Melting Enthalpy (kJ/kg)	Density (g/cm ³)
Ice	0	333	0.92
Na-acetate trihydrate	58	250	1.30
Paraffin	-5-120	150-240	0.77
Erytritol	118	340	1.30

Tableau II.3: Propriétés des matériaux à changement de phase [37]

II.4.1.1. Les MCP organiques

Ils peuvent fondre et se solidifier de nombreuses fois sans ségrégation de phase et dégradation conséquente de leur chaleur de fusion latente ; ils cristallisent avec peu ou pas de sur-refroidissement et généralement sans corrosion. Les deux principaux groupes sont :

Les cires de paraffine : elles sont constituées d'un mélange de n-alcènes CH_3 et (CH_2) et CH_3 à chaîne essentiellement linéaire. La cristallisation de la chaîne (CH_2) libère une grande quantité de chaleur latente. Le point de fusion et la chaleur latente de fusion augmentent tous deux avec la longueur de la chaîne. Cependant, pour des raisons de coût, seules les paraffines de qualité technique peuvent être utilisées comme MCP dans les systèmes LHS. La paraffine est sûre, fiable, prévisible, moins chère, non corrosive et disponible dans une large gamme de températures (5 et 80 °C) [37,38] ; l'organique non paraffine : ce sont les plus nombreuses des MCP aux propriétés très variées. Un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols adaptés au stockage de l'énergie ont été identifiés [39]. Certaines des principales caractéristiques

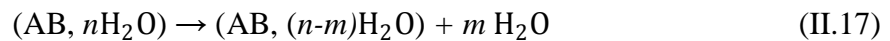
de ces matériaux organiques sont une chaleur de fusion élevée, une inflammabilité, une faible conductivité thermique, un point d'éclair bas et une instabilité à haute température.

II.4.1.2. Les MCP inorganiques

Ces MCP ne se refroidissent pas de manière appréciable et leurs enthalpies de fusion ne se dégradent pas avec le cycle. Les deux principaux types sont :

Hydrate de sel. Ce sont des alliages de sels inorganiques (AB) et de n kmol d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale (AB, nH_2O) dont la transition solide-liquide est en fait une déshydratation et une hydratation du sel.

Un sel hydraté fond généralement en un hydrate de sel avec moins de moles d'eau, c'est-à-dire,



Ou à son anhydre de



Au point de fusion, les cristaux d'hydrate se décomposent en sel anhydre et en eau, ou en un hydrate inférieur et en eau. Un problème avec la plupart des hydrates de sel est celui de la fusion incongrue, due au fait que l'eau de cristallisation libérée n'est pas suffisante pour dissoudre toute la phase solide présente. En raison de la différence de densité, l'hydrate inférieur (ou le sel anhydre) se dépose au fond du récipient.

Les hydrates de sel ont été largement étudiés dans les applications de stockage de la chaleur en raison de leurs caractéristiques positives : chaleur latente de fusion élevée par unité de volume, conductivité thermique relativement élevée (presque le double de celle de la paraffine), et ils sont peu corrosifs et compatibles avec les plastiques. À titre d'exemple, les principales caractéristiques de certains hydrates de sel sont présentées dans le (tableau II.4) [40]. Certains inconvénients importants sont la fusion incongrue et le sur-refroidissement, qui peuvent être abordés de différentes manières (ajout d'agents épaississants, par agitation mécanique, par encapsulation du MCP pour réduire la séparation, etc.) Un autre problème rencontré avec les hydrates de sel est le caractère spontané des hydrates de sel dont le nombre de moles d'eau est plus faible pendant le processus de décharge. L'ajout de produits chimiques peut empêcher la nucléation des hydrates de sel inférieurs, ce qui augmente de préférence la solubilité des hydrates de sel inférieurs par rapport aux hydrates de sel originaux ayant un nombre de moles d'eau plus élevé.

Métallique : Cette catégorie comprend les métaux à bas point de fusion et les eutectiques métalliques. Ils sont peu utilisés dans les applications de stockage de la chaleur en raison de leur faible enthalpie de fusion par unité de poids, même s'ils ont une enthalpie de fusion élevée par unité de volume et une conductivité thermique élevée. Voici quelques-unes des caractéristiques de ces matériaux :

- (1) faible masse volumique
- (2) chaleur de fusion élevée par unité de volume
- (3) conductivité thermique élevée
- (4) faible chaleur spécifique
- (5) pression de vapeur relativement faible.

Le (tableau II.5) donne une liste de certains métaux sélectionnés.

II.4.1.3. Eutectique

Les eutectiques sont une composition à fusion minimale de deux ou plusieurs composants, chacun d'entre eux fondant et gelant de manière congruente en formant un mélange des cristaux du composant pendant la cristallisation ; les eutectiques fondent et gèlent presque toujours sans ségrégation. Pour cette raison, ils constituent un type de MCP prometteur pour l'avenir, même s'ils sont en fait moins diffus que les autres groupes.

II.4.1.4. Confinement des MCP

Le confinement des MCP est utile pour contenir le matériau en phases liquide et solide, pour empêcher une éventuelle variation de sa composition chimique par interaction avec l'environnement, pour accroître sa compatibilité avec d'autres matériaux du stockage, pour augmenter sa maniabilité et pour fournir une surface appropriée pour le transfert de chaleur. Les types de confinement étudiés sont le stockage en vrac dans des échangeurs de chaleur de réservoir, la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. La principale caractéristique des systèmes MCP en vrac est la nécessité d'un transfert de chaleur plus important que celui que l'on trouve dans les systèmes des réservoirs sans MCP, car la densité de stockage de la chaleur du MCP est plus élevée que celle des autres supports de stockage. Les différentes approches largement utilisées sont l'insertion d'ailettes ou l'utilisation de particules à haute conductivité, de structures métalliques, de fibres du côté du MCP, d'échangeurs de chaleur à contact direct, ou la méthode du cylindre de laminage [41].

Les deux autres possibilités sont la macro- et la micro-encapsulation [42].

La macro-encapsulation consiste à inclure le MCP dans un tube, une sphère, un panneau, un cylindre ou autre, et est la plus répandue. Le choix du matériau (plastique ou métal-aluminium ou acier) et la géométrie affectent les performances thermiques du stockage de la chaleur. La micro-encapsulation consiste en une microsphère (diamètre inférieur à 1 mm) de PCM encapsulée dans un polymère très fin et de poids moléculaire élevé. Les sphères sont ensuite incorporées dans un matériau compatible.

PCM Type	Phase Change Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Latent Heat Capacity (kJ/kg)	Volumetric Heat Capacity (MJ/m ³)	Specific Heat Capacity (kJ/(kg·K))	Thermal Conductivity (W/(m·K))
S89	89	1550	151	234	2.480	0.670
S44	44	1584	100	158	1.610	0.430
S7	7	1700	150	255	1.850	0.400

Tableau II.4: Principales caractéristiques thermo- physiques de certains hydrates de sel [43]

No.	Material	Melting Point (°C)	Latent Heat (kJ/kg)
1	Gallium–gallium antimony eutectic	29.8	–
2	Gallium	30.0	80.3
3	Cerro-low eutectic	58.0	90.9
4	Bi–Cd–In eutectic	61.0	25.0
5	Cerro-bend eutectic	70.0	32.6
6	Bi–Pb–In eutectic	70.0	29.0
7	Bi–In eutectic	72.0	25.0
8	Bi–Pb eutectic	125.0	–

Tableau II.5: Fusion et chaleur latente de fusion pour les métaux [43]

II.5. Stockage de l'énergie chimique

Le TCS utilise des matériaux thermochimiques (TCM) qui stockent et libèrent de la chaleur par un processus de réaction endothermique/exothermique réversible (Fig. II.6). Au cours du processus de chargement, de la chaleur est appliquée au matériau A, ce qui entraîne une séparation de deux parties B et C. Les produits de réaction résultants peuvent être facilement séparés et stockés jusqu'à ce que le processus de déchargement soit nécessaire. Ensuite, les deux

parties B et C sont mélangées dans des conditions de pression et de température appropriées et de l'énergie est libérée.

Les produits B et C peuvent être stockés séparément, et les pertes thermiques des unités de stockage sont limitées aux effets de chaleur sensible, qui sont généralement faibles par rapport aux chaleurs de réaction.

La décomposition thermique des oxydes métalliques pour le stockage de l'énergie a été envisagée par Simmons [43]. Ces réactions peuvent présenter l'avantage que le

Materials	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m·K))	c_p (J/(kg·K))	t_{PCM} (°C)	L (J/kg)	μ (kg/(m·s))
Paraffin	$740(0.001 \times (t - 293.15) + 1)$	0.15	RT20(DSC)	20–22	172,000	$0.001 \times \exp(-4.25 + 1970/t)$
Gallium	6093	32	381.5	29.78	80,160	1.81×10^{-5}
Air	$1.2 \times 10^{-5} t^2 - 0.01134 t + 3.498$	0.0242	1006.43	–	–	1.7894×10^{-5}
Aluminium	2719	2024	871	–	–	–

Tableau II.6: Propriétés de la paraffine, du gallium, de l'air et de l'aluminium utilisés pour le calcul [44]

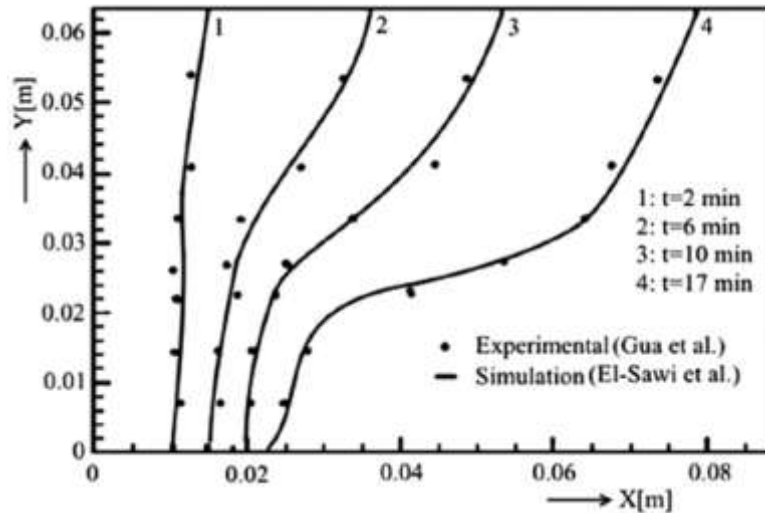


Figure II.6: Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques [44]

L'oxygène dégagé peut être utilisé à d'autres fins ou rejeté et l'oxygène de l'atmosphère utilisé dans les réactions inverses. Deux exemples sont la décomposition de l'oxyde de potassium



qui se produit sur une plage de température de 300 et 800 C° avec une chaleur de décomposition de 2,1 MJ/kg, et l'oxyde de plomb



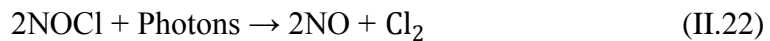
qui se produit sur une plage de température de 300 et 350 °C avec une chaleur de décomposition de 0,26 MJ/kg. L'utilisation de ces réactions pose encore de nombreux problèmes pratiques.

Le stockage de l'énergie par décomposition thermique du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a été largement étudié par Fujii et al (44). La réaction est $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. La réaction se déroule à des températures supérieures à environ 450°C; la vitesse de la réaction peut être augmentée par l'ajout de zinc ou d'aluminium. Le produit CaO est stocké en l'absence d'eau. La réaction exothermique inverse se déroule facilement.

Un exemple de réaction de décomposition photochimique est la décomposition du chlorure de nitrosyle, que l'on peut écrire



Le chlore atomique produit forme du chlore gazeux, le Cl_2 , avec la libération d'une partie importante de l'énergie ajoutée au NOCl en décomposition. Ainsi, la réaction globale est



La réaction inverse peut être effectuée pour récupérer une partie de l'énergie des photons entrant dans la réaction.

Reaction		Temperature (°C)	Energy Density (kJ/kg)
Methane steam reforming	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	480–1195	6053
Ammonia dissociation	$2\text{NH}_3 = \text{N}_2 + 3\text{H}_2$	400–500	3940
Thermal dehydrogenation of metal hydrides	$\text{MgH}_2 = \text{Mg} + \text{H}_2$	200–500	3079 (heat) 9000 (H_2)
Dehydration of metal hydroxides	$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	402–572	1415
Catalytic dissociation	$\text{SO}_3 = \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$	520–960	1235

Tableau II.7: Quelques réactions chimiques pour le stockage de l'énergie thermique [45]

Les procédés qui produisent de l'énergie électrique peuvent être stockés sous forme d'énergie chimique dans des batteries d'accumulateurs électriques ou leur équivalent.

Les réactions thermochimiques, telles que l'adsorption (c'est-à-dire l'adhésion d'une substance à la surface d'un autre solide ou liquide), peuvent être utilisées pour stocker la chaleur et le froid, ainsi que pour contrôler l'humidité. La grande capacité de stockage des procédés de sorption permet également le transport d'énergie thermique.

Le (tableau II.7) énumère quelques-unes des réactions chimiques les plus intéressantes pour les TES [45]. Alors que les stockages par sorption ne peuvent fonctionner que jusqu'à des températures d'environ 350 °C, les réactions chimiques peuvent aller beaucoup plus loin.

II.6. Stockage de l'énergie thermique froide

Le stockage de l'énergie thermique froide (CTES) a récemment suscité un intérêt croissant pour les applications de réfrigération industrielle, telles que le refroidissement des processus, la conservation des aliments et les systèmes de climatisation des bâtiments. Le CTES semble être l'une des méthodes les plus appropriées pour corriger le décalage qui se produit entre l'offre et la demande d'énergie. Le stockage de l'énergie froide nécessite un meilleur réservoir d'isolation, car l'énergie disponible à l'état froid est coûteuse, par rapport à la chaleur disponible dans un réservoir de stockage chaud. Cheralathan et ses collaborateurs [46] ont étudié les performances d'un système de réfrigération industrielle intégré au CTES. Les auteurs ont indiqué des économies significatives en termes de capital et de coûts d'exploitation, dans les systèmes intégrés au stockage thermique. La taille du système CTES basé sur la MCP a également été considérablement réduite par rapport à celle d'un système à eau réfrigérée.

Le phénomène de sorption peut également s'appliquer aux STE. Dans ce cas, une source de chaleur favorise la dissociation (processus endothermique) d'un couple de travail, dont les substances peuvent être stockées séparément. Lorsqu'elles entrent à nouveau en contact, de la chaleur est libérée (processus exothermique). L'énergie peut alors être stockée sans pratiquement aucune perte, car la chaleur n'est pas stockée sous une forme sensible ou latente, mais plutôt sous forme d'énergie potentielle, tant que les substances sont maintenues séparées.

Les applications typiques impliquent l'adsorption de vapeur d'eau sur du gel de silice ou des zéolites (c'est-à-dire des silicates d'alumine cristallins microporeux). Les systèmes de sorption ouverts basés sur le chlorure de lithium pour refroidir l'eau et sur les zéolites pour contrôler l'humidité sont particulièrement importants pour les climats chauds/humides ou les espaces confinés à forte humidité.

L'adsorption TES est une technologie prometteuse qui peut fournir une excellente solution pour les TES à long terme, de manière plus compacte et plus efficace. L'énergie solaire thermique ou la chaleur résiduelle de plusieurs processus peut être utilisée pour régénérer l'adsorbant et favoriser le stockage de l'énergie [47].

Le cycle d'adsorption a déjà été utilisé dans plusieurs projets de recherche pour promouvoir les centrales thermiques. En 1990, Kaubek et Maier-Laxhuber [48] ont breveté un appareil

d'adsorption destiné à être utilisé comme stockage de chaleur électrique, fonctionnant avec le couple zéolithe/eau et permettant de réaliser une économie de 30 % de la consommation d'énergie.

Le système peut être utilisé comme dispositif de chauffage de l'air ou combiné avec un réservoir d'eau chaude. Dans le premier cas, le lit d'adsorbant est chauffé par des barres de chauffage électrique pendant la phase de désorption, ce qui régénère l'adsorbant et libère la chaleur de condensation dans l'espace à chauffer. Dans le second cas, la chaleur de condensation est libérée dans un réservoir d'eau pendant la phase de désorption, tandis que la chaleur d'adsorption est transférée au réservoir d'eau par un circuit fermé spécifique dans la phase d'adsorption. Hauer [49] a présenté un système TES à adsorption saisonnière, fonctionnant avec le couple silicagel/eau (Fig. II.7). En été, pendant que le système se charge, la chaleur des capteurs solaires est conduite vers trois lits d'adsorption, ce qui favorise l'étape de désorption. En hiver, les basses températures dans le capteur solaire favorisent l'évaporation de l'eau dans les évaporateurs/condenseurs, et la chaleur d'adsorption est libérée dans le système de chauffage du bâtiment.

Schwamberger et ses collègues (20) ont réalisé une étude de simulation d'un nouveau concept de cycle pour les pompes à chaleur à adsorption fonctionnant avec le couple zéolithe/eau. Ce cycle fait appel à des TES stratifiés pour améliorer la récupération de chaleur interne entre les phases d'adsorption et de désorption du cycle. Pendant la phase d'adsorption, la chaleur d'adsorption est emportée par le HTF plus froid de l'adsorbeur vers le réservoir de stockage, en entrant à une hauteur correspondant à sa température. Pendant la phase de désorption, l'adsorbeur est chauffé par l'apport de fluide chaud provenant du réservoir de stockage, tandis que le fluide plus froid revenant de l'adsorbeur est stocké dans le réservoir de stockage. Une source de chaleur externe contribue à préserver l'effet de stratification dans le réservoir. La chaleur rejetée dans le condenseur et dans un dissipateur thermique externe peut être utilisée pour le chauffage des locaux.

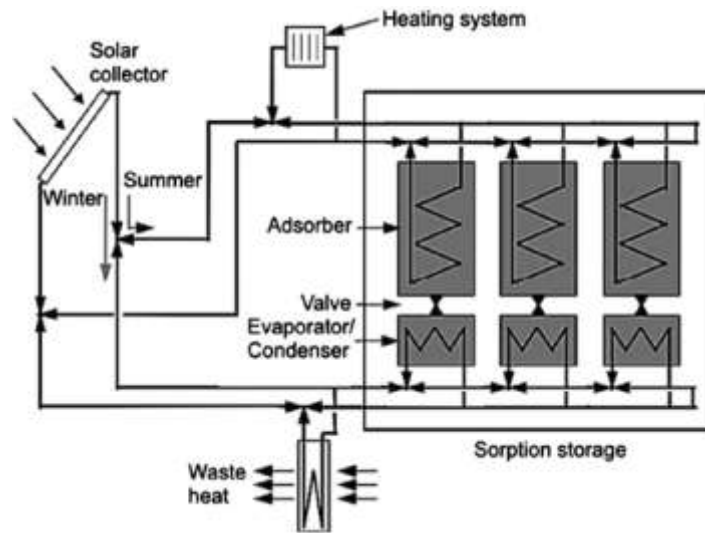


Figure II.7: Système de stockage thermique par adsorption saisonnière [21]

Un système de stockage en cascade offre un vaste potentiel pour l'amélioration des performances d'un système de refroidissement solaire. Dans un système de stockage en cascade, des MCP ayant des températures de fusion différentes sont disposés en série pour stocker la chaleur à des températures différentes. Par rapport à un système de stockage classique à un seul MCP, un système de stockage en cascade à plusieurs MCP améliorerait l'efficacité de la collecte du sol car la température inférieure au fond du réservoir est reliée à l'entrée du capteur solaire. Les résultats numériques de l'étude paramétrique menée par Shaikh et Lafdi [21] indiquent que le taux de charge énergétique total peut être considérablement amélioré en utilisant des MCP composites par rapport à un MCP simple

II.7- 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 :

Réalisation Expérimentale

Chapitre III Réalisation expérimentale

III.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 adoptés les équipements suivant :

- Choisir un MCP pour un stockage thermique latente.
- Choisir un conditionnement pour le MCP pour être incorporé dans l'espace annulaire de notre système de stockage.
- Le fluide stockeur par chaleur sensible (l'eau).
- Définir les dimensions appropriées au module de stockage thermique.
- Choisir une configuration appropriée de nos systèmes pour le stockage de chaleur.
- Une isolation thermique efficace du système de sorte que les pertes bien qu'elles existent puissent être considéré comme négligeables.

III.2. Les équipements du module expérimental

III.2.1. Le choix de MCP

Le choix de 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 cela, notre choix de MCP est porté sur un mélange (la cire de bougie, acide gras et graffite) qui présente des caractéristique similaires a celles que nous cherchons.

III.2.2. 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 1 litre d'eau.

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

III.2.3. Le module de stockage thermique

Le module de stockage est un pavé droit (parallélépipède) de stockage utilisé dans les systèmes de stockage thermique conçu dans la forme parallélépipède (voir photos ci-dessous).



Figure III.1: Le module de stockage thermique

III.2.4. Concentrateur solaire

L'énergie solaire est puissante mais relativement peu dense. Il est nécessaire de concentrer le rayonnement solaire pour obtenir des températures exploitables au niveau industriel. C'est ce que propose la technique du capteur solaire à concentration, qui permet d'atteindre des températures suffisantes pour des procédés nécessitant de la vapeur ou de l'eau très chaude, du coup pour notre expérience, on a utilisé ce dernier pour chauffer de l'eau pendant la journée et sera ensuite stockée grâce à notre dispositif pour l'usage nocturne.



Figure III.2 : Concentrateur solaire

III.2.5. L'isolant thermique

Pour l'isolation thermique on a utilisé le Polystyrène, pour diminuer le maximum des pertes thermiques vers le milieu extérieur. Notre choix est basé sur sa disponibilité au niveau du marché et son faible coût.



Figure III.3 : Isolant thermique

III.2.6. Mesure de température

L'étude expérimentale est destinée à explorer le champ de température à l'intérieur du module de stockage et déstockage de la chaleur.

On a utilisé des thermomètres électroniques et un thermomètre à mercure pour leurs facilités d'utilisation et leurs bonnes précisions.



Figure III.4: Thermomètres électroniques et à mercure

III.3. La réalisation du model

La réalisation du système de stockage thermique est scindée en trois étapes principales :

La première étape : il s'agit de réaliser quatre pavés droits intérieurs de mêmes dimensions et trois autres pavés droits extérieurs avec des dimensions différentes, ceci est dans le but de changer l'épaisseur du MCP qui sera placé entre ces deux parallélépipèdes,

$e_1 = 0.6 \text{ cm}$, pour dispositif D2

$e_2 = 1.2 \text{ cm}$, pour dispositif D3

$e_3 = 1.8 \text{ cm}$, pour dispositif D4

Et on a réalisés ensuite deux trous sur une face de diamètre (en haut et en bas) qui seront l'entrée et la sortie de notre circuit hydraulique.

Les pavés droits intérieurs :

- Une tôle galvanisée d'épaisseur 0.5mm.
- Base : 7x7 cm.
- Hauteur : 22 cm.
- Trous : 01 cm de diamètre.



Figure III.5: Pavé droit intérieur

Les pavés droits extérieurs :

- Une tôle d'épaisseur 0.2mm
- Bases : 8.2x8.2 / 9.4x9.4 / 10.6x10.6
- Hauteurs : 23.2 / 24.4 / 25.6.
- Trous : 01 cm de diamètre.



Figure III.6: Pavés droits extérieurs

Cette étape consiste à :

- 1) Tracer les arrêtes en respectant les dimensions voulus sur les tôles et la couper à l'aide des ciseaux.



Figure III.7: Tôle galvanisée

2) Créer les surfaces annulaires et les bases en pliant les tôles au niveau des arrêtes tracés.



Figure III.8 : Bases et surfaces annulaires

3) Le perçage des trous.



Figure III.9: Perçage des trous

4) Mettre les pavés intérieurs dans les pavés extérieurs en respectant les épaisseurs mesurées.

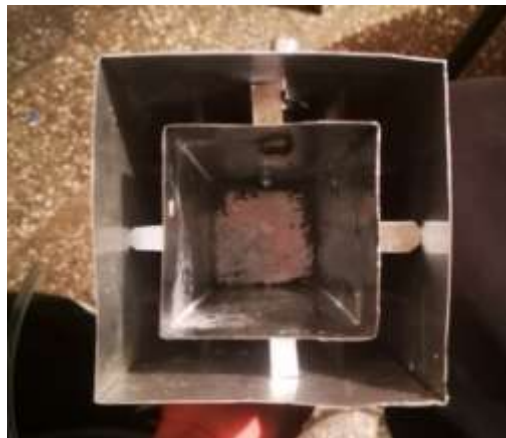


Figure III.10 : Assemblage des pavés droits intérieurs et extérieurs

La deuxième étape : l'injection du MCP

1- La composition du MCP



45.5% d'acide gras



45.5% de cire de bougie



09% graffite

Figure III.11 : Pourcentages d'acide gras, de cire de bougie et de graffite mélangées.

La formule chimique de l'acide gras est: $C_{12}H_{24}O_2$ ou d est le nombre de doubles liaisons.

Température de fusion d'acide gras : 35°C à 40°C

La formule chimique de la cire de bougie : $C_{25}H_{52}$

Température de fusion de la cire de bougie : 68°C a 70°C

La formule chimique de graffite : c'est un minérale de carbone (C)

La température de fusion de graffite : il a un point de fusion très élevé environ 3500 °C

On a utilises le bain-marie pour trouver la température de fusion du mélange (MCP utilisé)

Entre : 56 °C a 58°C



Figure III.12 : Bain-marie



Figure III.13 : Température de fusion de MCP utilisé

2-L'injection de MCP dans les dispositifs remplis de l'eau chaude pour éviter la solidification de ce dernier au moment de l'injection.



Figure III.14 : Injection de MCP

La troisième étape : L'isolation des systèmes

On a utilisé le Polystyrène d'épaisseur $e=3$ cm, et pour une meilleure fixation on a utilisé du Ruban adhésif.



Figure III.15 : L'isolation avec du polyester

Après isolation des dispositifs:



Figure III.16 : Formes finales des dispositifs

La phase finale : Après l'essai au laboratoire, on a combiné le dispositif le plus efficace au concentrateur solaire via un récepteur des rayons solaires, ce dernier a été relié avec deux conduites d'eau (la première pour la circulation d'eau chaude du récepteur solaire vers notre dispositif et l'autre qui assure la circulation d'eau froide de notre système vers le récepteur, ce qui donne une circulation thermosiphon), voir figure ci-dessous.



Figure III.17: Le récepteur des rayons solaires



Figure III.18 : Le système opérationnel sur le site

III.4- Conclusion

Dans ce chapitre, en plus des différentes étapes de réalisations des modules de stockages que nous avons retracées en détails, nous avons aussi rapporté les caractéristiques de chaque élément utilisé dans la conception de ces modules.

Malgré les difficultés que nous avons rencontrées (manque de matériel), nous avons réussi à nous rapprocher le plus possible de notre objectif.

Chapitre IV

Présentation des résultats expérimentaux

Chapitre IV Présentation des résultats expérimentaux

IV.1. Essai au laboratoire n°01 : (18/04/2021)

IV.1.1. Résultats obtenus avec le dispositif D1 :

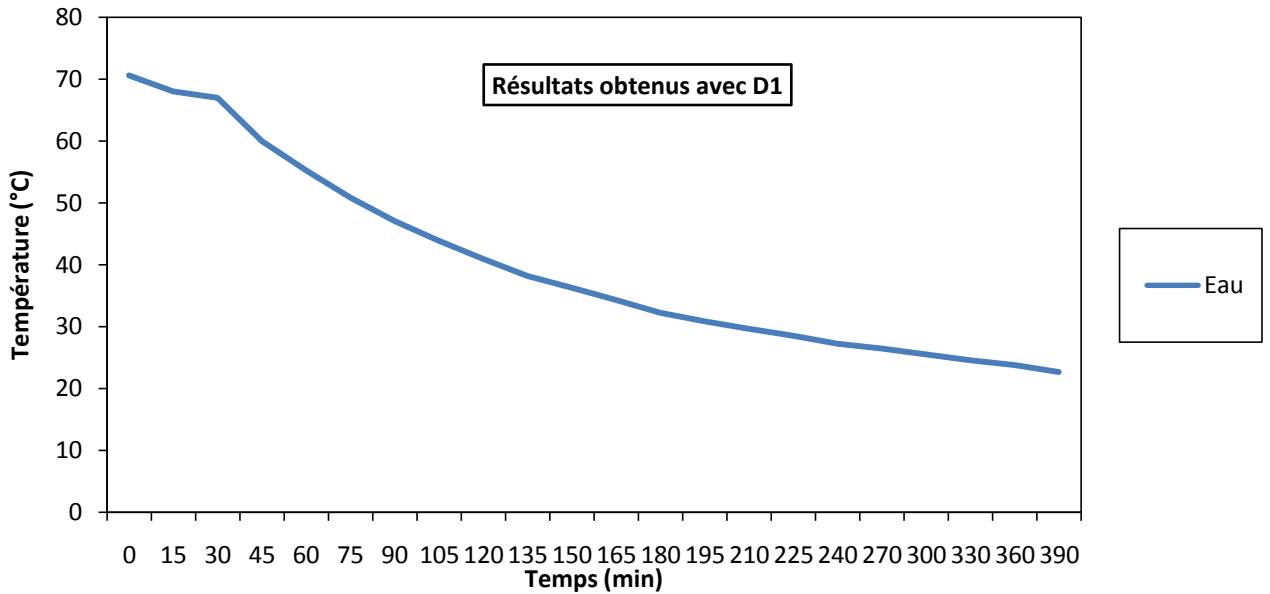


Figure IV.1 : L'évolution de la température d'eau en fonction du temps du dispositif D1

IV.1.2. Résultats obtenus avec le dispositif D2 :

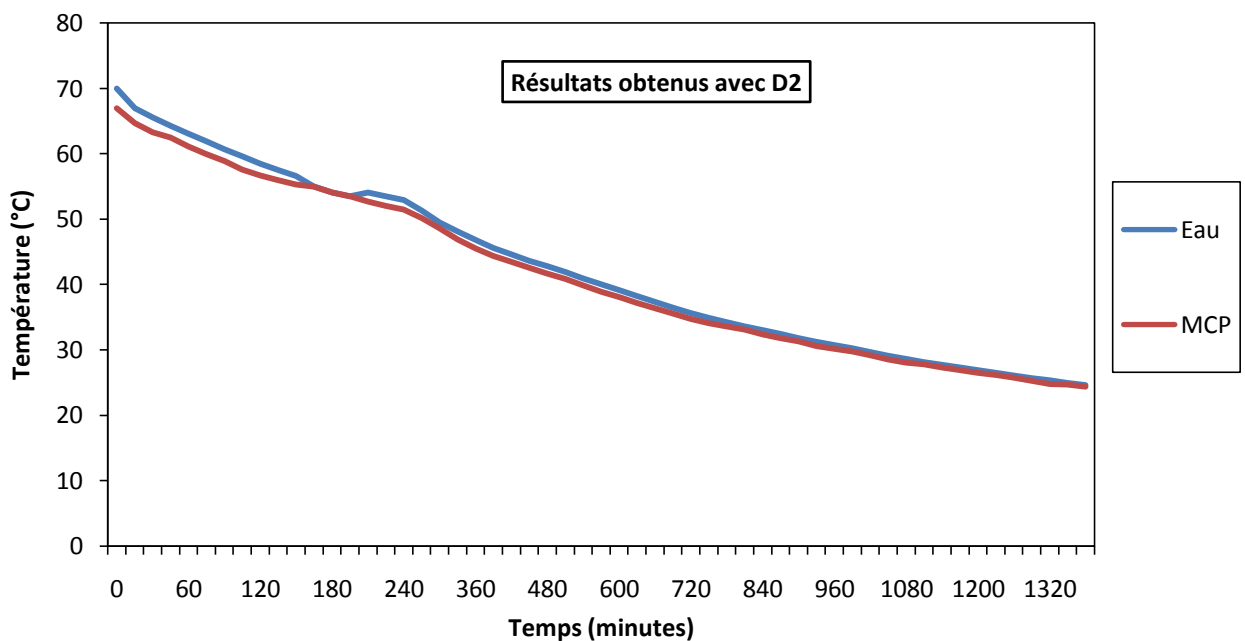


Figure IV.2 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps du dispositif D2

IV.1.3 Résultats obtenus avec le dispositif D3 :

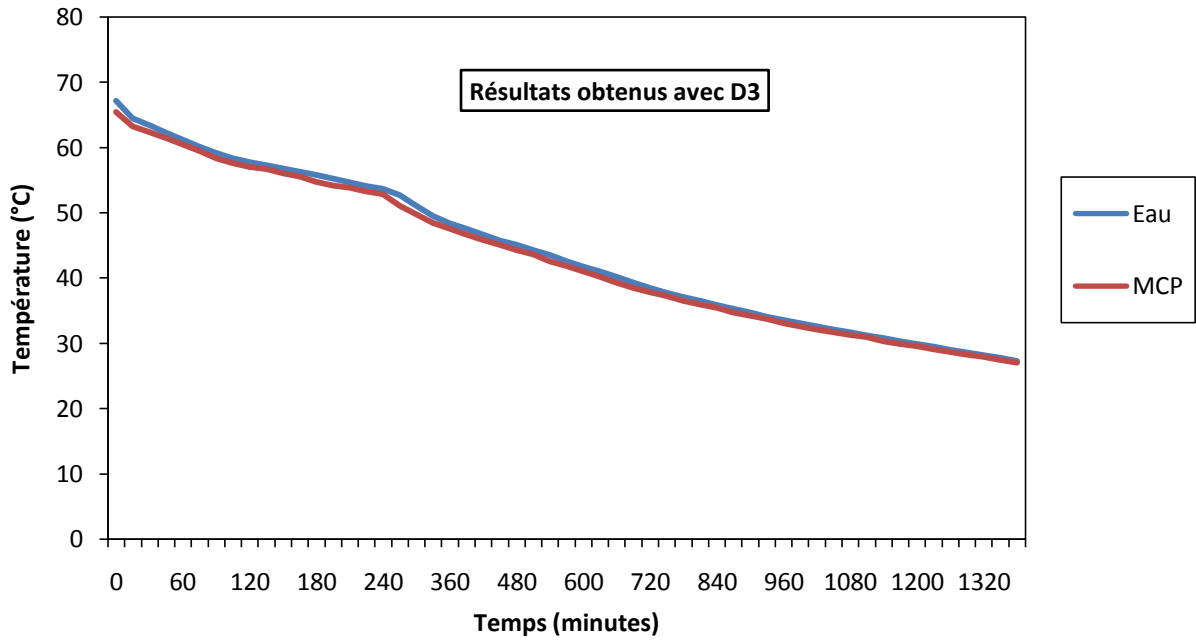


Figure IV.3 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps du dispositif D3

IV.1.4 Résultats obtenus avec le dispositif D4 :

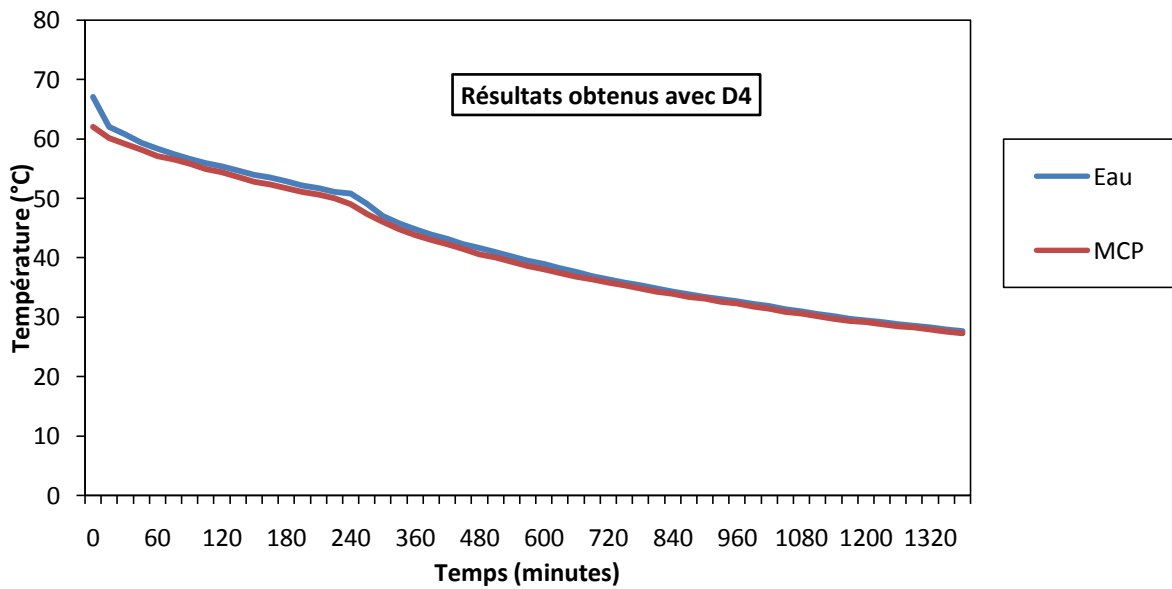


Figure IV.4 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps du dispositif D4

Les résultats expérimentaux présentés aux **Figures (IV.1, IV.2, IV3, IV4)** montrent l'évolution des températures de l'eau et MCP des quatre dispositifs du premier essai au niveau du laboratoire au cours de déstockage de la chaleur.

On remarque que les températures de l'eau dans les modules (D2, D3, D4) sont supérieures à celles de MCP ce qui implique que le transfert de la chaleur se fait dans un seul sens qui est de l'eau vers le MCP. On remarque aussi que les températures de l'eau et de MCP ont les mêmes évolutions avec des valeurs proches parce que le MCP reçoit sa chaleur par l'eau à l'exception du dispositif D1 qui est exposé directement au milieu extérieur pour être un modèle de référence (absence de MCP).

IV.2. Essai au laboratoire n°02 : (28/04/2021)

IV.2.1. Résultats obtenus avec le dispositif D1 :

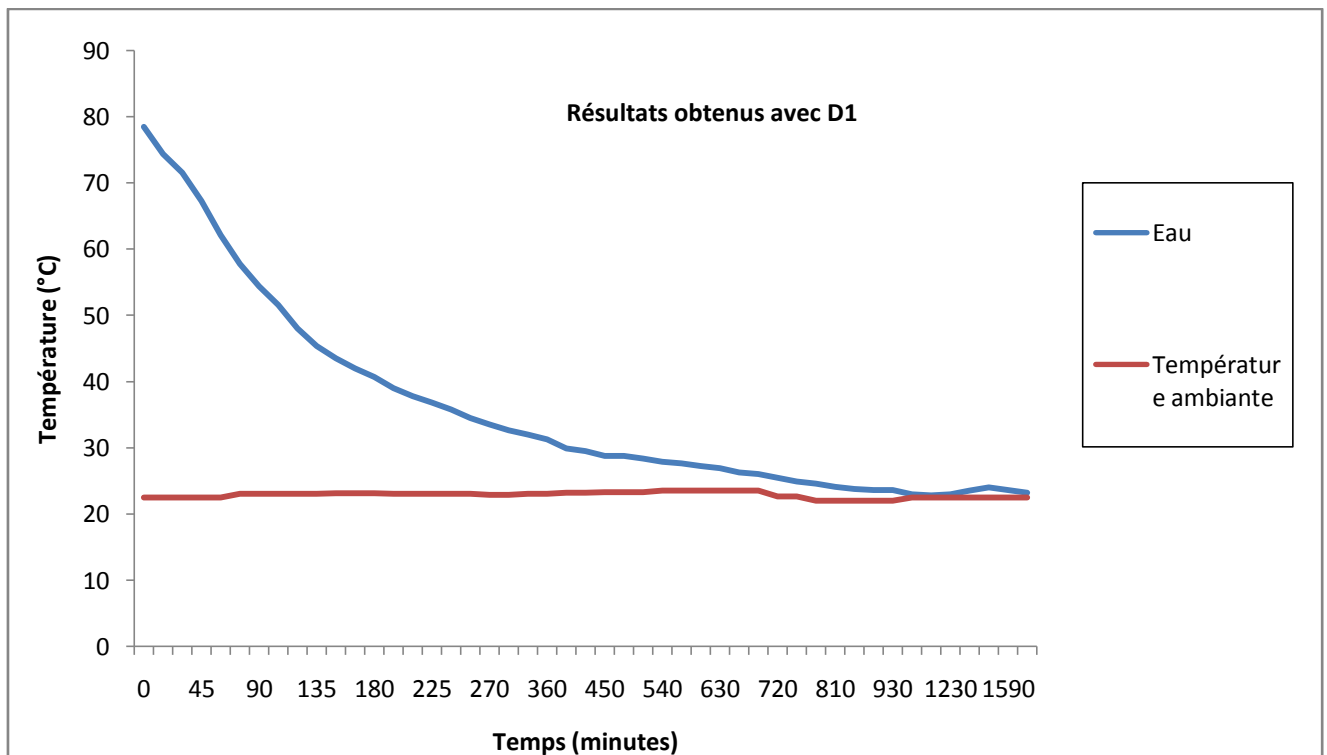


Figure IV.5 : L'évolution de la température d'eau en fonction du temps du dispositif D1

IV.2.2. Résultats obtenus avec le dispositif D2 :

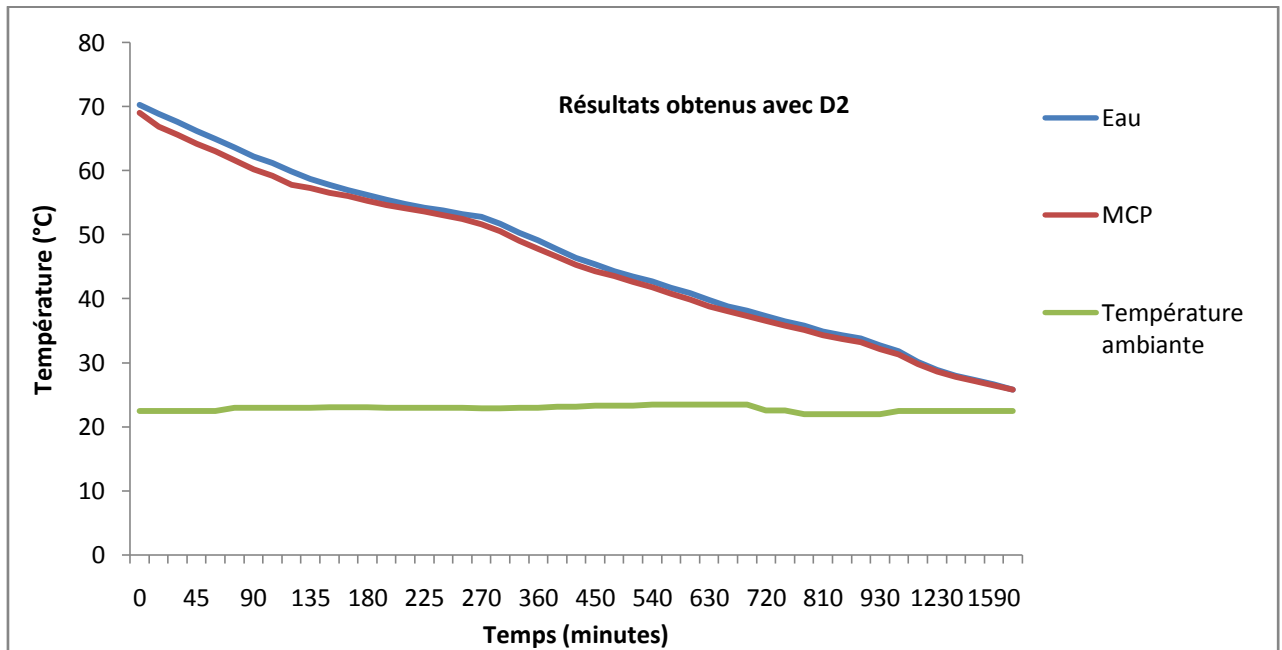


Figure IV.6 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps de dispositif D2

IV.2.3. Résultats obtenus avec le dispositif D3 :

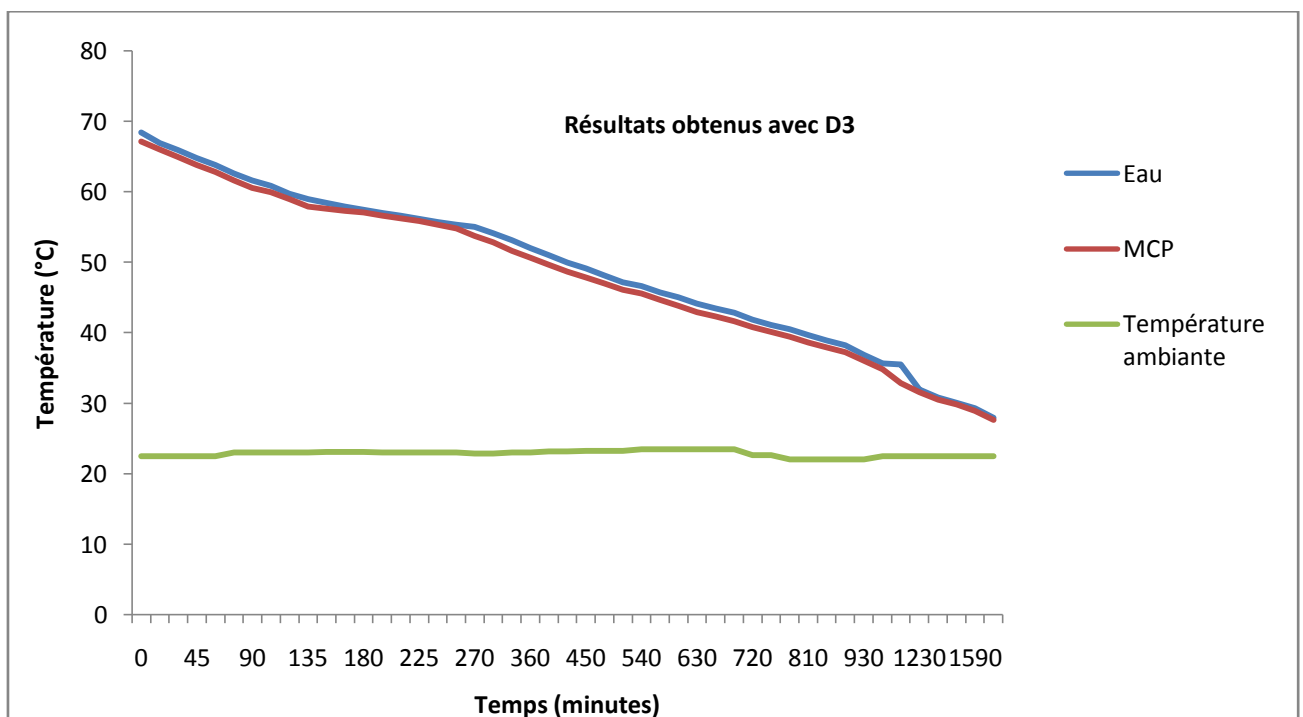


Figure IV.7 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps de dispositif D3

IV.2.4. Résultats obtenus avec le dispositif D4 :

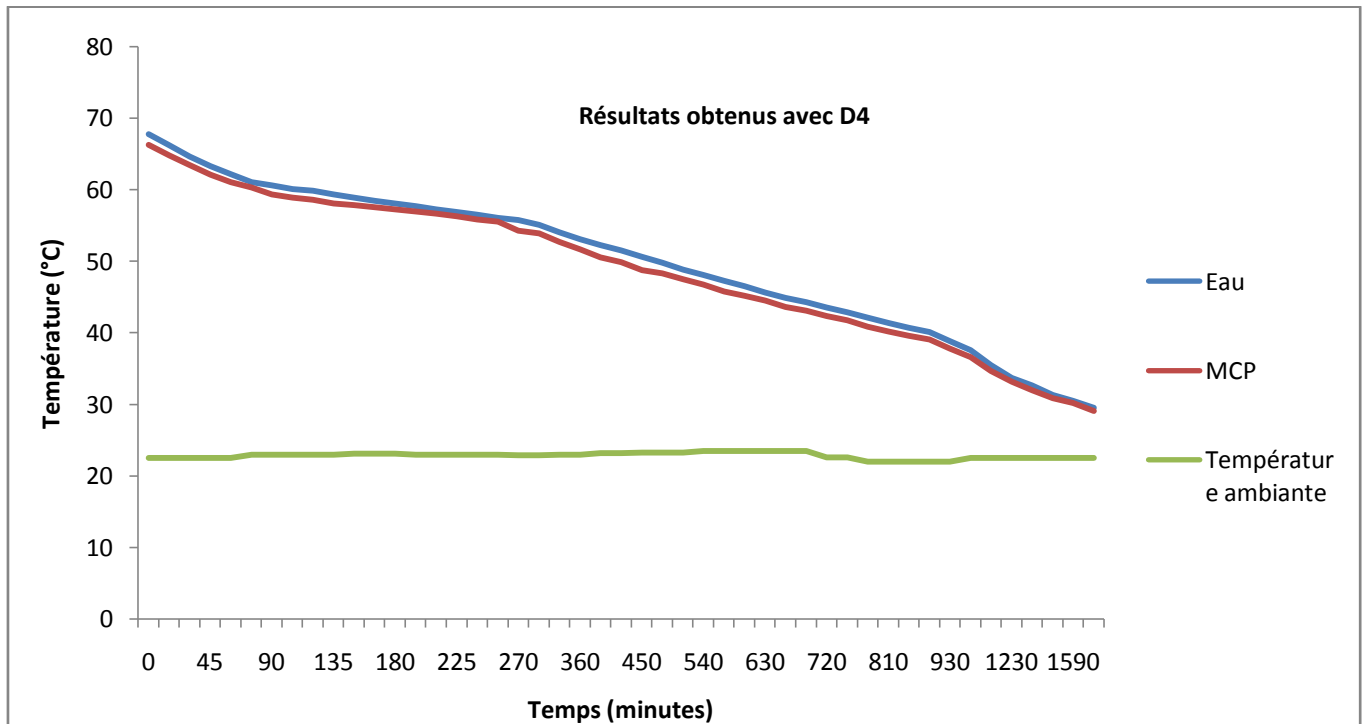


Figure IV.8 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps du dispositif D4

Les résultats expérimentaux présentés aux **Figures (IV.5, IV.6, IV.7, IV.8)** montrent l'évolution des températures de l'eau et MCP des quatre dispositifs du deuxième essai au niveau du laboratoire au cours de déstockage de la chaleur.

On remarque que l'évolution des courbes de températures de deuxième essai prennent presque le même parcours que le premier essai.

Remarque : Après l'analyse des résultats obtenus au niveau de laboratoire, notre choix est porté sur le dispositif D3 par rapport à son efficacité de stockage d'énergie thermique.

IV.3. Essai sur site n°01 :

Date : 13/05/2021 Humidité : 60 %, Vitesse du vent : 11 km/h

IV.3.1. Résultats obtenus avec le dispositif D3 (stockage) :

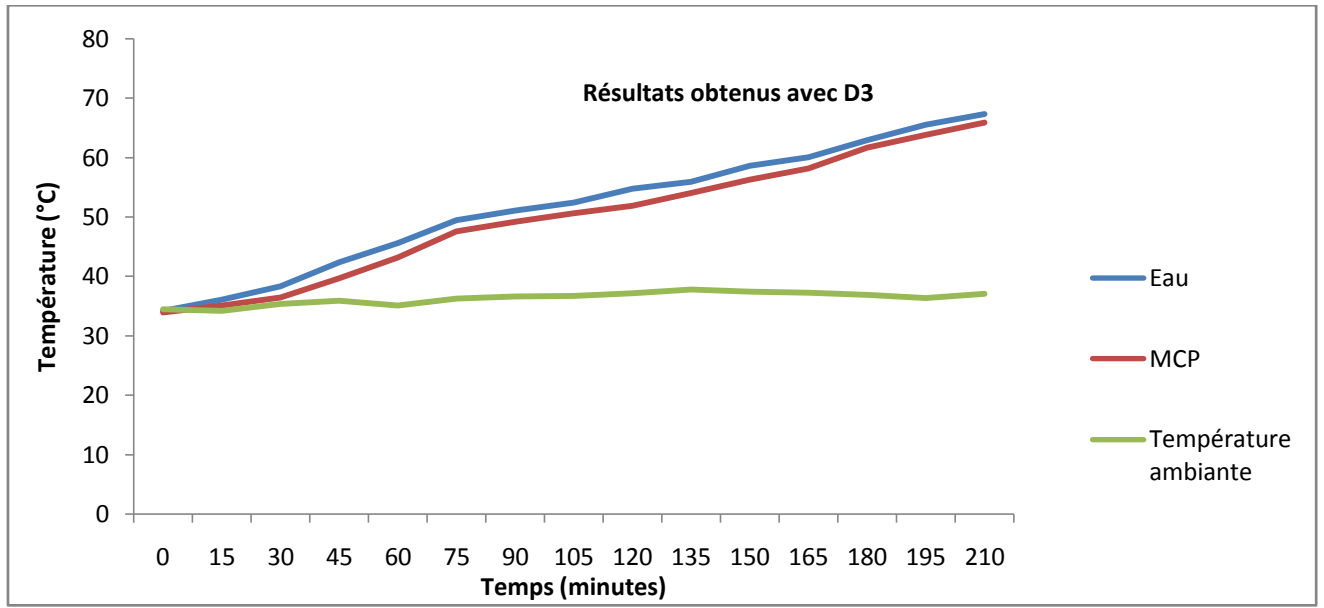


Figure IV.9 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps de dispositif D3 pendant le stockage de la chaleur (Essai 1)

IV.3.2. Résultats obtenus avec le dispositif D3 (déstockage) :

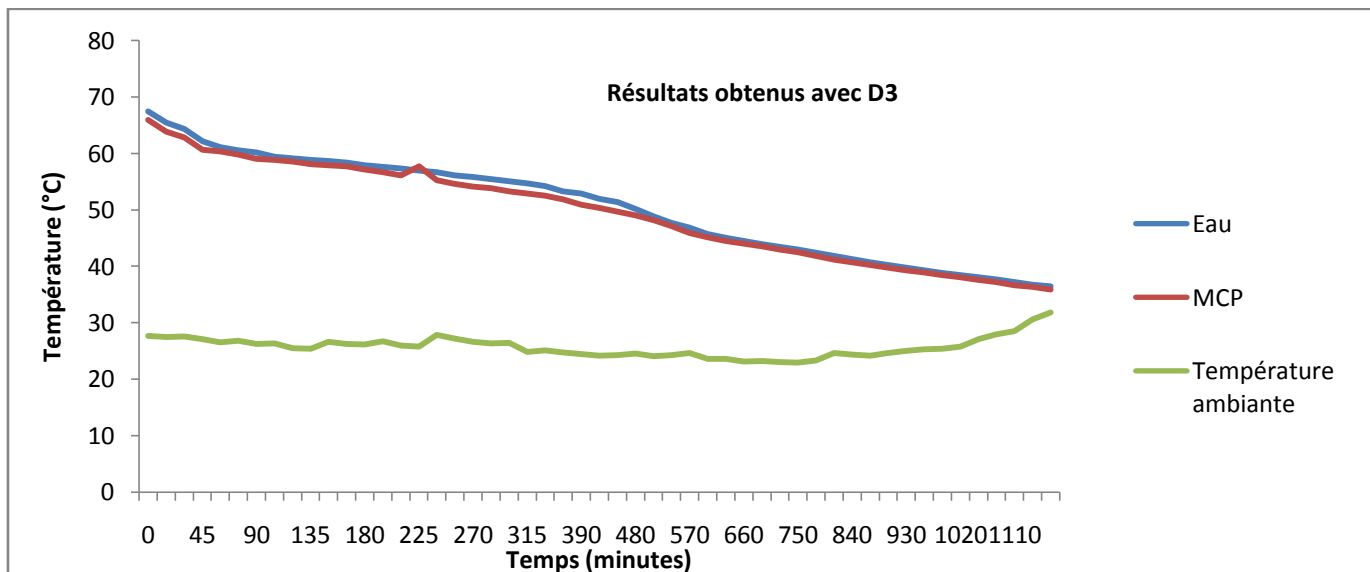


Figure IV.10 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps de dispositif D3 pendant le déstockage de la chaleur (Essai 1)

Les résultats expérimentaux présentés aux **Figures (IV.9, IV10)** montrent l'évolution des températures de l'eau et MCP de dispositifs D3 du premier essai sur le site au cours de stockage et déstockage de la chaleur.

Pour cet essai on a pu atteindre les valeurs effectuées au niveau du laboratoire grâce au capteur solaire.

On remarque que la température de l'eau dans les modules D3 est supérieure à celle de MCP ce qui implique que le transfert de la chaleur se fait dans un seul sens qui est de l'eau vers le MCP pendant le stockage et le déstockage. On remarque aussi que les températures de l'eau et de MCP ont les mêmes évolutions avec des valeurs proches parce que le MCP reçoit sa chaleur par l'eau.

IV.4 Essai sur site n°02 :

Date : 18/05/2021 Humidité : 56%, Vitesse du vent : 14km/h

IV.4.1. Résultats obtenus avec le dispositif D3 (stockage) :

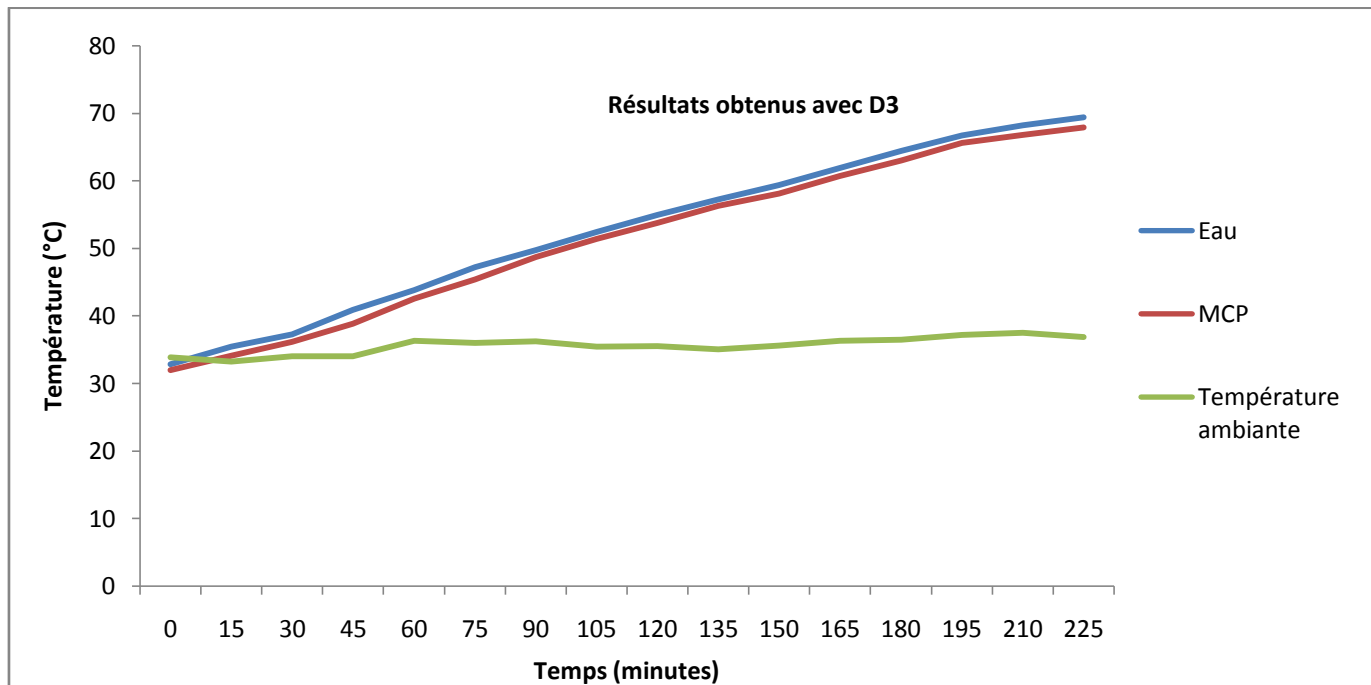


Figure IV.11 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps de dispositif D3 pendant le stockage de la chaleur (Essai 2)

IV.4.2. Résultats obtenus avec le dispositif D3 (déstockage) :

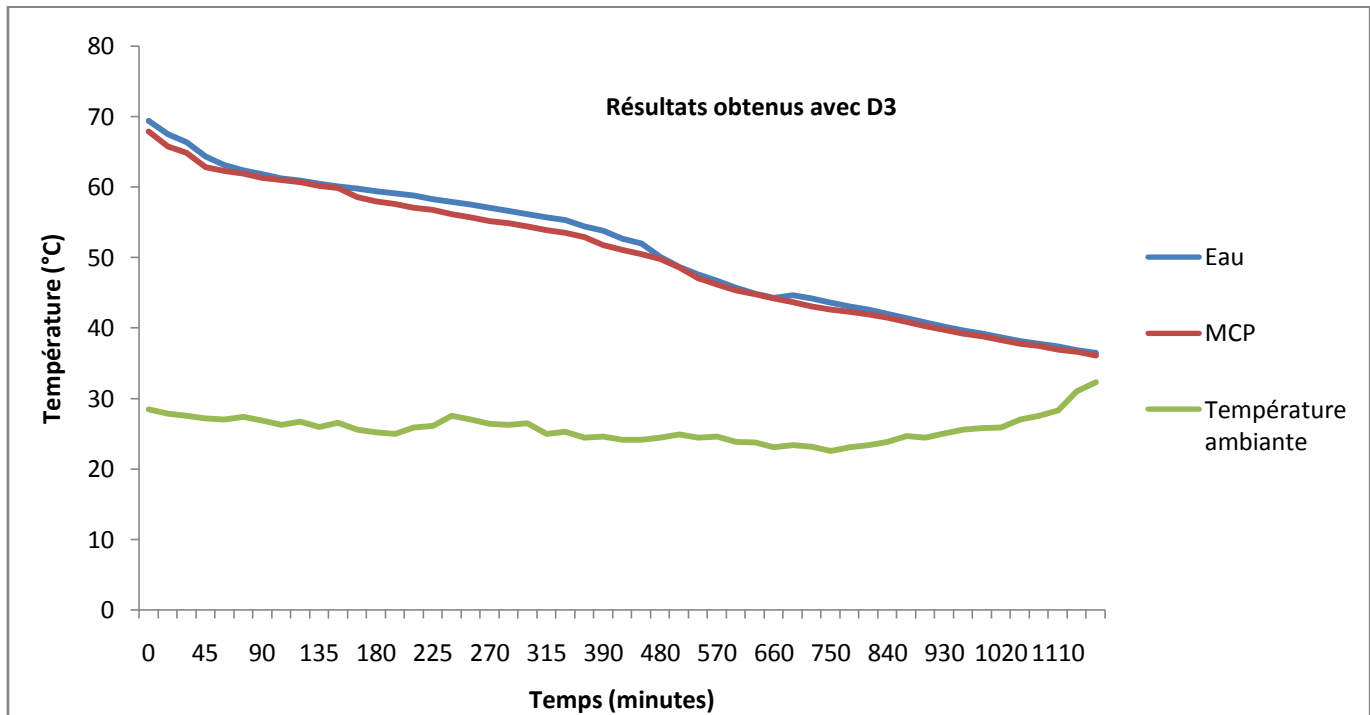


Figure IV.12 : L'évolution de la température d'eau et MCP en fonction du temps de dispositif D3 pendant le déstockage de la chaleur (Essai 2)

Les résultats expérimentaux présentés aux **Figures (IV.11, IV.12,)** montrent l'évolution des températures de l'eau et MCP du dispositif D3 du deuxième essai sur le site au cours de stockage et déstockage de la chaleur.

On remarque que l'évolution des courbes de températures de deuxième essai prennent presque le même parcours que le premier essai.

IV.5. Conclusion

Dans le présent chapitre on a présentés les résultats expérimentas obtenus avec des courbe en utilisant le logiciel EXCEL qui expriment le comportement thermique de chaque élément des systèmes de stockage (Eau, MCP) au cours de stockage et déstockage.

- L'intégration de MCP dans le système de stockage joue un rôle très important sur l'énergie thermique stocké a partir du changement épaisseurs utilisés dans chaque dispositif.
- Le MCP est un bon moyen de stocké plus d'énergie thermique.

Chapitre V

Analyse des résultats

Chapitre V Analyse des résultats

Dans le présent chapitre on va faire valoir le pouvoir stockeur de nos dispositifs réalisés en faisant une étude comparative, pour cela on a fait deux essais au laboratoire pour sélectionner un dispositif efficace, par la suite on procède aux essais sur site pour garder une eau chaude sanitaire pour un usage nocturne.

V.1. Essais au laboratoire :

V.1.1. Essai n°01 :

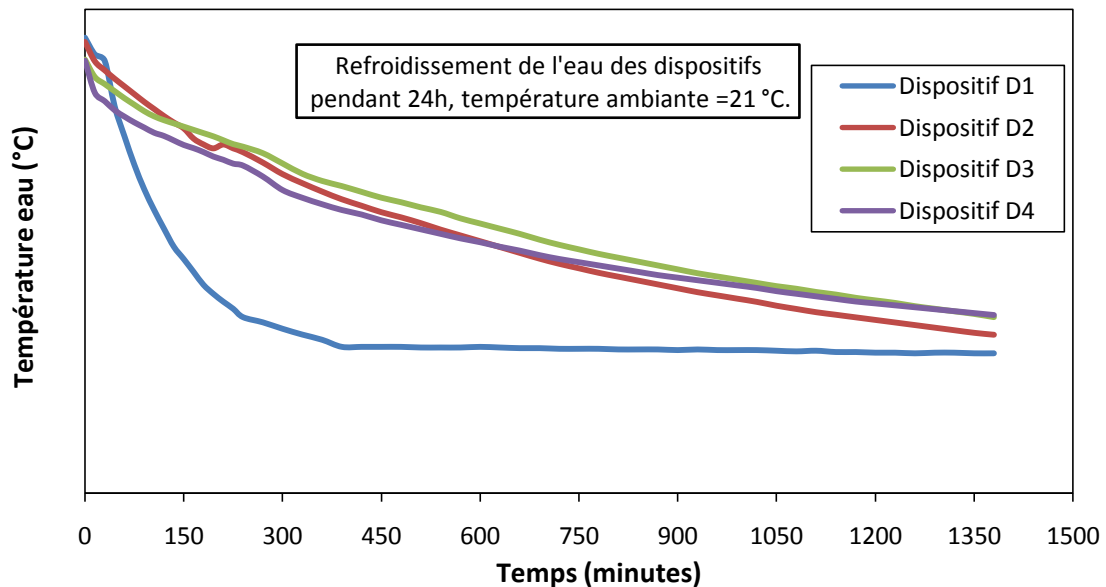


Figure V.1 : Evolution de la température de l'eau chaude des dispositifs étudiés pendant 24h.

La figure V.1 montre l'évolution de la température de l'eau des quatre dispositifs au cours de la décharge de chaleur avec une température ambiante de 21 °C. On voit que les courbes des dispositifs (D2, D3 et D4) ont la même forme qui est une courbe décroissante et cela à cause de la continuation du transfert de chaleur de l'eau vers MCP, on remarque aussi que ces courbes ont des pentes différentes et cela revient à l'effet de l'épaisseur de MCP de chaque dispositif. Par ailleurs, on remarque une courbe avec une grande pente du dispositif D1 et cela revient à l'absence de MCP dans ce dernier ce qui fait qu'il y a un transfert de chaleur directement vers le milieu extérieur.

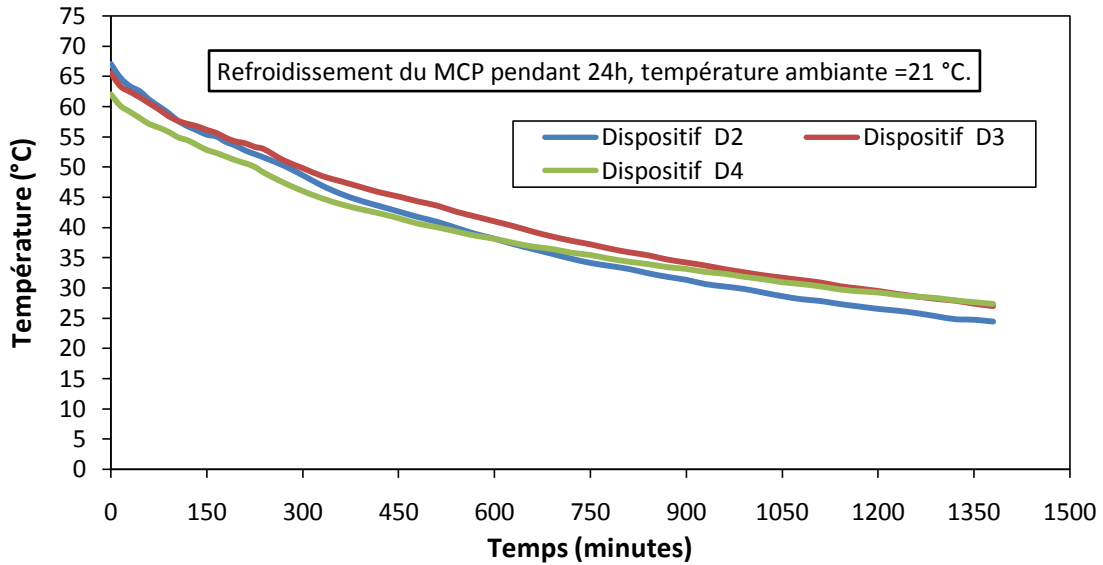


Figure V.2 : Evolution de la température du MCP des dispositifs étudiés pendant 24h.

La figure V.2 montre l'évolution de la température de MCP en fonction de temps au cours de la décharge de chaleur avec une température ambiante de 21°C. Les courbes des dispositifs D2, D3 et D4 ont une même évolution décroissante de température et cette décroissance est due aux pertes de chaleurs de MCP vers le milieu extérieur, les courbe ont des pentes différentes qui est causé par l'effet de l'épaisseur du MCP des dispositifs.

V.1.2. Essai n°02 :

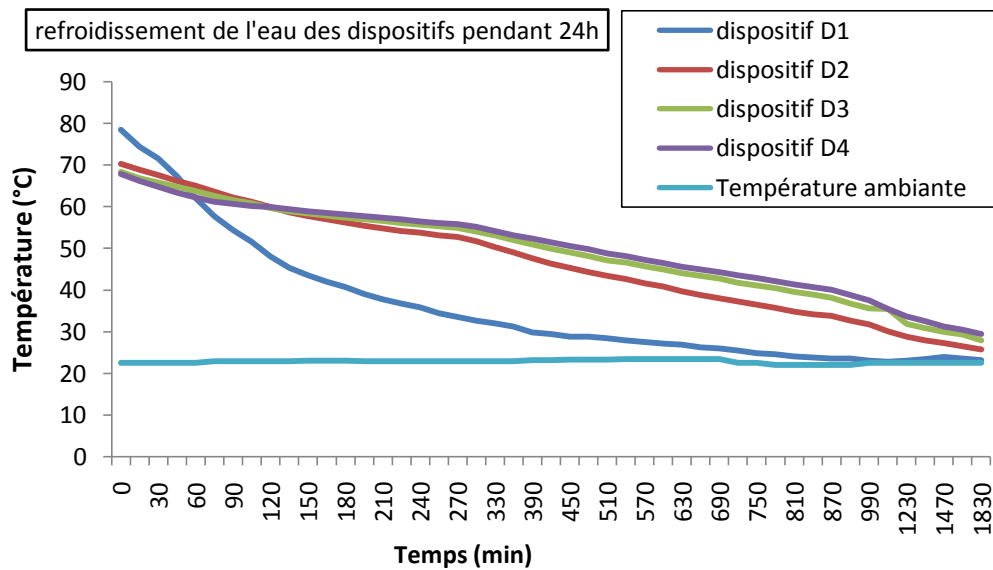


Figure V.3 : Evolution de la température de l'eau des dispositifs étudiés pendant 24h.

Remarque : On remarque que l'évolution de la température de l'eau des dispositifs du 2^{ème} essai suit presque le même parcours que le 1^{er} essai, donc ces résultats obtenus confirme l'efficacité des dispositifs.

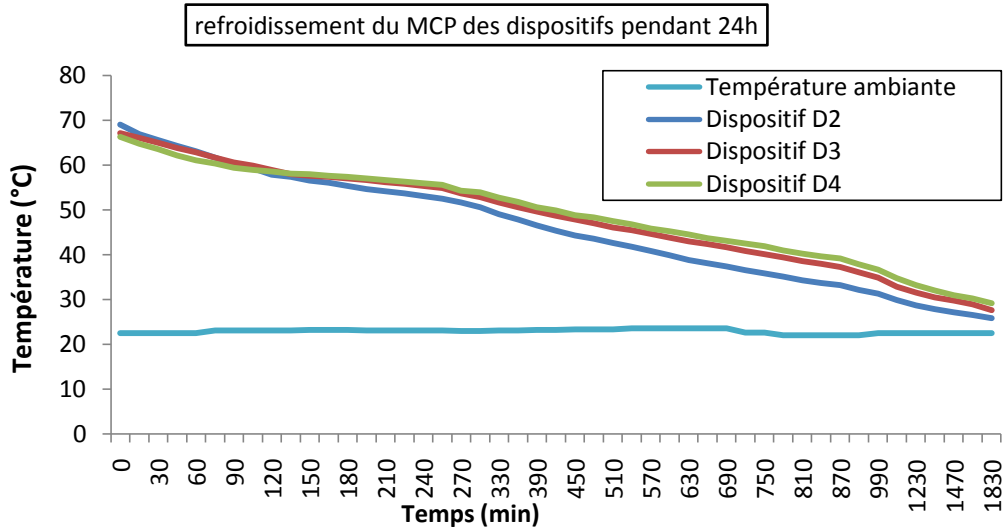


Figure V.4 : Evolution de la température du MCP des dispositifs étudiés pendant 24h.

Remarque : On remarque que l'évolution de la température du MCP des dispositifs du 2^{ème} essai suit aussi presque le même parcours que le 1^{er} essai, ce qui confirme l'efficacité des résultats.

V.2. Essais sur le site :

V.2.1. Evolution de la température de l'eau et de MCP au cours de stockage de la chaleur entre les deux essais :

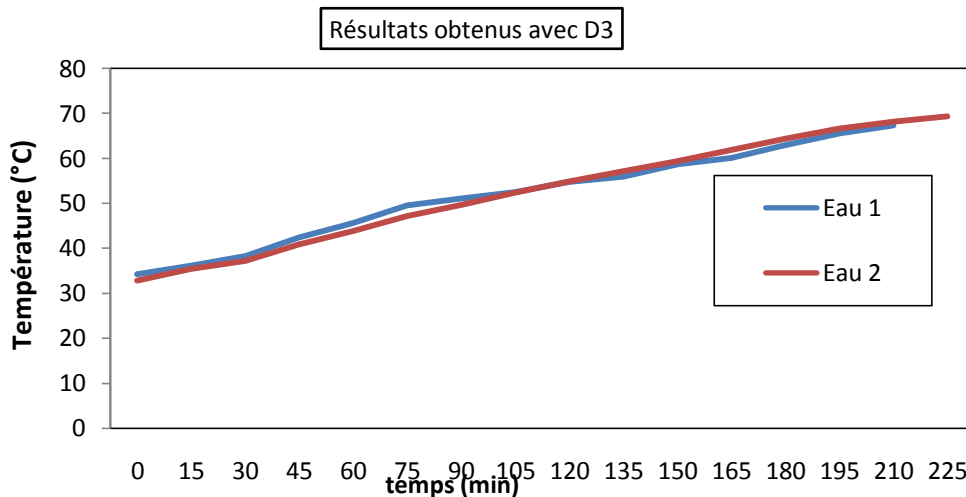


Figure V.5 : Evolution de la température de l'eau du dispositif D3 effectué sur le site (stockage)

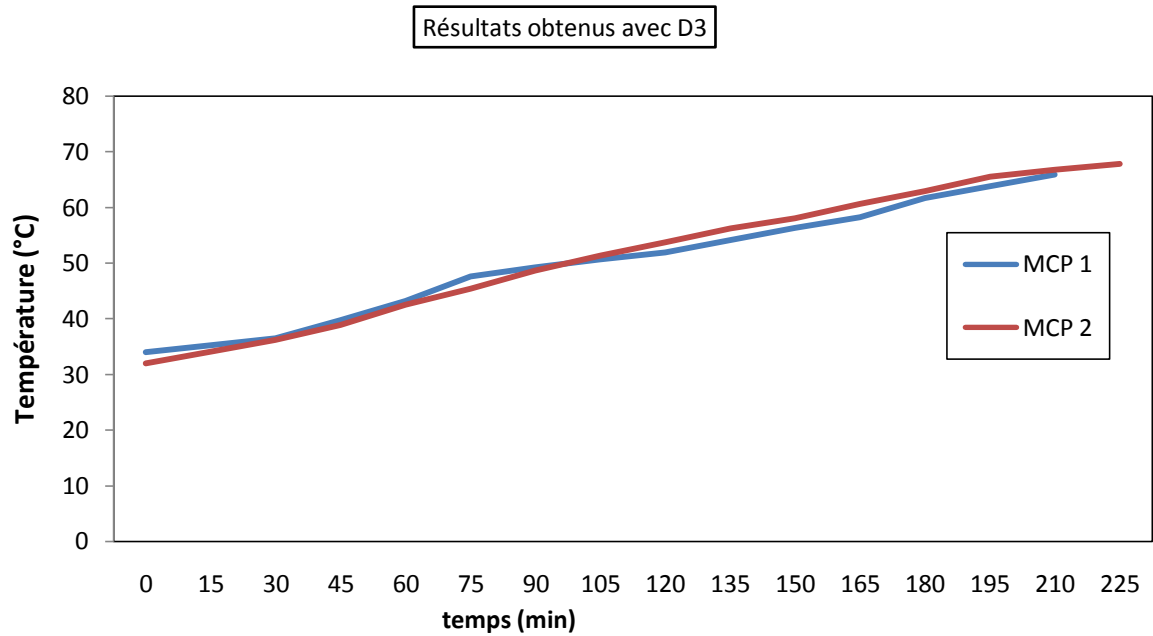


Figure V.6 : Evolution de la température de MCP du dispositif D3 effectué sur le site (stockage)

Les Figures (V.5, V.6) représentent l'évolution de la température de l'eau et de MCP au cours de stockage de la chaleur via un concentrateur solaire. On remarque que les courbes de l'évolution prennent presque le même parcours entre les deux essais, ce qui montre la fiabilité de notre module de stockage.

V.2.2. Evolution de la température de l'eau et de MCP au cours de déstockage de la chaleur entre les deux essais :

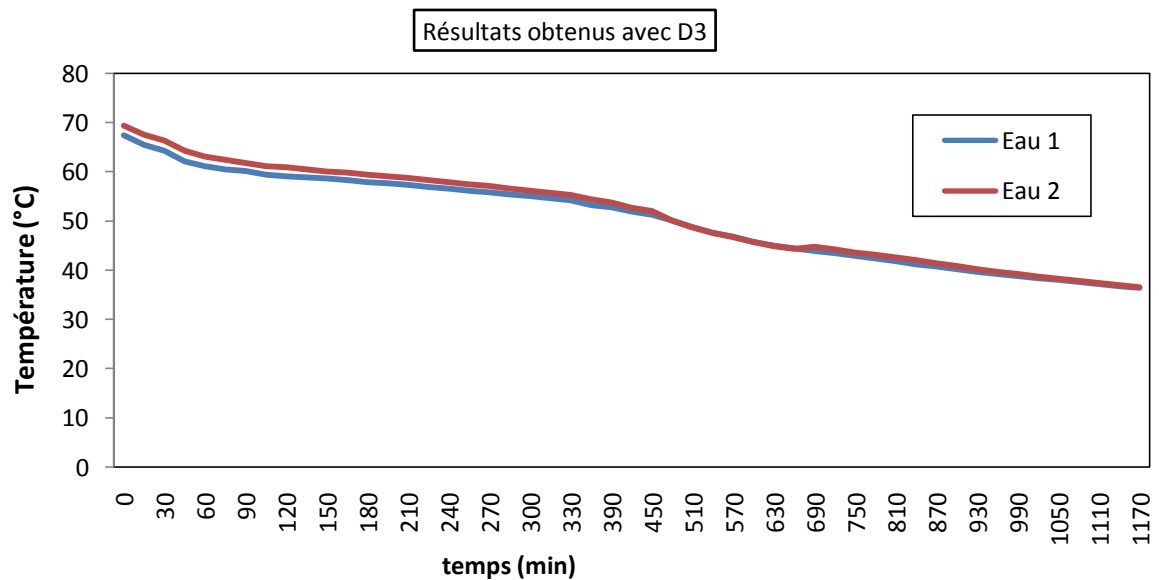


Figure V.7 : Evolution de la température de l'eau du dispositif D3 effectué sur le site (déstockage).

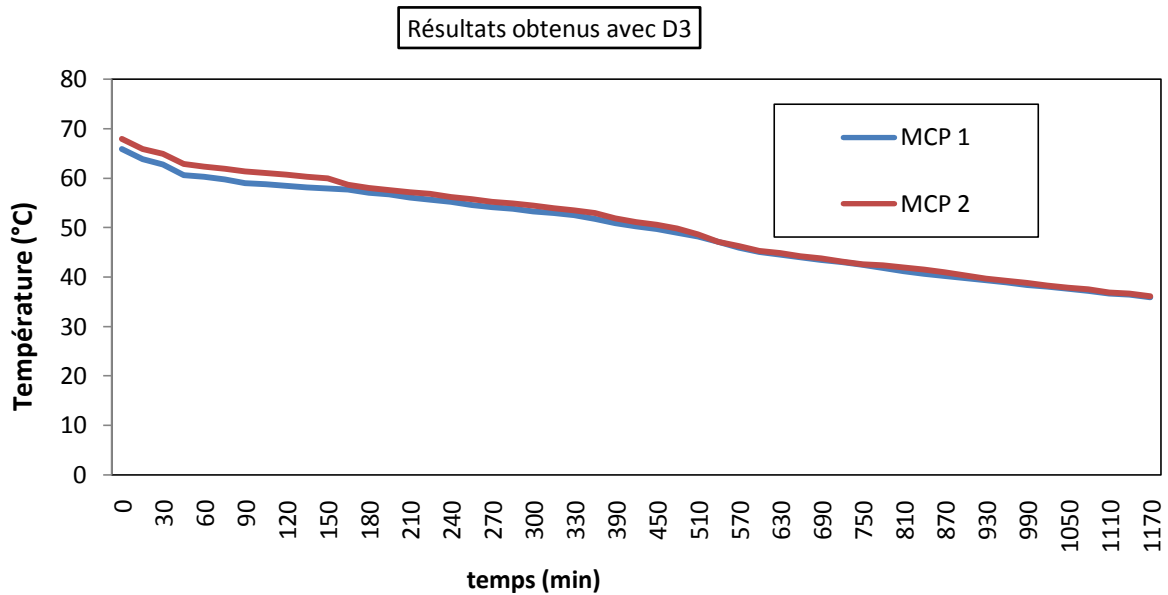


Figure V.8 : Evolution de la température de l’MCP du dispositif D3 effectué sur le site (déstockage).

Les Figures (V.7, V.8) représentent l’évolution de la température de l’eau et de MCP au cours de déstockage de la chaleur obtenue via un concentrateur solaire. On remarque que les courbes de l’évolution prennent presque aussi le même parcours entre les deux essais, ce qui montre la fiabilité de notre module de stockage.

V.3 Conclusion :

Notre système est d’une grande importance puisque il peut stocker de l’eau chaude pour un usage domestique durant 36h, on peut dire l’objectif de notre étude est bien atteint, en perspective ce résultats peut être amélioré pour étendre l’intervalle de stockage de quelques heures supplémentaire en jouant sur les caractéristiques du MCP utilisé.

Conclusion Générale

Le stockage de l'énergie thermique par voie solaire est important pour deux raisons, la première est l'économie d'énergie et la deuxième est de procurer de nouvelles ressources de stockage de chaleur.

Pour atteindre ce but, nous avons illustré dans ce travail l'étude et la réalisation d'un système de stockage thermique (Eau/MCP) qui nous a permis de mettre en application nos connaissances théoriques sur le stockage de l'énergie thermique sensible et latente, ainsi que certains transferts de chaleurs qui sont étudiés à travers l'étude de la variation des températures au cours de l'expérience (température de l'eau, du MCP et ambiante).

Cette technique n'a aucun effet direct sur l'environnement au cours de l'utilisation et ne dégage ni CO₂, ni autre corps qui peut desservir la nature.

L'utilisation de cette technique de stockage s'avère très intéressante. Nous avons réussi à stocker de l'eau sanitaire chaude pendant un temps considérable avec notre dispositif ce qui s'avère très utile pour l'usage domestique nocturne.

En perspective nous souhaitons à l'avenir augmenter l'efficacité de ce système en utilisant d'autres techniques et ressources d'énergie thermique passive et l'utilisation d'autres matériaux à changement de phase et aussi d'autres matériaux d'isolation thermique tout en respectant le coût de la réalisation et la disponibilité des matériaux utilisés.

Bibliographie

- [1] entreprise Europe network. Source de wikipedia.org(15/07/2008),chambre régionale de commerce et d'industrie.
- [2] intégration des matériaux a changement de phase comme système de régulation dynamique en rénovation thermique, Julien Borderon / Thèse de doctorat / 2012 / Université de Lyon, ENTPE
- [3] Adèle Soupart-Caron. Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. Thèse. Génie des procédés. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. <NNT : 2015GREAI078>. <tel-01266813>
- [4] jérome lopez. Nouveaux matériaux graphite/sel pour le stockage d'énergie a haute température. Étude des propriétés de changement de phase. Thèse juillet 2007. Université de bordeaux1
- [5] NREL, "Survey of thermal storage for parabolic trough power plants,"NREL/SR-550-27925, 2000
- [7] Lane (1986). Lane, G.A. (1989). Phase Change Thermal Storage Materials. In: *Hand Book of Thermal Design*.In: Guyer, C., ed. McGraw Hill Book Co.
- [8] Dincer I, Rosen MA. Thermal energy storage, systems and application. Chichester, UK:John Wiley & Sons; 2002.
- [8] Amina Akrouche ; « Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase » ; mémoire de Magister ; Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes ; ALGERIE 29 octobre 2011
- [9] A.Gontard, K.Gryska,L.Lallemand -amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase – université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [10] Eduard Oroprim – thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications – universitat de lleida , 2013.
- [11] Cheik SECK, « analyse et modélisation du comportement thermique d'un système de préchauffage d'air neuf pour l'habitat », intégrant un matériau à changement de phase, université d'Artois. Thèse Doctorat
- [12] N. Madjoudj * et K. Imessad , « Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique » Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340 Algiers, Algeria
- [13] Nehari Taieb, « Etude du refroidissement des cellules photovoltaïques par un matériau à changement de phase » , Diplôme de Doctorat , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2015 / 2016.
- [14] Damien Mathis, « Développement de nouveaux matériaux de haute inertie thermique à base de bois et matériaux à changement de phase biosourcés », Thèse, Université Laval Québec Canada 2019.

- [15] X. Py, R. Olives, S. Maurin, Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 44, pp.27272737, 2001
- [16] Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D., 2009. Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 318-345.
- [17] Abhat (1983). Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. *Solar Energy*, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332.
- [18] Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles*. USA: CRC.
- [19] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase change materials, in proc. 1992 ASES Annual Conf, USA, 1992.
- [20] Schwamberger V, Joshi C, Schmidt FP. Second law analysis of a novel cycle concept for adsorption heat pumps. In: *Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference (ISHPC11)*, Padua, Italy; 2011. p. 991e8.
- [21] Shaikh S, Lafdi K. Effect of multiple phase change materials (PCMs) slab configurations on thermal energy storage. *Energy Conversion and Management* 2006;47:2103e17.
- [22] IEA IRENA. The energy technology systems analysis programme (ETSAP): technology brief E17. 2013. www.irena.org/Publications.
- [23] Medrano M, Yilmaz MO, Nogue´s M, Martorell I, Roca J, Cabeza LF. Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy* 2009;86:2047e55.
- [24] Lazzarin R. Solar cooling plants: how to arrange solar collectors, absorption chillers and the load. *International Journal of Low Carbon Technology* 2007;2(4):376e90.
- [25] Hauer A. In: *Storage Technology Issues and Opportunities*, International Low-Carbon Energy Technology Platform, Strategic and Cross-Cutting Workshop “Energy Storage e Issues and Opportunities”, Paris, France; 2011.
- [26] de Garcia A, Cabeza CF. Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings* 2015;103:414e9.
- [27] Lane GA. *Solar heat storage-latent heat materials*, vol. I. Boca Raton, FL: CRC Press; 1983.

- [28] IEA. Energy conservation through energy storage (ECES) programme, International Energy Agency, Brochure, http://www.iea-ec.es.org/files/090525_broschuere_eces.pdf.
- [29] Schumann TEW. Heat transfer: a liquid flowing through a porous prism. *Journal of Franklin Institute* 1929;208:405e16.
- [30] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, Inc.; 2013.
- [31] Buddhi D, Sawhney RL, Seghal PN, Bansal NK. A simplification of the differential thermal analysis method to determine the latent heat of fusion of phase change materials. *Journal of Physics D: Applied Physics* 1987;20:1601e5.
- [32] Morrison DJ, Abdel-Khalik SI. Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems. *Solar Energy* 1978;20:57e67.
- [33] Khudhair AM, Farid MM. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Management* 2004;45:263e75.
- [34] He B, Setterwall F. Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool thermal storage and cool storage systems capital cost estimation. *Energy Conversion and Management* 2002;43:1709e23.
- [35] Farid MM, Khudhair AM, Razak SA, Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management* 2004; 45:1597e615.
- [36] Bruno F. Using phase change materials (PCMs) for space heating and cooling in buildings, *EcoLibrium*. *Journal of Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating* 2005;4(2):26e31.
- [37] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:318e45.
- [38] Himran S, Suwono A, Mansoori GA. Characterization of alkenes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. *Energy Sources* 1994;16(1):117e28.

- [39] Abhat A. Development of a modular heat exchanger with integrated latent heat storage. In: Germany Ministry of Science and Technology Bonn, Report no. BMFT FBT 81e050; 1981.
- [40] Noro M, Lazzarin RM, Busato F. Solar cooling and heating plants: an energy and economic analysis of liquid sensible vs. phase change material (PCM) heat storage. *International Journal of Refrigeration* 2014;39:104e16.
- [41] Felix Regin A, Solanki SC, Saini JS. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:2438e58.
- [42] Cabeza LF, Castell A, Barreneche C, De Gracia A, Fernandez AI. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15(3):1675e95.
- [43] Simmons JA. Reversible oxidation of metal oxides for thermal energy storage. *Proceedings of the International Solar Energy (ISES) Meeting* 1976;8:219.
- [44] Fujii I, Tsuchiya K, Higano M, Yamada J. Studies of an energy storage system by use of the reversible chemical reaction: $\text{CaO} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$. *Solar Energy* 1985;34:367e77.
- [45] Garg HP. *Solar thermal energy storage*. Boston, Lancaster: D. Reidel Publishing Company; 1985.
- [46] Cheralathan M, Verlaaj R, Renganarayanan S. Performance analysis on industrial refrigeration system integrated with encapsulated PCM-based cool thermal energy storage system. *International Journal of Energy Research* 2007;31:1398e413.
- [47] Fernandes MS, Brites GJVN, Costa JJ, Gaspar AR, Costa VAF. Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;39:102e23.
- [48] Kaubek F, Maier-Laxhuber P. Adsorption apparatus used as an electro-heating storage. 1990. United States Patent US 4956977 A. 18 Set.
- [49] Hauer A. Adsorption systems for TES e design and demonstration projects. In: Paksoy HO, editor. *Thermal energy storage for sustainable energy consumption*. Netherlands: Springer; 2007.