



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah



Faculté des Mathématiques et Sciences de la Matière

Département de Physique

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Matière

Spécialité: Physique

Option : Physique Énergétique et Énergies Renouvelable

Présentée par :

KOUIDRI HANANE

BOUKHRIS SOULEF

Thème

Etude comparative des différents matériaux de stockage
d'énergie thermique.

Soutenu publiquement le 14 /06/2022

Devant le jury composé de :

Mr	Soudani M.Elbar	Président	M.A.A UKMO
Mr	Bouanane Rabeh	Examineur	M.A.A UKMO
Mr	Chetti Djamel Eddin	Encadreur	Enseignant UKMO
Mr	Bechki Djamel	Co-Encadreur	Professeur UKMO

Année universitaire : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

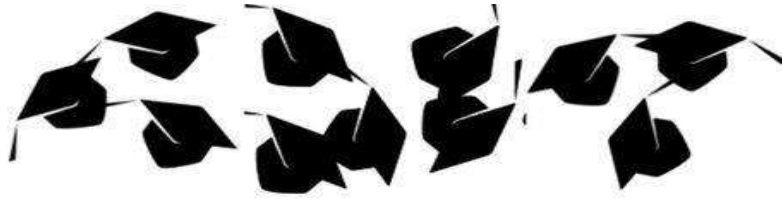
Ce travail a été réalisé dans le cadre du mémoire de master académique et nous avons été hébergés dans un laboratoire à la Faculté des Hydrocarbures à l'Université de Kasdi Merbah, Ouargla.

Nous tenons à remercier le *Dr chetti djamal El ddin*, notre directeur de mémoire, pour sa participation active au suivi de ce travail et ses conseils constructifs tout au long du semestre.

Nous remercions également le professeur *Bechki dJamal*, superviseur adjoint, pour ses conseils et ses orientations.

Nous remercions également le professeur *Bougataya Hamza* pour le soutien scientifique.

Enfin nos vifs remerciements sont adressés à toute personne ayant participé ou aidé, de loin ou de près, à l'achèvement de ce travail.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail.
A mes très chers parents, pour leurs
Amour et sacrifices,
A mes adorables frères, pour leur
Patience,
A mes proches amis et toute ma grande famille,
Pour leur soutien et encouragements,
A toutes les personnes qui Connaissent

Boukhris soulef et Kouidri hanane

De prés ou de loin,
Seulement pour leur
Existence.



Sommaire

Sommaire

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	VI
Tableau de symboles.....	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre I: Recherche bibliographique	
Introduction.....	3
I.1. Stockage d'énergie.....	3
I.2. Différents types de stockage.....	3
I.2.1. Le stockage sous forme d'énergie cinétique.....	3
I.2.2. Le stockage sous forme d'énergie potentielle.....	4
I.2.3. Le stockage sous forme d'énergie interne.....	4
I.2.4. Le stockage sous forme d'énergie électrochimique.....	4
I.2. 5. Le stockage sous forme d'énergie thermique.....	5
I.3. stockage de l'énergie thermique.....	5
I.3.1. Le Stockage par chaleur sensible.....	6
I.3.2. Le stockage par chaleur latente.....	8
I.3.3. Stockage thermochimiques.....	12
I.3.4. Comparaison entre les types de stockage thermique	13
I.3.5 Systèmes et matériaux de stockage.....	14
I.3.5.1 Systèmes de stockage.....	14

Sommaire

Chapitre II: Matériaux à changement de phase

Introduction.....	17
II.1 Matériaux à changement de phase.....	17
II.1.1.Classification des matériaux à changement de phase.....	19
II.1.2 Choix d'un MCP.....	19
II.1.3 Types des matériaux à changement de phase (MCP).....	21
II.1.3.1 Les MCP inorganiques.....	21
II.1.3.2 Les MCP Organiques.....	21
II.1.3.3 Les MCP eutectiques.....	22
II.2 Les applications des MCP pour le stockage thermique dans le domaine de bâtiment.....	22
II.2.1. Le choix du type de béton.....	24
II.2.2 - L'incorporation des MCP dans le béton.....	25
II.2.3 - La stabilité du MCP dans le béton.....	27

Chapitre III Etude comparative

III Etude comparative des différents matériaux de stockage d'énergie thermique.....	29
III.1 Introduction.....	29
III.2 Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible.....	29
III.3 Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latent (MCP)	31
III.3.1.Les gammes de températures.....	31
III.3.1.1 La gamme 5-15°C.....	31
III.3.1.2.La gamme 20-35.....	32
III.3.1.3. La gamme 25-30 C°.....	33
III.3.1.4.La gamme 40-60 C°.....	35
III.3.1.5.La gamme 55-70 C.....	36
III.3.1.6.La gamme 60-95 C.....	37

Sommaire

III.3.1.7.La gamme 100-175 C.....	40
III.3.1.8.Analyse des tableaux et des graphiques.....	43
Conclusion.....	44

Chapitre IV

IV.1. introduction.....	45
IV.2. principe de travail.....	45
IV.3. Calibrage de l'orifice mètre.....	48
IV.4. Les appareille et accessoires.....	49
IV.4.1.Un thermocouple.....	50
IV.4.2.Le testo 416.....	51
IV.4.3.Un densimètre électronique	52
IV.4.4. Un manomètre.....	53
IV.4.5.Les billes en verre.....	54
IV.4.6.Transformateur variable.....	55
IV.4.7.Lit fixe.....	56

Chapitre V:Résultats

V.1.Introduction	57
V.2. Calibrage de l'orifice mètre.....	57
V.3.Courbe de chauffage et refroidissement.....	58
V.4.Résultats de coefficient de bille de verre.....	62
Les remarque.....	63
Conclusion générale.....	64

Résumé

Liste des figures

Liste de figure :

Figure (1.1) Différents types de stockage de l'énergie thermique	6
Figure (1.2) Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	7
Figure (1.3) Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible.....	9
Figure (1.4) Phénomène de fusion/solidification dans les MCP	10
Figure (1.5) Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange	11
Figure (1.6) Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ.....	13
Figure (1.7) Systèmes a adsorption ouverts et fermes.....	16
Figure (2.1) Classification des matériaux a changement de phase.....	18
Figure (2.2) Classification des MCP suivant les matériaux de stockage de chaleur	19
Figure (2.3) Chauffage passif par intégration de MCP dans les murs (A), le sol (B), le plafond (C) et le toit(D). (La couche verte est MCP).....	28
Figure (4.1) Schéma simplifié de l'installation.....	47
Figure (4.2) Banc d'essai de stockage de l'énergie thermique.....	49
Figure (4.3) thermocouple	50
Figure (4.4) Anémomètre à hélice (testo 416)	51
Figure (4.5) la densimètre.....	52
Figure (4.6) manomètre (mesure de pression)	53
Figure (4.7) les bille de verre	54
Figure (4.8) transformateur variable.....	55

Liste des figures

Figure (4.9) lit fixe	56
Figure (5.1) Calibrage de l'orifice mètre de chauffage	57
Figure (5.2) Calibrage de l'orifice mètre de refroidissement.....	58
Figure (5.3) La variation de la température de sortie du lit avec le temps de bille de verre(T=39C°).....	59
Figure (5.4)) La variation de la température de sortie du lit avec le temps de bille de verre (T=35C°).....	60
Figure (5.5) courbes typiques de Schumann étendues par Furnes	61

Liste des tableaux

Liste des Tableaux :

Tableau (1.1) Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible (Gil2010).....	8
Tableau (1.2) Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (Gil2010).....	12
Tableau (2.1) Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état....	18
Tableau (2.2) Critères de choix d'un MCP.....	20
Tableau (3.1) Liste des matériaux solides et liquides sélectionnés pour le stockage de chaleur sensible.....	29
Tableau (3.2) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 5-15C	31
Tableau (3.3) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 20-35C.....	32
Tableau (3.4) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 25-30C.....	33
Tableau (3.5) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 40-60C.....	35
Tableau (3.6) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 55-70 C.....	36
Tableau (3.7) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 60-95 C.....	37
Tableau (3.8) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 100-175C.....	40
Tableau (3.9) matériaux à chaleur de fusion élevée.....	43
Tableau (3.10) matériaux à faible chaleur de fusion.....	44
Tableau (4.1) Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C.....	46
Tableau (5.1). Calibrage de l'orifice mètre pour T=312 K (chauffage).....	57
Tableau (5.2). Calibrage de l'orifice mètre pour T=296 K (Refroidissement).....	58
Tableau (5.3) Tableau de résultats de bille de verre pour L=0.240 (chauffage).....	62
Tableau (5.4) Tableau de résultats de bille de verre pour L=0.240 (refroidissement)	62

Tableau de symboles

Symboles	Designation	Unite
MCP	Matériau à changement de phase	-
E	Énergie	-
Q	Quantité de chaleur	(j)
T	Temperature	(C°)
M	Masse	(Kg)
S	Adsorbant solide	-
L	Liquid	-
Δh	Chaleur d'adsorption.	(J.kg-1)
C_p	Chaleur massique à pression constante	(kJ/(kg K))
K	Coefficient global de transfert de chaleur	(W/(m K))
ρ	Densité	(kg/ m ³)
T	Temps	(min)
ΔH	Différence de niveaux dans un manomètre différentiel	(m)
G	Débit massique par unité de section	(Kg/m ² .s)
h	coefficient volumétrique de transfert de la chaleur	(Kw/m ³ .k)
C_g	Chaleur spécifique du fluide	(J/kg.k)
T_g	Température du fluide à la sortie du lit	(K)
T_{g_0}	Température du fluide abordant le lit	(K)
T_{s_0}	Température initiale de solide	(K)
V	Vitesse moyenne du fluide	(m/s)
V_0	Vitesse moyenne de l'air	(m/s)
T_s	Température finale de solide	(K)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale

Au cours de ces dernières décennies, la demande de l'énergie sous ses différentes formes n'a cessé d'augmenter, vu le développement et la croissance de l'activité industrielle et la demande du confort dans la vie quotidienne comme dans le transport, le chauffage et la climatisation.

Les énergies fossiles dont le pétrole, le charbon et le gaz naturel fournissent actuellement la majeure partie des besoins mondiaux. Cependant elles sont épuisables et responsables de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et du réchauffement climatique.

Ainsi, des protocoles stricts sont imposés pour préserver l'environnement, tel que le protocole Kyoto, ce protocole a tiré la sonnette d'alarme sur la réduction des gaz à effet de serre. A ce propos, l'implication sur l'utilisation rationnelle de l'énergie et l'exploitation des énergies renouvelables sont deux voies nécessaires afin de lutter contre le réchauffement climatique.

Ce contexte énergétique a poussé les scientifiques à réfléchir sur l'utilisation de l'énergie solaire qui possède le triple avantage d'être gratuite, propre et inépuisable. Toutefois, l'inconvénient principal de cette source est son intermittence. En effet, souvent l'apport d'énergie est décalé par rapport aux besoins. L'une des solutions envisagées pour faire face à ce problème est le stockage de l'énergie, qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Principalement, il existe deux techniques de stockage de l'énergie thermique (solaire) : le stockage par chaleur sensible et le stockage par chaleur latente.

Dans le stockage par chaleur sensible, l'énergie stockée est le résultat d'une élévation de la température du matériau de stockage.

La quantité d'énergie stockée est proportionnelle à la différence de température entre les états initial et final, à la capacité calorifique et à la masse du matériau. Ainsi, le choix de ce type de stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand. Cependant,

Introduction générale

la faible densité de stockage de ces matériaux et les déperditions thermiques liées à la qualité de l'isolation sont des inconvénients majeurs.

Le stockage d'eau chaude sanitaire représente l'axe principal de la chaleur sensible, en permettant de stocker la chaleur de manière journalière.

Dans le cas du stockage thermique saisonnier, des systèmes à grande échelle sont donc mis en œuvre ; il s'agit le plus souvent de stockages souterrains (UTES, Underground Thermal Energy Storage) [51].

Dans le stockage par chaleur latente, l'énergie est stockée/déstockée sous la forme d'un changement de phase à température presque constante des matériaux appelés matériaux à changement de phase (PCM, Phase Change Matériel). La capacité de stockage thermique dépend alors de la chaleur latente et de la quantité du matériau qui change l'état. Contrairement au stockage sensible, le stockage latent est performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque l'écart de température est faible. Dans le cas d'un changement de phase solide/liquide, ce type de stockage nécessite moins de volume que le stockage sensible du fait que la chaleur latente est beaucoup plus élevée que la capacité calorifique. Les installations solaires thermiques, tel que les centrales solaires représentent l'utilisation la plus courante du stockage latent, intégrant différents types de PCM dans différentes applications notamment dans la production de l'électricité, ou le chauffage/refroidissement des bâtiments [52.53].

Le mémoire est divisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre représente une étude bibliographique sur les systèmes de stockage de l'énergie thermique.
- Le deuxième chapitre traite les matériaux à changement de phase.
- Dans le troisième chapitre est exposée une comparaison des différents matériaux de stockage de l'énergie thermique.
- Le quatrième chapitre est réservé à la partie expérimentale où le banc d'essai, les matériaux utilisés (billes de verre) et le mode opératoire sont exposés en détail.
- Les résultats des mesures et leurs interprétations sont repris au cinquième chapitre avec une conclusion générale.

Chapitre I

Recherche bibliographique

Introduction :

Le stockage de l'énergie est un des principaux thèmes de recherche développé en énergétique [4].

L'énergie est indispensable pour nos activités économiques et dans les multiples aspects de notre vie quotidienne. Cette énergie est utilisée dans trois secteurs principaux : habitat, transport et l'industrie. Dans chacun des secteurs l'énergie est consommée essentiellement sous forme thermique (chaleur ou froid) ou sous forme d'électricité. Le développement économique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les pays en voie de développement (à une moindre mesure) est directement lié à l'énergie.

On distingue quatre types d'énergie :

- l'énergie primaire qui correspond aux éléments avant la transformation de sources d'énergie (charbon, pétrole, uranium)
- l'énergie secondaire obtenue après la transformation (essence, gasoil)
- l'énergie finale qui arrive chez les consommateurs (électricité, fuel domestique)
- l'énergie utile correspondant à la quantité d'utilisation requise [3].

I.1. Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie thermique consiste à emmagasiner une quantité d'énergie durant laquelle celle-ci est abondante ou moins coûteuse afin de la restituer ultérieurement. Il est nécessaire pour les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire ou l'éolien, de stocker l'énergie immédiatement disponible car celle-ci est variable avec le temps. Ainsi, le principal intérêt d'une unité de stockage est la réduction de la consommation d'énergie [1].

I.2. Différents types de stockage [2] :

L'énergie peut être stockée par différentes options:

I.2.1. Le stockage sous forme d'énergie cinétique

Le principe du volant d'inertie permet de stocker de l'énergie sous forme cinétique. Le stockage consiste à entraîner une masse (disque, anneau ou tube) à haute vitesse. L'énergie stockée est par la suite récupérée en freinant la masse en mouvement lors du déstockage. Ce genre de système est historiquement utilisé pour la régulation des moteurs

thermiques (de locomotive à vapeur par exemple). Il est ainsi possible de stocker directement de l'énergie mécanique ou de stocker de l'électricité à l'aide d'un moteur électrique particulier.

I.2.2. Le stockage sous forme d'énergie potentielle

Les stations de pompage permettent de stocker de l'électricité sous forme d'énergie potentielle de l'eau. Lors du stockage l'eau est pompée depuis un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur, augmentant ainsi son énergie potentielle. Elle revient ensuite à son point de départ à travers une turbine pour produire de l'électricité. Ce mode de stockage de l'électricité est le plus répandu avec pas moins de 127 GWe de capacité installée dans le monde.

I.2.3. Le stockage sous forme d'énergie interne

Il est également possible de stocker de l'électricité sous forme d'énergie interne en comprimant de l'air qui est ensuite stocké dans des cuves ou dans des cavités naturelles (anciennes mines de sel, ancien réservoir de gaz naturel). On récupère ensuite l'énergie à l'aide d'une turbine de décompression. La capacité mondiale installée pour ce type de stockage avoisine les 440 MWe .

I.2.4. Le stockage sous forme d'énergie électrochimique

C'est sous cette forme qu'est stockée l'énergie avec des batteries, des super condensateurs ou des piles à hydrogène. L'électricité y est stockée et déstockée directement par l'intermédiaire de phénomènes chimiques (idéalement réversibles) comme l'oxydoréduction pour les batteries ou l'électrolyse de l'eau dans le cas de la pile à hydrogène. Toutes technologies confondues, la capacité mondiale installée de batteries est d'environ 400 MWe, avec une prépondérance de la technologie sodium-soufre représentant 80 % de cette capacité.

I.2. 5. Le stockage sous forme d'énergie thermique

Le stockage thermique intervient sous différentes formes dans notre vie quotidienne : la capacité des murs d'une maison ou d'une plaque de cheminée à absorber et restituer la chaleur, ou encore les ballons d'eau chaude résidentiels en sont de bons exemples. Trois types de stockage de chaleur peuvent être distingués : le stockage par énergie sensible, le stockage par chaleur latente et le stockage thermochimique. Le stockage de chaleur par voie thermochimique fait appel au phénomène idéalement réversible de sorption. Un matériau de stockage (le sorbant) est capable de stocker ou de restituer de la chaleur par désorption ou sorption d'un fluide (le sorbat). Le sorbant, le sorbat ou leur mélange peuvent être stockés sous des formes thermodynamiquement stables à température ambiante, permettant ainsi le stockage sur le long terme.

I.3. Stockage de l'énergie thermique :

Le stockage de la chaleur a toujours été un problème important. Nous sommes en présence d'un décalage entre les apports de chaleur et les besoins (jour/nuit, été/hiver).

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, chimique [7].

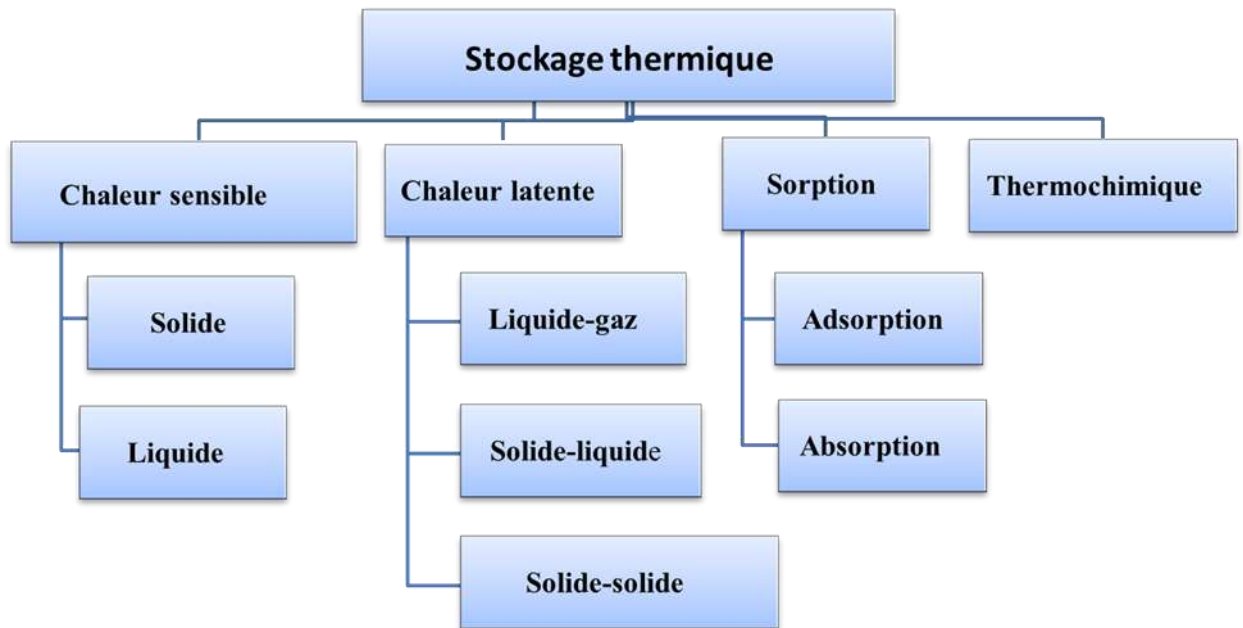


Figure (1.1) Différents types de stockage de l'énergie thermique [38]

1.3.1 Le Stockage par chaleur sensible

Dans le stockage par chaleur sensible, il faut utiliser des matériaux à forte capacité thermique qui emmagasineront un maximum d'énergie. L'énergie thermique transférée fait varier la température du matériau (figure 1.2, zone sensible). La variation de la quantité de chaleur Q échangée par le matériau lorsqu'il passe d'un état initial noté avec l'indice i à un état final noté avec l'indice f s'écrit comme suit :

$$Q = m (h_f - h_i) [J] \dots\dots (1.1)$$

Où : m est la masse du matériau [kg],

h_i est l'enthalpie massique initiale [$J kg^{-1}$],

h_f est l'enthalpie massique finale [$J kg^{-1}$].

Si la capacité thermique massique du matériau C_p (ou chaleur spécifique massique, en $J kg^{-1} K^{-1}$) est constante, l'expression de l'enthalpie massique permet d'écrire :

$$Q = m C_p (T_f - T_i) [J] \dots (1.2)$$

Où T_i est la température initiale [K],

T_f est la température finale [K].

La quantité d'énergie stockée est donc proportionnelle au volume, à l'élévation de température et à la capacité thermique du matériau de stockage. Ce type de stockage est limité par la capacité de stockage de matériaux avant le changement d'état (fusion ou solidification), et les déperditions thermiques liées à la qualité de l'isolation. Plusieurs

types d'installations de stockage par chaleur sensible ont été développés, soit de courte durée comme dans les chauffe-eau solaires, soit inter saisonniers (stockage pendant l'été pour une utilisation en hiver) utilisés généralement pour le chauffage des bâtiments [8].

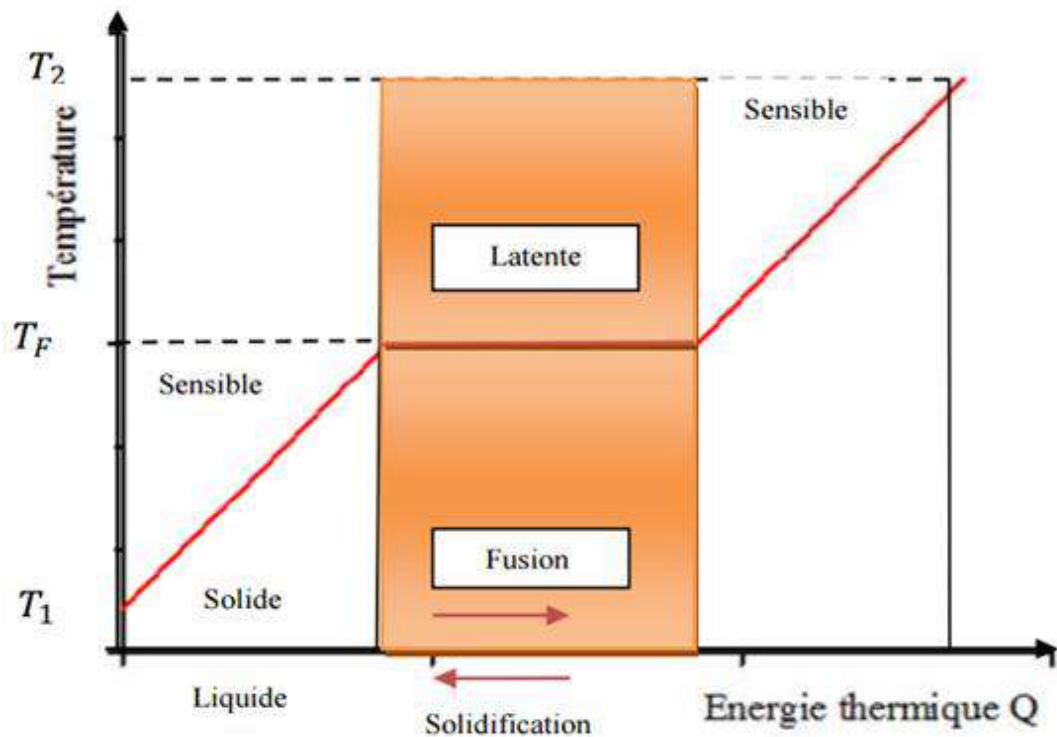


Figure 1.2 Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [16].

Le stockage de la chaleur latente implique de chauffer un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase liquide à la phase vapeur.

Proposent une liste très complète de matériaux permettant le

Stockage thermique en chaleur sensible dans le cas de la production d'énergie à grande échelle. Une sélection de quelques-uns de ces matériaux est indiquée dans le Tableau 1.1:

Tableau (1.1) Matériaux pour le stockage thermique à chaleur sensible [11]

Matériau	Temperature(°C)		Etat	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Capacité thermique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (kWh/m ³)	Coût(US \$/kg)	Coût(US \$/kWh)
	Basse	Haute							
Béton armé HT	200	400	Sol	2500	1,5	850	118	0,05	1
NaCl(sel)	200	500	Sol	2160	7	850	153	0,15	1,5
Fonte	200	400	Sol	7200	37	560	224	1	32
Acier trempé	200	700	Sol	7800	40	600	650	5	60
Briques réfractaires	200	1200	Sol	3500	5	1150	958	2	6
Cof a lit	200	1200	Sol	3000	2	1000	833	-	-
Eau liquid	0	100	Liq	1000	0,6	1180	32	-	-
HITEC selsolaire	120	133	Liq	-	-	-	-	-	-
Sels fondus solaires	265	565	Liq	1870	0,52	1600	250	0,50	3,7
Huile minérale	200	300	Liq	770	0,12	2600	55	0,3	4,2
Sels decarbonate	450	850	Liq	2100	2	2000	420	1.9	8,9
Vapeur surchauffée	100	300	Gaz	0,4	0,04	2	4x10 ⁻⁵	-	-

I.3. 2. Le stockage par chaleur latente

C'est la méthode la plus efficace pour stocker l'énergie thermique. Dans ce système de stockage, lorsque la chaleur est donnée au matériau, il transforme sa phase de solide en liquide en captant la chaleur sous forme de chaleur latente de fusion et de chaleur latente de vaporisation pendant la transformation de phase liquide en phase vapeur [8].

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. Elle intervient aussi dans les changements allotropiques.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspond à la température de la transition de phase [5].

Le stockage de la chaleur latente implique de choisir un matériau jusqu'à ce qu'il change de phase, c'est-à-dire soit de la phase solide à la phase liquide, soit de la phase

liquide à la phase gaz ou encore lors de sa transition solide-solide. La quantité de chaleur stockée et restituée dépend de la masse du matériau et selon l'équation :

$$E_{latent} = m \cdot \Delta h_{S-L \text{ ou } L-G \dots} \quad (1.3)$$

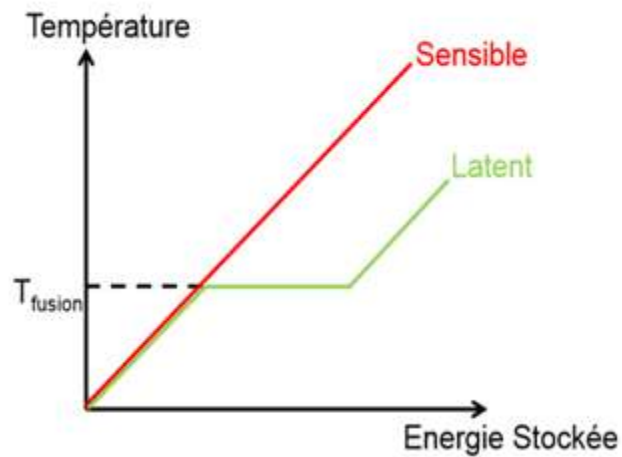
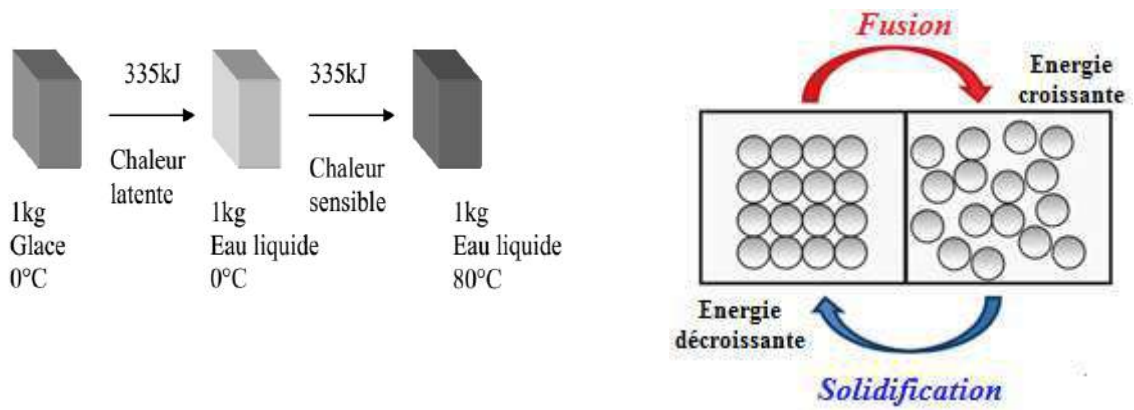


Figure (1.3) Graphe de la température-enthalpie présentant l'énergie stockée dans un système de stockage latent en comparaison avec un système de stockage sensible [7]

Physiquement l'énergie qui est absorbée par le matériau agit pour renforcer l'énergie des constituants des atomes ou molécules, augmentant leur état vibratoire. À la température de fusion les liaisons atomiques desserrèrent. La solidification est l'inverse de ce processus.



(a) Solidification/fusion à l'échelle atomique

(b) Processus de fusion de la
glace d'eau

Figure 1.4 Phénomène de fusion/solidification dans les MCP.

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

$$Q = m (h_f - h_i) = m h_f [J] \dots\dots\dots (1.4)$$

Où h_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau initialement à T_i à sa température de fusion T_F et l'on écrit :

$$Q = m (h_f - h_i) = m C_p (T_F - T_i) + m h_f [J] \dots\dots\dots (1.5)$$

Il est très clair que la chaleur latente de vaporisation est un processus d'énergie plus élevée que la chaleur latente de fusion. Mais généralement les MCP sont utilisés pour leur chaleur latente de fusion plutôt que de leur chaleur latente de vaporisation. En effet généralement le processus d'ébullition/condensation absorbe et libère plus d'énergie, mais le changement de la densité de liquide à un gaz est grand, par conséquent une augmentation importante de pression dans le système ce qui exige un système de contrôle, une quantité importante de support matériel qui n'est pas toujours pratique.

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure 1.2. Pendant le chauffage du matériau avant sa

température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante. Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la figure 1.5, on remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température). Dans le cas d'un mélange, la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (Courbe (b) de la figure 1.5) sauf dans le cas où l'on formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente [8].

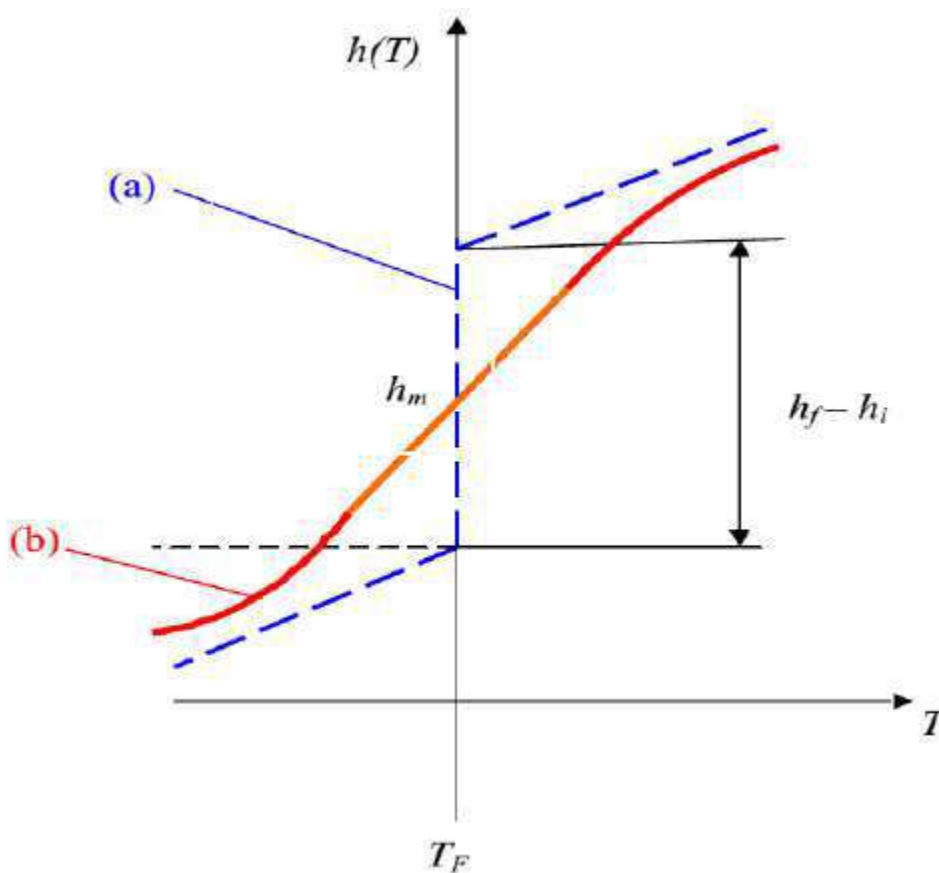


Figure 1. 5 Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur ; (b) pour un mélange [8].

Dresse un tableau (Tableau 1.2) regroupant les propriétés thermo physique moyennes des grandes catégories de matériaux à changement de phase. Il est possible d'utiliser un métal, de la roche, de l'eau, des paraffines ou des matériaux qualifiés d'organiques (fabriqués par les êtres-vivants) ou de non organiques.

Tableau (1.2) Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente [11].

Matériau	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/(m.K))	Capacité calorifique (J/(kg.K))	Chaleur latente (J/kg)	Masse pour stocker 1 GJ (tonnes)	Masse de stockage relative
Métal (cuivre)	8940	400	385	205 000	173(ΔT =15K)	40
Roche	2240	1,5	1000	-	67(ΔT =15K)	15
Eau	1000	0,6	4200	330 000	16(ΔT =15K)	4
PCM organiques ²	800	1	2000	190 000	5,3	1,25
Paraffine	900	0,2	2000	170000	5	1,15
PCM inorganiques ²	1600	2	2000	230 000	4,35	1

I.3.3. Stockage thermochimiques [6]:

De par sa nature endothermique la réaction va permettre de stocker de la chaleur, et étant donné que cette réaction est réversible, cette chaleur sera restituée lorsque la réaction inverse (Exothermique) sera réalisée.

Soient A, B et C trois composants chimiques distincts et q est une quantité d'énergie Thermique, la réaction s'écrit :



I.3.4. Comparaison entre les types de stockage thermique : [6]

Le Tableau (1.3), répertorie les caractéristiques des trois systèmes de stockage d'énergie thermique présentés. Six paramètres fondamentaux ont été choisis: la densité énergétique, la température de stockage, la durée de stockage, le transport de l'énergie, la maturité du système et la complexité de mise œuvre du système.

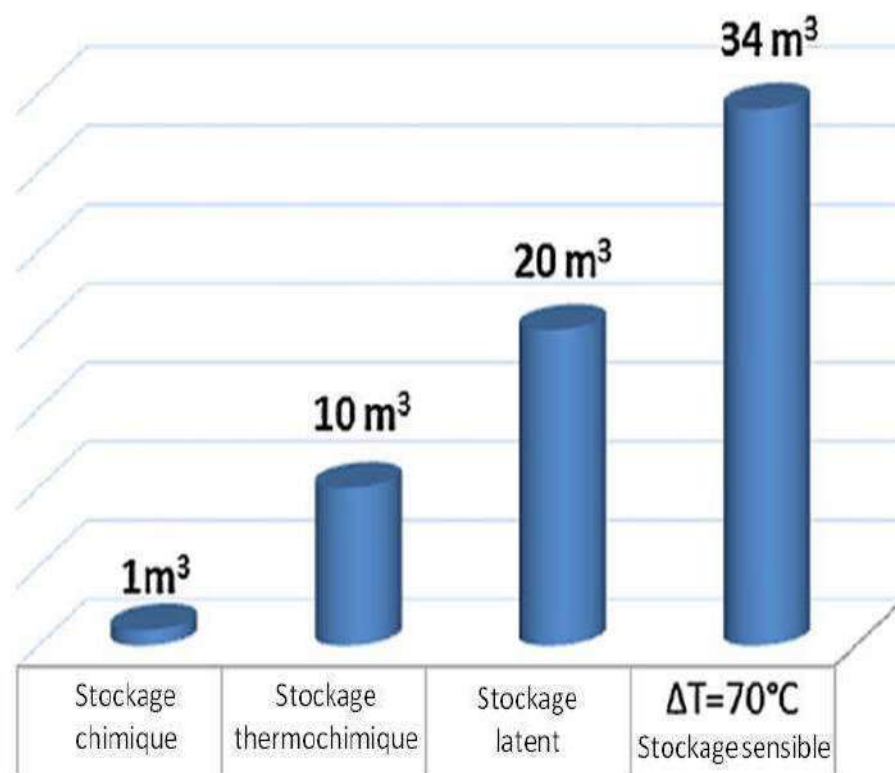


Figure (1.6). Volume requis pour le stockage de 6,7 MJ [12]

Tableau.1.3 : Caractéristiques des différents systèmes de stockage de chaleur [39].

		Stockage par Chaleur sensible	Stockage par chaleur latente	Stockage par voie Thermochimique
Densité D'énergie	Volumétrique	Faible~ 15-60kWh.m⁻³	Moyenne ~ 50 -100 kWh.m⁻³	Elevée ~ 100-500kWh.m⁻³
	Massique	Faible ~ 0,02-0,03kWh.kg⁻¹	Moyenne~ 0,05-0,1kWh.kg⁻¹	Haute~ 0,5-1 kWh.kg⁻¹
Température De stockage		Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de Charge	Température de l'étape de charge ou ambiante
Durée de Stockage		Limitée (Pertes thermiques)	Limitée (Pertes Thermiques)	Théoriquement Illimitée
Transport de L'énergie		Faible distance	Faible distance	Distance Théoriquement
Maturité		Echelle industrielle (20 MW_e)	Echelle pilote (100 kW_{th})	Echelle laboratoire (1-5 kW_{th})
Technologie		Simple	Moyenne	Complexe

I.3.5 Systèmes et matériaux de stockage [10] :

Le stockage thermochimique par adsorption étant sélectionné, il s'agit maintenant d'étudier les systèmes et les matériaux appropriés parmi les nombreux choix existants.

I.3.5.1 Systèmes de stockage :

Les systèmes à adsorption présentent comme avantages principaux :

- l'absence de compression mécanique donc la limitation des vibrations et du bruit,
- la possibilité d'utiliser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique du compresseur,
- la parfaite autonomie,
- le procédé classique des systèmes à adsorption opère avec un seul adsorbent, il

présente donc l'avantage d'être simple technologiquement.

– l'intermittence du cycle de base associée à ces systèmes représente une caractéristique utile dans les applications solaires où l'énergie n'est disponible que de manière discontinue. Ces systèmes sont donc adaptés à cette énergie.

Parmi les systèmes à adsorption, deux types de configurations sont possibles :

le système est dit ouvert si l'adsorbant est libéré dans l'environnement, fermé si le fluide adsorbé circule en circuit fermé.

Dans un système ouvert en phase de décharge, le matériau de stockage adsorbe la vapeur d'eau contenue dans l'air humide et libère la chaleur d'adsorption. La vapeur d'eau est libérée pendant la phase de désorption, qui s'accompagne d'une production de chaleur s'il y a condensation. L'eau est directement libérée dans l'environnement d'où l'appellation de système ouvert.

Contrairement aux systèmes ouverts, les systèmes fermés ne mettent en jeu aucun échange de matière avec l'environnement. En mode de décharge, un système fermé se comporte comme une pompe à chaleur, c'est-à-dire que la chaleur utile produite provient à la fois du milieu de stockage et de l'air ambiant ou d'une source de chaleur auxiliaire.

Les échanges de matière y sont plus aisés à contrôler. Nous orienterons donc nos travaux vers un système fermé.

Le principe de ces systèmes est illustré à la figure (1.7).

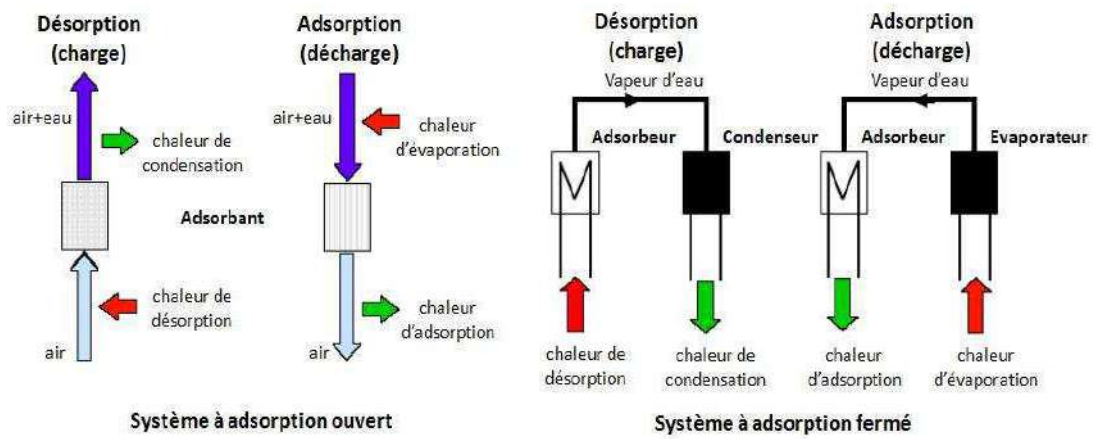


Figure (1.7) Systèmes a adsorption ouverts et fermés.

Chapitre II
**Matériaux à changement de
Phase**

Introduction :

Dans ce chapitre on s'intéresse aux connaissances actuelles relatives au contexte de notre étude et la revue bibliographique faisant état sur le problème. Une première partie se focalise sur les différents types des matériaux à changement de phase (MCP) qui permettra de faire le point sur les matériaux les plus couramment employés. Les critères de sélection sont aussi présentés et discutés [13].

II.1 Matériaux à changement de phase

Les Matériaux à Changement de Phase MCP (PCM Phase Change Matériel) ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente. La chaleur étant absorbée ou restituée lors du passage de l'état solide à l'état liquide (et vice versa). Les MCP reposent sur l'application d'un principe physique simple. Au-delà d'une certaine température caractéristique de chaque matériau, ils se liquéfient en absorbant la chaleur de l'atmosphère ambiante et les restituent lorsque la température baisse. Cette propriété du matériau est liée à son importante énergie de fusion par unité de volume, plus celle-ci sera grande plus les propriétés de stockage/restitution de la chaleur seront intéressantes. Pour le stockage de l'énergie, d'autres changements de phase sont théoriquement envisageable (solide-solide, solide-gaz, liquide-gaz), mais en pratique c'est le passage solide-liquide qui offre le plus applications (notons tout de même, par exemple, l'existence des fluides frigorigènes). La plupart des transitions liquide-gaz et solide-gaz impliquent des volumes importants ou des hautes pressions pour stocker le matériau à son état gazeux. De plus, ces transitions demandent des températures (et donc de l'énergie) plus importantes que dans le cas des transitions solide-liquide. Quant aux transitions solide-solide, elles sont généralement très lentes et ont de faible énergie de transformation [14].

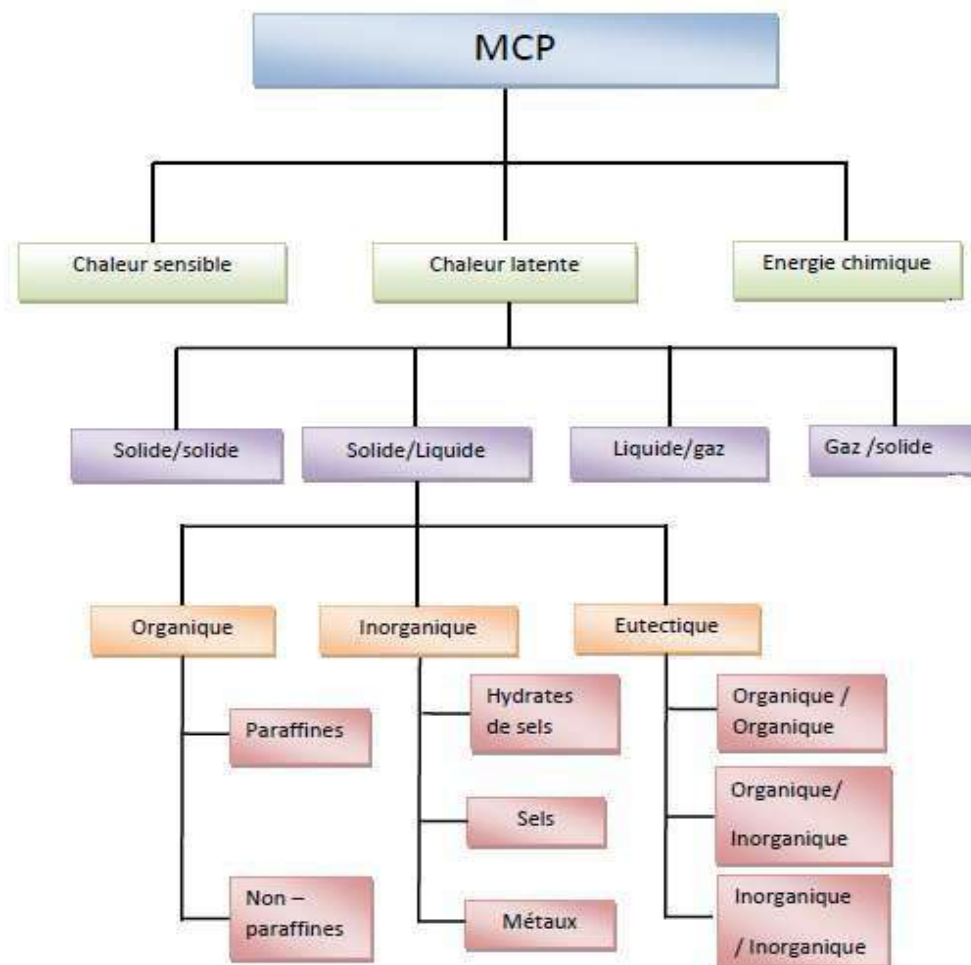


Figure 2.1 Classification des matériaux a changement de phase [15].

Table 2.1 _ Avantages et inconvénients comparés des différents changements d'état [16].

Changement de phase	Avantages	Inconvénients
Liquide/Gaz	Grande valeur de la chaleur Latente	Grand changement de volume
Solide/Solide	Faible changement de volume Pas de formation de Fluide	Faible valeur de la chaleur Latente
Solide /Liquide	Faible changement de volume	Valeur moyenne de la chaleur latente
Solide/Gaz	Grande valeur de la chaleur latente	Grand changement de volume

II.1.1 Classification des matériaux à changement de phase

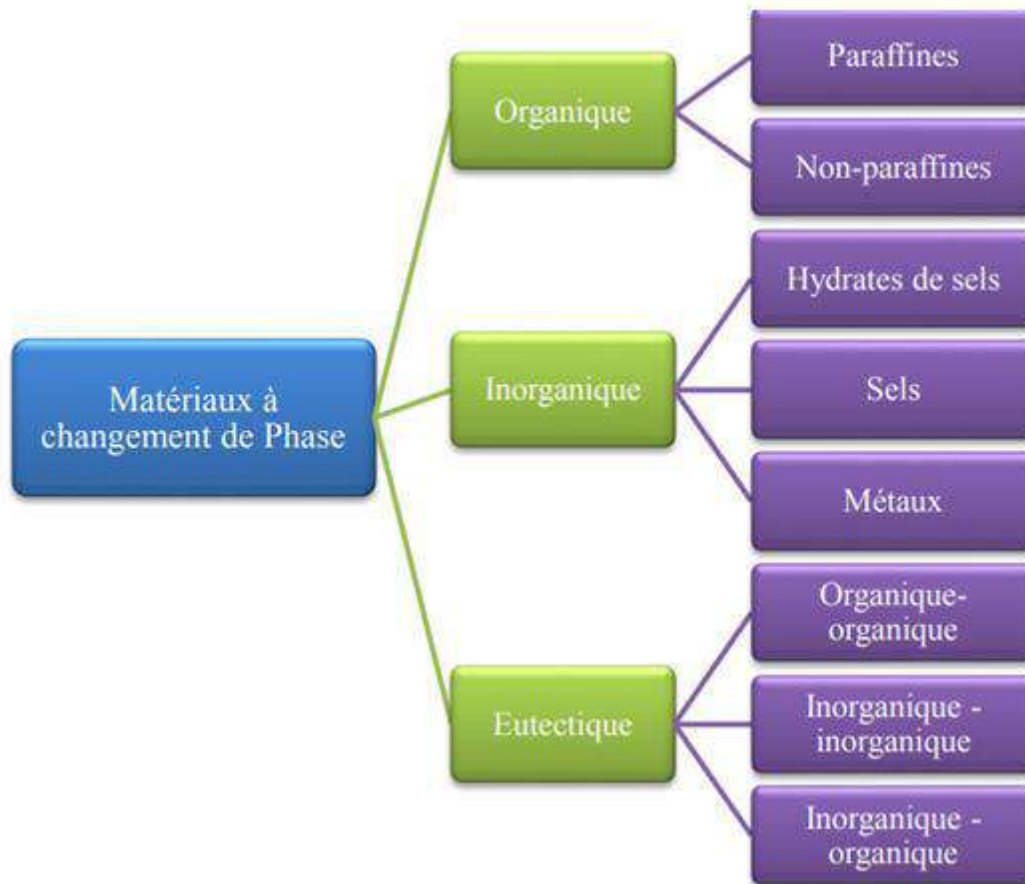


Figure 2.2 : Classification des MCP suivant les matériaux de stockage de chaleur [17].

II.1.2 Choix d'un MCP

Avec l'utilisation de l'eau comme MCP, nous sommes limités aux températures de 0°C ou 100°C (à pression atmosphérique) et de nombreuses applications nécessitent d'autres niveaux de températures. Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [18].

Table 2.2 _ Critères de choix d'un MCP [19]

Considerations thermiques	<ul style="list-style-type: none"> - Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application, - La valeur de la chaleur latente de fusion (>130 kJ /kg pour être compétitif), - Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides, - Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.
Propriétés physiques	<ul style="list-style-type: none"> - Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression, - Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible, - Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.
Considerations cinétiques	<ul style="list-style-type: none"> - Des cinétiques de charge et de décharge rapides, - Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.
Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité du corps lors des cyclages thermiques - Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage <p>pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.</p>
Considérations chimiques	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité Chimique Des Corps Avec Le Temps Et Avec Les Niveaux De Température, - Un Bon Taux De Cristallisation, <ul style="list-style-type: none"> - Ininflammabilité, - Non-Toxicité.
Considérations économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Un coût raisonnable , - - Une bonne disponibilité.

II.1.3 Types des matériaux à changement de phase (MCP)

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux les inorganiques, les organiques et les eutectiques [20].

II.1.3.1 Les MCP inorganiques :

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et $+1000\text{ °C}$. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0 °C), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à 0 °C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5 °C et 130 °C), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150 °C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles.

Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables [20].

II.1.3.2 Les MCP Organiques

Les matériaux ou les substances organiques ont une température ou une plage de température comprise entre 0 °C et 150 °C . Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques : ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammables. Par contre, ils ont des avantages majeurs ; ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation. Ils sont non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables [21].

a. La paraffine

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes composés de chaînes de n -atomes de carbone auxquels sont attachés $2n+2$ atomes d'hydrogène (C_nH_{2n+2}). La paraffine la plus simple est le méthane (CH_4). Sa température d'ébullition est très basse : $-162^\circ C$. C'est le constituant principal du gaz naturel [21].

b. Non paraffine

Les non-paraffines sont les plus abondants matériaux de changement de phase ayant des propriétés très différentes. Ces matières organiques ont d'autres sous-groupes d'acides gras et autres composés organiques non paraffinés tels que les esters, alcools, glycols, etc [21].

II.1.3.3 Les MCP eutectiques:

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique, organique, organique inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels [21].

II.2 Les applications des MCP pour le stockage thermique dans le domaine du bâtiment.

L'utilisation de la chaleur latente comme élément de stockage en thermique du bâtiment se généralise aujourd'hui dans les laboratoires.

De nombreuses études sont présentées dans la littérature concernant l'intégration de MCP dans l'architecture solaire et/ou dans des applications en solaire thermique.

Les différents MCP et les propriétés associées à leurs applications spécifiques ont été répertoriés dans de nombreuses publications. On pourra donc consulter utilement les articles de revue [22], [23] ainsi que celui de [24] ainsi que la thèse de [25].

[26] présente un état de l'art de l'utilisation des MCP dans le bâtiment. Outre les caractéristiques thermiques, cinétiques et chimiques nécessaires à l'intégration des MCP dans le bâtiment, une classification des applications est proposée. L'intégration de MCP dans des configurations type mur Trombe, en paroi, couplée à un système de chauffage et climatisation au sol ou en toiture.

L'objectif étant double : augmenter le confort thermique intérieur (en limitant les dynamiques de température ambiante) et diminuer les consommations énergétiques des bâtiments (amortissement des pics de température et donc des besoins en puissance nominale des éléments actifs).

Des rapports similaires ont également été faits dans le cadre des études de l'agence internationale de l'énergie. [27],

Des paraffines et eutectiques y sont notamment comparés de façon expérimentale, dans des cellules test de 1m³, et numériquement à l'aide d'un modèle 3D implanté dans l'environnement TRANSYS.

Les MCP utilisés pour être incorporés au béton sont essentiellement des MCP organiques, paraffinés ou non.

Le béton étant très alcalin, de nombreuses expériences ont été conduites pour réduire l'alcalinité et ainsi d'accroître le nombre de MCP compatibles avec le béton. Ceci peut être effectué de façon économique en utilisant différents types de pouzzolanes qui transforment l'hydroxyde de calcium en silicate de calcium hydraté sans altérer de façon notable la qualité du béton [28][29].

Une autre méthode consiste à effectuer un conditionnement préalable du MCP (billettes, capsules,...) qui permet de s'affranchir de ce problème de compatibilité.

Si on compare les blocs de béton avec MCP avec les blocs de bétons sans MCP, on trouve que [30]:

- La conductivité thermique varie de +/- 20%, sa valeur dépend de la combinaison des matériaux utilisés.

- La capacité de stockage de l'énergie est d'environ 200 à 300% supérieure à celle des blocs sans MCP.
- L'incorporation améliore la durabilité du cycle thermique et réduit l'absorption de l'humidité.
- L'inflammabilité est faible et la stabilité correcte.

La durée de la charge et de la décharge thermique pour les blocs avec MCP est deux fois plus longue que les blocs normaux. Ceci peut être un problème. En effet, la faible valeur du coefficient de transfert thermique peut demander la présence d'une ventilation durant la nuit. Cette ventilation réduit la température à l'intérieur plus que la présence des MCP [31]. Mais elle améliore le transfert de la chaleur entre les MCP et l'air, ce qui améliore l'efficacité du MCP .

II.2.1. Le choix du type de béton

La forte alcalinité de la plupart des bétons les rend incompatibles avec de nombreux MCP en particulier les acides gras. Il faut donc soit choisir un MCP convenable et/ou trouver le bon type de béton. Il existe de nombreux types de béton qui peuvent être soumis aux deux techniques de traitement thermique les plus courantes : l'étuvage et l'autoclavage [32]. Les essais de compatibilité effectués par Hawes *et al.* [33] concernent les bétons suivants :

- Le béton ordinaire avec des granulats calcaires étuvé à pression atmosphérique (Regular, REG, dans la notation américaine).
- Le béton léger utilisant des granulats de laitier expansés avec des fines, autoclave à haute pression.
- Le béton léger utilisant des granulats d'ardoise expansés avec des fines, étuvés à pression atmosphérique (EXS).
- Le béton léger utilisant des granulats de pierre ponce, étuvé à pression atmosphérique (PUM).

[28][29] ont étudié le comportement du béton autoclave mais compte tenu de leur grande utilisation dans le bâtiment, ils ont également étudié le comportement de différents bétons étuvés ou non.

Il faut remarquer que les traitements à haute pression de vapeur donnent un béton dur stable dans lequel les produits d'hydratation sont de grandes dimensions et ont un faible

retrait .Des recherches sont en cours afin de trouver des moyens pratiques pour diminuer l'alcalinité des bétons étuvés. Par exemple, pour réduire les coûts il est d'usage d'ajouter des pouzzolanes. Certains types de pouzzolanes peuvent réagir avec l'hydroxyde de sodium et ainsi réduire l'alcalinité du béton améliorant aussi sa compatibilité avec de nombreux MCP.

II.2.2 - L'incorporation des MCP dans le béton

Parmi les procédés déjà cités, trois ont été principalement étudiés :

- L'incorporation directe.
- L'immersion (ou imprégnation).
- L'insertion de capsules.

a- L'incorporation directe

On incorpore directement le MCP au mélange lors de la fabrication du béton. C'est le procédé le plus pratique et le moins cher. Le succès de ce procédé dépend de deux conditions essentielles [29].

L'introduction du MCP dans le mélange ne doit pas interférer avec le processus d'hydratation ni affecter la résistance du liant dans le béton ni provoquer de réaction entre les composants du mélange et/ou avec le MCP.

Pour ne pas interférer avec le processus d'hydratation les MCP peuvent être introduits sous forme solide, soit en poudre soit en granulés, en prenant garde que leur température ne dépasse pas la température de fusion lors du mélange. Il faut également prévoir que la cure du béton n'élimine pas le MCP déjà introduit.

b- Immersion

Le procédé consiste à plonger les blocs de béton dans le MCP liquide. C'est un procédé flexible qui permet une production en série et qui permet d'utiliser des blocs usuels.

Néanmoins cette technique est plus onéreuse que l'incorporation directe [34]. Dans ce procédé, les échantillons de béton et de MCP ont été portés à 80°C avant immersion pendant 12 minutes.

Les échantillons ont ensuite été immergés à différents intervalles de temps (1, 8, 30 et 60minutes) après la coulée.

Les paramètres qui affectent l'absorption et la rétention des MCP ont été identifiés [34] :

- La structure du béton (porosité, etc....),
- La température du matériau et son effet sur la capillarité.
- La viscosité du MCP.
- La durée de l'immersion dans le MCP
- La surface à travers laquelle se produit l'absorption.
- La pression du liquide.
- L'effet de la déshumidification.
- La polarité de la molécule du MCP.
- L'âge du béton.

Il est intéressant de rappeler l'influence de la structure du béton et de la température. La structure agit essentiellement par l'intermédiaire des pores présents dans le béton. La température agit sur le diamètre des pores et les propriétés physiques du MCP (tension superficielle, viscosité). Ainsi une augmentation de température augmentera le diamètre des pores et diminuera la tension superficielle, la viscosité et la masse volumique du MCP favorisant sa migration dans le réseau capillaire constitué par les pores.

Dans leur étude, Hawes et al. ont modélisé l'absorption et tirent les conclusions suivantes [34] :

- la modélisation effectuée permet de déterminer la quantité de MCP absorbée (donc la capacité de stockage par chaleur latente) du produit.
- Les effets de la température ont été modélisés et vérifiés. De plus, il a été établi que les liaisons hydrogène étaient également dépendantes de la polarité du MCP et de la quantité de Ca(OH)_2 disponible.
- Le taux de vide a un effet important et il est plus grand pour le béton autoclavé.

D'autre part, la quantité de MCP absorbée par le béton dépend du type de bloc utilisé. Par exemple, un panneau préparé à l'aide d'un mélange de gypse, ciment, sciure et sable avec de l'eau, une fois séché et imprégné avec un MCP, a montré que ce mélange peut absorber 30% de son poids en eau. Un tel panneau peut être utilisé aussi bien en plancher ou en plafond que pour des murs.

Enfin, la température d'immersion optimale dépend du couple béton-MCP et ne doit pas être trop importante (de l'ordre de 80°C), les bétons imprégnés absorbant moins l'humidité que les non-imprégnés.

c- L'encapsulation

Cette méthode est une variante du procédé d'incorporation directe. Les capsules doivent posséder de bonnes propriétés de transfert de chaleur, doivent résister au procédé de fabrication, au transport, à la construction et à l'utilisation.

On distingue la macro encapsulation et la micro encapsulation.

La micro encapsulation est le procédé physique ou chimique pour obtenir des petites particules liquides ou solides de diamètre de l'ordre de 1 à 1000 µm avec une enveloppe solide.

[35] a montré que les hydrocarbures paraffiniques peuvent être micro encapsulés avec succès. Ces MCP micro encapsulés sont bien adaptés à l'utilisation dans les vêtements alors que leur utilisation dans les bâtiments est encore du domaine de la recherche.

II.2.3 - La stabilité du MCP dans le béton

On a vu qu'un des problèmes posés par l'incorporation des MCP dans le béton est la compatibilité du MCP avec le béton. Ce problème est dû en grande partie au caractère alcalin du béton confronté à l'acidité de certains MCP. Les paraffines, par exemple, ne sont pas concernées par ce problème car elles sont non réactives et stables et ne nécessitent pas de modification du béton.

La stabilité du couple MCP – béton dépend donc du traitement préventif effectué pour diminuer cette alcalinité [6].

Les moyens utilisés sont :

- Les traitements thermiques (autoclavage par exemple).
- L'ajout de matériaux qui diminuent l'alcalinité.

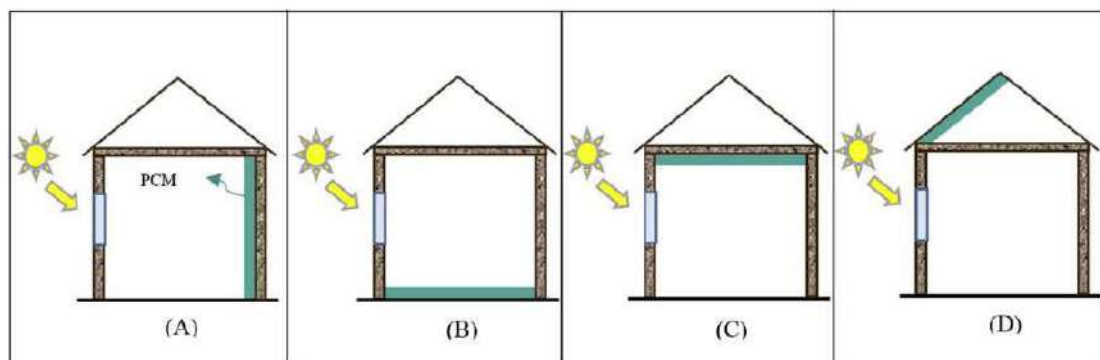


Figure 2.3 Chauffage passif par intégration de MCP dans les murs (A), le sol (B), le plafond (C) et le toit(D). (La couche verte est MCP) [36].

Chapitre III
Etude comparative des différents
matériaux de stockage d'énergie
thermique

III Etude comparative des différents matériaux de stockage d'énergie thermique :

III.1 Introduction :

Le stockage d'énergie thermique est l'un des principaux domaines de recherche en matière de stockage d'énergie ces dernières années.

Notre but dans ce chapitre est d'étudier une comparaison entre différents matériaux de stockage d'énergie thermique, cette comparaison est basée sur plusieurs critères, dont les propriétés thermo physiques.

III.2 Matériaux pour le stockage thermique à chaleursensible :

Tableau (3.1) : Liste des matériaux solides et liquides sélectionnés pour le stockage de chaleur sensible [39].

Material	Type	Temperature E range(1C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/(kgK))	$k(W/(mK))$ (at201C)
Water	Liquid	0–100	1000	4.19	0.58
CaloriaHT43	Liquid	12–260	867	2.2	–
Ethanol	Liquid	Upto78	790	2.4	0.171
Proponal	Liquid	Upto97	800	2.5	0.161
Butane	Liquid	Upto 118	809	2.4	0.167
Isobutanol	Liquid	Upto100	808	3	0.133
Isopentanol	Liquid	Upto 148	831	2.2	0.141
Octane	Liquid	Upto 126	704	2.4	0.134
Engine Oil	Liquid	Upto160	888	1.88	–
Brick	Solid	20–70	1600	0.84	1.20
Concrete	Solid	20–70	2240	1.13	0.9–1.3
Cement sheet	Solid	20–70	700	1.050	0.36
Gypsum plastering	Solid	–	1200	0.837	0.42
Granite	Solid	20–70	2650	0.900	2.90
Marble	Solid	20–70	2500	0.880	2.00
Sandstone	Solid	20–70	2200	0.712	1.83
Clay sheet	Solid	–	1900	0.837	0.85
Asphalt sheet	Solid	–	2300	1.700	1.20
Steel slab	Solid	20–70	7800	0.502	50
Corkboard	Solid	–	160	1.888	0.04
Wood	Solid	–	800	2.093	0.16
Plastic board	Solid	–	1050	0.837	0.50
Rubber board	Solid	–	1600	0.200	0.30
PVC board	Solid	–	1379	1.004	0.16
Asbestos sheet	Solid	–	2500	1.050	0.16
Formaldehyd	Solid	–	3	1.674	0.03

e board			0		
Thermaliteboard	Solid	–	753	0.837	0.19
Fiberboard	Solid	–	300	1	0.06
Siporex board	Solid	–	550	1.004	0.12
Polyurethane board	Solid	–	30	0.837	0.03
Light plaster	Solid	–	600	1	0.16
Dense plaster	Solid	–	1300	1	0.50
Aluminum	Solid	Upto160	2707	0.896	204
Aluminum oxide	Solid	Upto160	3900	0.84	30
Aluminum sulfate	Solid	Upto160	2710	0.75	–
Cast-iron	Solid	Upto160	7900	0.837	29.3
Pure iron	Solid	Upto160	7897	0.452	73
Calcium chloride	Solid	Upto160	2510	0.67	–
Copper	Solid	Upto160	8954	0.383	385
Stone, granite	Solid	Upto160	2640	0.82	1.7–3.98
Stone, sandstone	Solid	Upto160	2200	0.71	1.83

III.3 Matériaux pour le stockage thermique à chaleur latente (MCP) :

III.3.1. Les gammes de températures :

III.3.1.1 La gamme 5-15°C :

Table (3.2) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 5-15 C :

N	Nom du MCP	Nature du MCP	Composition [% massique]	T fusion [C]	Chaleur De fusion kJ/kg	Enthalpie volumique (solide) [kWh/m ³]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	Ref
1	LiClO ₃ .3H ₂ O	inorganique	-	8,1	253	120,87	-	-	[39]
2	ZnCl ₂ .3H ₂ O	inorganique	-	10	-	-	-	-	[39]
3	K ₂ HPO ₄ .6H ₂ O	inorganique	-	13	-	-	-	-	[39]
4	NaOH.7/2CO ₂	inorganique	-	15	-	-	-	-	[39]
49	Parafin C15C16	organique	-	8	153	-	-	-	[39]
50	PolyglycolE400	organique	-	8	99,6	33,97	52,9	1912,04	[39], [36]
67	Propyl palmitate	organique	-	10	186	-	-	-	[39]
69	Isopropyl palmitate	organique	-	11	97,5	-	2	73,84	[39], [37]
70	Capric lauric acid	organique	-	13,3	142,2	-	-	-	[39]
150	Triethylolethane +water+urea	Eutectique	38,5+31,5+30	13,4	160	-	-	-	[39]

III.3.1.2. La gamme 20-35 :

Table (3.3) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 20-35 C

N	Nom du MCP	Nature du MCP	Composition [% mas-sique]	T fusion [C]	chaleur de fusion kJ/kg	Enthalpie volumique (solide) [kWh/m ³]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	Ref
7	Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	inorganique	-	25,8	125,9	93,36	9	-	[39], [44]
8	CaCl ₂ .6H ₂ O	inorganique	-	29	188,34	62,95	28,65	-	[39], [42]
9	LiNO ₃ .3H ₂ O	inorganique	-	30	296	94,27	-	-	[39]
10	Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	inorganique	-	34	246,5	175,95	1	-	[39], [42]
11	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	inorganique	-	32,4	251	98,73	63,85	915,86	[39], [42]
12	CaBr ₂ .6H ₂ O	inorganique	-	34	115,5	99	355,38	11076,9	[39], [43]
52	Parafin C ₁₇ C ₁₈	Organique	-	21	152	-	-	-	[39]
53	Polyglycol E600	Organique	-	22	127,2	43,53	3	84,9	[39], [42]
54	Parafin C ₁₃ C ₂₄	Organique	-	23	189	47,25	-	-	[39]
55	1-dodecanol	Organique	-	26	200	-	40,427	727,68	[39], [43]
56	Parafin C ₁₈	Organique	-	28	244	55,17	-	-	[39]
74	Capric lauric acid (45% 55%)	organique	-	21	143	-	-	-	[39]
75	Dimethylsabacate	organique	-	21	127,5	-	372,30	10512,1	[39]
76	Octadecyl 3-mercaptopropylate	organique	-	21	143	-	806,66	20307,6	[39], [44]
77	Mystiric acid-Capric acid (34 % 66%)	organique	-	24	147,7	41,76	-	-	[39]
78	Octadecylthioglycate	organique	-	26	90	-	331	13240	[39], [41]

79	Vinylstearate	organique	-	28	122	-	2730	80557,3	[39], [41]
140	Ca(NO ₃).4H ₂ O +Mg(NO ₃).3.6H ₂ O	eutectique	66,3+33,3	25	95	41,95	-	-	[39]
141	C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + C ₁₀ H ₂₀ O ₂	eutectique	47+53	30	136	-	-	-	[39]
151	CH ₃ CONH ₂ +N 4H ₂ CONH ₂	eutectique	34+66	24	147,7	-	-	-	[39]
152	Triethylolethane +urea	eutectique	50+50	27	163	-	-	-	[39]
153	CH ₃ COONa. 3H ₂ O + NH ₂ CONH ₂	eutectique	62,5+37,5	29,8	218	-	99	1634,86	[39], [41]

III.3.1.3. La gamme 25-30 C°

Table (3.4) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 25-30 C

N	NomduMCP	NatureduMCP	Composition[%mas-sique]	T fusion[C]	chaleur defusionkJ/kg	Enthalpie volumique (solide) [kWh/m ³]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	Ref
7	Mn(NO ₃).2.6H ₂ O	inorganique	-	25,8	125,9	93,36	9	-	[39], [44]
8	CaCl ₂ .6H ₂ O	inorganique	-	29	188,34	62,95	28,65	-	[39], [42]
9	LiNO ₃ .3H ₂ O	inorganique	-	30	296	94,27	-	-	[39]
10	Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	inorganique	-	34	246,5	175,95	1	-	[39], [42]
11	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	inorganique	-	32,4	251	98,73	63,85	915,86	[39], [42]
12	CaBr ₂ .6H ₂ O	inorganique	-	34	115,5	99	355,38	11076,9	[38], [43]
52	Parafin C ₁₇ C ₁₈	organique	-	21	152	-	-	-	[39]
53	PolyglycolE600	organique	-	22	127,2	43,53	3	84,9	[39], [42]
54	Parafin C ₁₃ C ₂₄	organique	-	23	189	47,25	-	-	[39]

55	1-dodecanol	organique	-	26	200	-	40,427	727,68	[39], [43]
56	ParafinC18	organique	-	28	244	55,17	-	-	[39]
74	Capriclauric acid(45%55%)	organique	-	21	143	-	-	-	[39]
75	Dimethylsaba- cate	organique	-	21	127,5	-	372,30	10512,1	[39]
76	Octadecyl3- mencaptopropy- late	organique	-	21	143	-	806,66	20307,6	[39], [44]
77	Mystiricacid- Capricacid(34 % 66%)	organique	-	24	147,7	41,76	-	-	[39]
78	Octadecylthio- glycate	organique	-	26	90	-	331	13240	[39], [41]
79	Vinylstearate	organique	-	28	122	-	2730	80557,3	[39], [41]
140	Ca(NO3).4H2O +Mg(NO3)3.6H 2O	eutectique	66,3+33,3	25	95	41,95	-	-	[39]
141	C14H28O2 + C10H20O2	eutectique	47+53	30	136	-	-	-	[39]
151	CH3CONH2+N 4H2CONH2	eutectique	34+66	24	147,7	-	-	-	[39]
152	Triethylolethane +urea	eutectique	50+50	27	163	-	-	-	[39]
153	CH3COONa. 3H2O + NH2CONH2	eutectique	62,5+37,5	29,8	218	-	99	1634,86	[39], [41]

III.3.1.4. La gamme 40-60 C°

Table (3.5) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 40-60C

N	Nom du MCP	Nature du MCP	Composition[% massique]	T fusion[C]	chaleur de fusion kJ/kg	Enthalpie volumique (solide)[kW h/m3]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	Ref
13	K(CH3COO).3 /2H2O	inorganique	-	42	-	-	180	-	[39], [41]
14	K3PO4.7H2O	inorganique	-	45	-	-	400	-	[39], [44]
16	Ca(NO3)2.4H2O	inorganique	-	42,7	-	-	90	-	[39], [42]
17	Na2HPO4.7H2O	inorganique	-	48	281	118,64	14	179,35	[39], [44]
18	Na2S2O3.5H2O	inorganique	-	48,5	209,3	96,85	2,6	44,72	[39], [41]
19	Zn(NO3)2.2H2O	inorganique	-	54	-	-	3,5	-	[39], [41]
20	NaOH.H2O	inorganique	-	58	-	-	40	-	[39], [44]
21	Na(CH3COO).3H2O	inorganique	-	58	226	80,35	-	-	[39]
22	Cd(NO3)2.4H2O	inorganique	-	59,5	-	-	340	-	[39], [41]
23	Fe(NO3)2.6H2O	inorganique	-	60	-	-	-	-	[39]
57	ParanC2 0C33	organique	-	49	189	2,57	-	-	[39]
58	ParanC2 2C45	organique	-	59	189	3,09	-	-	[39]
63	ParanC1 6C28	organique	-	49	189	47,7	-	-	[39]
80	Lauricacid	organique	-	43	178	42,62	99	2002,24	[39], [41]
81	Myristicacid	organique	-	50	204,5	56,23	5	88,01	[39], [42]
142	Mg(NO3)3.6H2O +NH4NO3	eutectique	61,5+38,5	52	125,5	55,63	-	-	[39]
143	Mg(NO3)3.6H2O +MgCl2.6H2O	eutectique	58,7+41,3	59	132,2	59,85	-	-	[39]

144	Mg(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O +MgCl ₂ ·6 H ₂ O	eutectique	50+50	59,1	144	-	-	-	[39]
155	NH ₂ CONH ₂ +NH 4NO ₃	eutectique	53+47	46	95	-	-	-	[39]

III.3.1.5.La gamme 55-70 C

Table (3.6) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 55-70 C.

N	Nom du MCP	Nature du MCP	Composition[% massique]	T fusion[C]	chaleur de fusion kJ/kg	Enthalpie volumique(s olide)[kWh/ m ³]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	Ref
19	Zn(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	inorganique	-	54	-	-	3,5	-	[39] [41]
20	NaOH·H ₂ O	inorganique	-	58	-	-	40	-	[39], [42]
21	Na(CH ₃ COO)· 3H ₂ O	inorganique	-	58	226	80,35	-	-	[39]
22	Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	inorganique	-	59,5	-	-	340	-	[39], [44]
23	Fe(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	inorganique	-	60	-	-	-	-	[39]
82	Palmiticacid	organique	-	64	185,4	50,93	1700	33009,7	[39], [44]
83	StearicAcid	organique	-	70	200	53,61	3030	54540	[39], [44]
84	Dinitro-toluene	organique	-	70	111	43,38	34400	1115675	[39], [44]
57	ParanC2 0C33	organique	-	59	189	47,88	-	-	[39]
58	ParanC2 2C45	organique	-	59	189	48,3	-	-	[39]
143	Mg(NO ₃) ₃ ·3·6H ₂ O +MgCl ₂ ·6H ₂ O	eutectique	58,7+41,3	59	132,2	59,85	-	-	[39]
144	Mg(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O+MgCl ₂ · 6H ₂ O	eutectique	50+50	59,1	144	-	-	-	[39]
145	NH ₂ CONH ₂ +NH 4NO ₃	eutectique	53+47	61	148	76,05	-	-	[39], [42]

146	Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O +MgBr ₂ .6H ₂ O	eutectique	59+41	66	168	-	-	-	[39]
156	CH ₃ CONH ₂ +C ₁ 7H ₃ COOH	eutectique	50+50	65	218	-	-	-	[39]
157	Naphthalene+benz oicacid	eutectique	67,1+32,9	67	123,4	-	-	-	[39]

III.3.1.6.La gamme 60-95 C

Table(3.7) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 60-95 C

N	Nom du MCP	Nature du MCP	Composition[% massique]	T fusion[C]	Chaleur De fusion kJ/kg	Enthalpie volumique(s olide)[kWh/ m ³]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	Ref
23	Fe(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	inorganique	-	60	-	-	340	-	[39] ,[44]
24	Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	inorganique	-	68,1	-	-	1	-	[39] ,[41]
25	Na ₃ PO ₄ .12H ₂ O	inorganique	-	69	-	-	3	-	[39] ,[41]
26	Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	inorganique	-	78	265,7	152,77	141	1910	[45] ,[44]
27	KAl(SO ₄) ₂ 12H ₂ O	inorganique	-	80	-	-	2,5	-	[45] ,[44]
28	Al ₂ (SO ₄) ₃ 18H ₂ O	inorganique	-	85,8	-	-	-	-	[45]
29	Al(NO ₃) ₃ .8H ₂ O	inorganique	-	88	-	-	-	-	[45]
30	Chrome Alum dodecahydrate	inorganique	-	89	216	109,8	1200	20000	[45] ,[42]
31	StrontiumHydroxi deoctahydrate	inorganique	-	89	370	195,27	8400	81729	[45] ,[44]
32	AluminumNitrateo ctahy-drate	inorganique	-	89	-	-	-	-	[45]
33	MagnesiumNitrat ehexahy-drate	inorganique	-	90	150	68,16	1	24	[45] ,[41]

34	PotassiumAlum dodeca- hydrate	inorganique	-	91	184	88,16	-	-	[45]
35	LithiumPer- chloratetrihy- drate	inorganique	-	95	324	165,6	400	4444	[45] ,[42]
36	AmmoniumAlu m dodeca- hydrate	inorganique	-	95	269	122,54	288	3854	[45] ,[42]
59	Paranwax	organique	-	64	173,6	44,17	2	41,47	[45] ,[41]
60	Polyglycol E6000	organique	-	66	190	63,96	-	-	[45]
61	ParanC2 1C50	organique	-	67	189	48,825	-	-	[45]
64	Biphenyl	organique	-	71	119,2	38,6	2	60,4	[45] ,[41]
65	Propionamide	organique	-	79	168,2	-	1700	36385	[45] ,[42]
66	Naphthalene	organique	-	80	147,7	46,97	3	73,12	[45] ,[41]
82	Palmiticacid	organique	-	64	185,4	50,93	1700	33009	[45] ,[44]
83	StearicAcid	organique	-	70	200	53,61	3030	54540	[45] ,[42]
84	Dinitro-toluene	organique	-	70	111	43,38	34400	11156	[45] ,[42]
85	Biphenyl	organique	-	71	119	38,54	1700	51428	[45] ,[42]
86	ArachidicAcid	organique	-	76,5	227	51,95	100	1585	[45] ,[41]
87	Phenylaceticacid	organique	-	76,7	102	30,6	140	4941	[45] ,[44]
88	Thiosinamine	organique	-	77	140	47,32	340	8742	[45] ,[44]
89	Bromated cam- phor	organique	-	77	174	70,03	-	-	[45]
90	Benzylamine	organique	-	78	174	47,41	150	3103	[45] ,[44]
91	Propionamide	organique	-	79	168	48,62	1700	36428	[45] ,[44]
92	Nitroisobutylgly- col	organique	-	79	201	73,64	-	-	[45]
93	Durene	organique	-	79,3	156	36,31	-	-	[45]
94	Trimethyloletha-ne	organique	-	81	192	65,06	200	3750	[45] ,[44]

95	Methylbromo- benzoate	organique	-	81	126	59,115	250	7142	[45] ,[41]
96	Acetamide	organique	-	81	241	77,58	98	1463	[45] ,[44]
97	Naphtalene	organique	-	82	148	47,07	67	1629	[45] ,[42]
98	Monoaminope- ntaerythritol	organique	-	86	192	-	1800	33750	[45] ,[43]
99	Dimethytartrate	organique	-	87	147	53,08	300	7346	[45] ,[44]
100	EthylLithium	organique	-	95	389	93,14	1400	12956	[45] ,[44]
129	Xylitol	saccharidesou polyolsorgan ique	-	93	248	104,71	380	5516	[45] ,[44]
145	Mg(NO ₃) ₃ .6H ₂ O +Al(NO ₃) ₂ .9H ₂ O	eutectique	53+47	61	148	76,05	-	-	[45]
146	Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O +MgBr ₂ .6H ₂ O	eutectique	59+41	66	168	-	-	-	[45]
147	LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃	eutectique	25+65+10	80,5	113	-	-	-	[45]
148	LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + KNO ₃	eutectique	26,4 +58,7+14,9	81,5	116	-	-	-	[45]
149	LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NH ₄ Cl	eutectique	27+68+5	81,6	108	-	-	-	[45]
156	CH ₃ CONH ₂ +C ₁ 7H ₃ 5COOH	eutectique	50+50	65	218	-	-	-	[45]
157	Naphthalene+benz oicacid	eutectique	67,1+32,9	67	123,4	-	-	-	[45]
158	LiNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	eutectique	14+86	72	180	80,5	-	-	[45]
159	Ca(NO ₃) ₂ + Zn(NO ₃) ₂ .H ₂ O	eutectique	3,7+88,7 +7,6	74,8	-	-	-	-	[45]
160	NH ₂ CONH ₂ +NH 4Br	eutectique	66,6+33,4	76	161	69,23	-	-	[45]
161	LiNO ₃ +LiCl+Li Cl.H ₂ O	eutectique	40,3+25,1 +34,6	78,8	161	-	-	-	[45]
162	LiNO ₃ + NH ₄ NO ₃ + NaNO ₃	eutectique	25+65+ 10	80,5	113	60,95	-	-	[45]

163	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	eutectique	8,2+53,6 +38,2	87,5	-	-	-	-	[45]
164	AlCl ₃ + NaCl +KCl	eutectique	60+26+ 14	93	213	137,79	-	-	[45]
165	AlCl ₃ +NaCl	eutectique	66+34	93	201	132,49	-	-	[45]

III.3.1.7.La gamme 100-175 C

Table(3.8) Enthalpie massique et température de fusion des MCP dans la gamme de 100-175C

N	Nom du MCP	Nature du MCP	Composit ion[% ma ssique]	T fusion[C]	chaleur de fusion kJ/kg	Enthalpi e volumiq e (solide)[kWh/m ³]	prix \$/Kg	[\$/kWh]	ref
41	CalciumBro- midetetrahy- drate	Inorganique	-	110	-	-	320	320	[45] ,[44]
42	LithiumHy- droxidemono- hydrate	Inorganique	-	112	350	146,8	6000	6000	[45] ,[44]
43	Aluminum Sulfatehexade- cahydrate	Inorganique	-	112	201	151,30	40	40	[45] ,[42]
44	Magnesium Chloride hexa- hydrate	Inorganique	-	116,7	169	73,7	120	120	[45] ,[44]
45	Ammonium Zinc Sulfate hexahydrate	Inorganique		125	257	137,8	49	49	[45] ,[44]
46	MagnesiumNi- tratedehydrate	Inorganique	-	130	-	-	1	1	[45] ,[41]

47	SodiumAcetatet rihydrate	Inorganique	-	137	172	69,27	80	80	[45] ,[44]
103	p-Xylenedichlo- ride	Organique	-	100	139	54,711	700	700	[45] ,[42]
104	Oxalicaciddi- hydrate	Organique	-	100	370	169,89	100	100	[45] ,[41]
105	Dimethylfuma- rate	Organique	-	102	243	92,475	660	660	[45] ,[43]
106	Pyrocatechol	Organique	-	104	207	77,28	200	200	[45] ,[43]
107	Heptacontane	Organique	-	106	281	65,254	121	121	[45] ,[44]
108	Azelaicacid	Organique	-	106,9	174	59,20	1700	1700	[45] ,[44]
109	Octadecanamide	Organique	-	107	212	51,11	3	3	[45] ,[41]
110	Resorcinol	Organique	-	110	190	67,55	700	700	[45] ,[42]
111	Cross- Linked LD- Polyethylene	Organique	-	110	125	31,944	-	-	[45]
112	Quinone	Organique	-	115	171	62,605	180	180	[45] ,[44]
113	Hectane	Organique	-	115	285	-	-	-	[45]
114	Acetanilide	Organique	-	115	152	51,46	11200	11200	[45] ,[44]
115	Ammoniumfor- mate	Organique	-	116	-	-	1000	1000	[45] ,[41]
116	Succinic acid anhydride	Organique	-	119	204	88,4	1000	1000	[45] ,[41]
117	ValproicAcid	Organique	-	120	203	50,97	4	4	[45] ,[41]
118	Benzoicacid	Organique	-	121,7	143	50,28	124	124	[45] ,[44]
119	Tris(Hydroxy- methyl)AceticA cid	Organique	-	124,4	205	83,594	479,6 4	479,64	[45] ,[44]
120	Cross- Linked HD- Polyethylene	Organique	-	125	167	43,66	2	2	[45] ,[41]
121	Stilbene	Organique	-	126	167	44,99	1200	1200	[45] ,[42]
122	Benzamide	Organique	-	127,2	169	62,95	460	460	[45] ,[44]
123	DL-Malicacid	Organique	-	130	225	100,06	400	400	[45] ,[44]

124	Tromethamine	Organique	-	131	285	107,11	800	800	[45], [42]
125	Phtalic Anhydride	Organique	-	131	159	65,36	212	212	[45], [44]
126	Urea	Organique	-	132	251	92,24	100	100	[45], [44]
127	Sebacic acid	Organique	-	132	228	76,57	200	200	[45], [42]
128	Phenacetin	Organique	-	134	175	60,27	150	150	[45], [43]
132	L-Arabinitol	saccharidesoupolysorganique	-	101	230	97,43	11000	11000	[45], [44]
133	Ribitol	saccharidesoupolysorganique	-	101	248	105,05	6000	6000	[45], [42]
134	D-Fructose	saccharidesoupolysorganique	-	103	180	80	95	95	[45], [44]
135	D-Arabinitol	saccharidesoupolysorganique	-	106,3	256	108,4	9003	9003	[45], [41]
136	Erythritol	saccharidesoupolysorganique	-	118	337	138,54	3000	3000	[45], [41]
137	Ranose	saccharidesoupolysorganique	-	119	-	-	2500	2500	[45], [41]
138	Isomaltulose monohydrate	saccharidesoupolysorganique	-	122	-	-	-	-	[45]
167	LiNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ + Mg(NO ₃) ₂ .2H ₂ O	Eutectique	114,09,1 + 74,9+16	114	-	-	-	-	[45]
168	LiNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ . 2H ₂ O	Eutectique	8,93 73,29 17,78	114,8	-	-	-	-	[45]
169	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ + Mg(NO ₃) ₂ . 2H ₂ O	Eutectique	10,6+73,6 +15,8	115	-	-	-	-	[45]
170	NaNO ₃ + Mg(NO ₃) ₂ . 2H ₂ O	Eutectique	10,9+71,9 +17,2	116	-	-	-	-	[45]

171	LiNO ₃ NaNO ₃ KNO ₃	+	Eutectique	30+18+ 52	120	-	-	-	-	[45]
172	LiNO ₃ +KNO ₃		Eutectique	33+67	125	170	103,84	-	-	
173	LiNO ₃ CO(NH ₂) ₂	+	Eutectique	38,2+61, 8	125	-	-	-	-	[45]
174	Bi+Pb		Eutectique	55,5+44, 5	125	-	-	-	-	[45]
175	Ca(NO ₃) ₂ NaNO ₃ KNO ₃	+	Eutectique	42+15+ 43	140	-	-	-	-	[45]
176	NaNO ₂ NaNO ₃ KNO ₃	+	Eutectique	40+ 7 + 53	142	-	-	-	-	[45]

III.3.1.8. Analyse des tableaux :

Nous choisissons le matériau qui emmagasine la chaleur à travers la température de fusion et Enthalpie massique.

Ainsi, avec ces résultats, le matériau idéal dans la gamme 5-15 C° pour le stockage est le matériau N° 1 du tableau, Parce qu'il a la plus grande chaleur de fusion de cette gamme.

Par contre le matériau N° 150 possède la chaleur de fusion la plus faible.

Nous complétons le reste des matériaux en deux tableaux où la première table qui a la plus grande température de fusion et la plus grande chaleur de fusion .Le deuxième tableau représente les substances qui ont la température de fusion la plus basse et la chaleur de fusion la plus basse.

Table(3.9) matériaux à chaleur de fusion élevée

N	Nom du MCP	Nature du MCP	T fusion[C]	chaleur de fusion kJ/kg	Les gammes de températures C°
1	LiClO ₃ .3H ₂ O	inorganique	8,1	253	5-15
9	LiNO ₃ .3H ₂ O	inorganique	30	296	20-35
56	ParanC18	organique	28	244	25-30
17	Na ₂ HPO ₄ .7H ₂ O	inorganique	48	281	40-60

21	Na(CH ₃ COO).3H ₂ O	inorganique	58	226	55-70
31	StrontiumHydroxi deoctahydrate	inorganique	89	370	60-65
104	Oxalicaciddi-hydrate	organique	100	370	100-175

Tableau(3.10) matériaux à faible chaleur de fusion

N	Nom du MCP	Nature du MCP	T fusion[C]	chaleur de fusionkJ/kg	Les gammes de températures C°
2	ZnCl ₂ .3H ₂ O	inorganique	10	-	5-15
3	K ₂ HPO ₄ .6H ₂ O	inorganique	13	-	5-15
78	Octadecylthio-glycate	inorganique	26	90	20-35/25-30
13	K(CH ₃ COO).3/2H ₂ O	inorganique	42	-	40-60
19	Zn(NO ₃) ₂ .2H ₂ O	inorganique	54	-	55-70
23	Fe(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	inorganique	60	-	60-65
67	CalciumBro-midetetrahy-drate	inorganique	110	-	100-175

Conclusion :

On peut remarquer dans ce chapitre que les matériaux MCP présentent des capacités de stockage de l'énergie thermique meilleures que ceux des matériaux à stockage de chaleur sensible.

Chapitre IV

Partie expérimentale

IV.1. introduction :

Le but principal du travail expérimental est de déterminer les coefficients volumétriques de transfert de chaleur entre la matière du lit fixe et l'air qui le traverse habituellement de bas vers le haut. Après considération de plusieurs matériaux possibles, notre choix était d'utiliser les billes de verre vu leurs disponibilités locale.

IV.2. principe de travail

Pour les lits utilisant l'air comme fluide caloporteur, la disposition des pierres les unes sur les autres de façon à obtenir un milieu poreux de porosité uniforme (porosité normale) a deux avantages essentiels : le premier consiste en l'absence des centres denses et des cheminées et par conséquent une mise en jeu d'une grande surface de contact avec l'air engendrant ainsi des trajectoires tortueuses permettant un gain en taux de transfert de la chaleur. Donc le coefficient du transfert de la chaleur entre l'air et la matière du lit est important ; le second est le coût modéré de la matière du lit et la reproductibilité de celui-ci à tout instant.

La Figure IV.1 représente un schéma général de l'installation et se compose de trois parties : le ventilateur, le circuit de chauffage-refroidissement et le lit. L'entrée immédiate du ventilateur a été connectée avec deux conduites par l'intermédiaire de deux valves V_1 et V_2 . Les valves V_1 , V_2 ont été montées à l'entrée des conduites de chauffage et de refroidissement respectivement afin de maintenir leurs débits constants. L'air traverse une boîte contenant les appareils de chauffage vers la base de la colonne. Une dérivation est prévue à l'entrée de la colonne en contact direct avec l'atmosphère du laboratoire pour ajuster la température d'entrée de l'air chaud avant son passage à travers le lit. Un orifice mètre a été installé dans chaque conduite. Ceux-ci ont été étalonnés afin de déterminer le débit de l'air à la base du lit.

Le lit est constitué d'une colonne cylindrique verticale en Plexiglas de dimension 0.107×0.665 m. La paroi du lit est de 5 mm d'épaisseur, et est isolée du milieu extérieur par une couche de laine de verre de 100 mm d'épaisseur. Le lit repose sur des joints adaptateurs éliminant les pertes transversales de l'air vers le milieu extérieur, et limitant les transferts thermiques par conduction.

La colonne pourrait être remplie à la hauteur désirée par les billes de verre ayant une forme presque sphérique de diamètre moyen de 15 mm, de chaleur spécifique égale à

837kJ/kg.k et de densité 2710kg/m³. La porosité du lit a été mesurée après divers remplissage et la valeur moyenne obtenue est de 0.45.

Les mesures de température sont assurées par l'intermédiaire de thermocouples Chrome Nickel-Nickel (CrNi-Ni). L'un des thermocouples est situé à l'entrée du lit, le deuxième à la sortie et le troisième à la sortie de la dérivation. Les thermocouples sont connectés à la fois à un afficheur digital de température et à un enregistreur de températures en fonction du temps au cours des processus de chauffage et de refroidissement du lit.

L'étude des transferts thermiques dans le lit fixe consiste à mesurer les températures de sorties en fonction du temps pour les différentes hauteurs du lit et ceci en l'absence de réaction et pour différentes valeurs de la température d'entrée et du débit de fluide pour les deux cycles (chauffage et refroidissement).

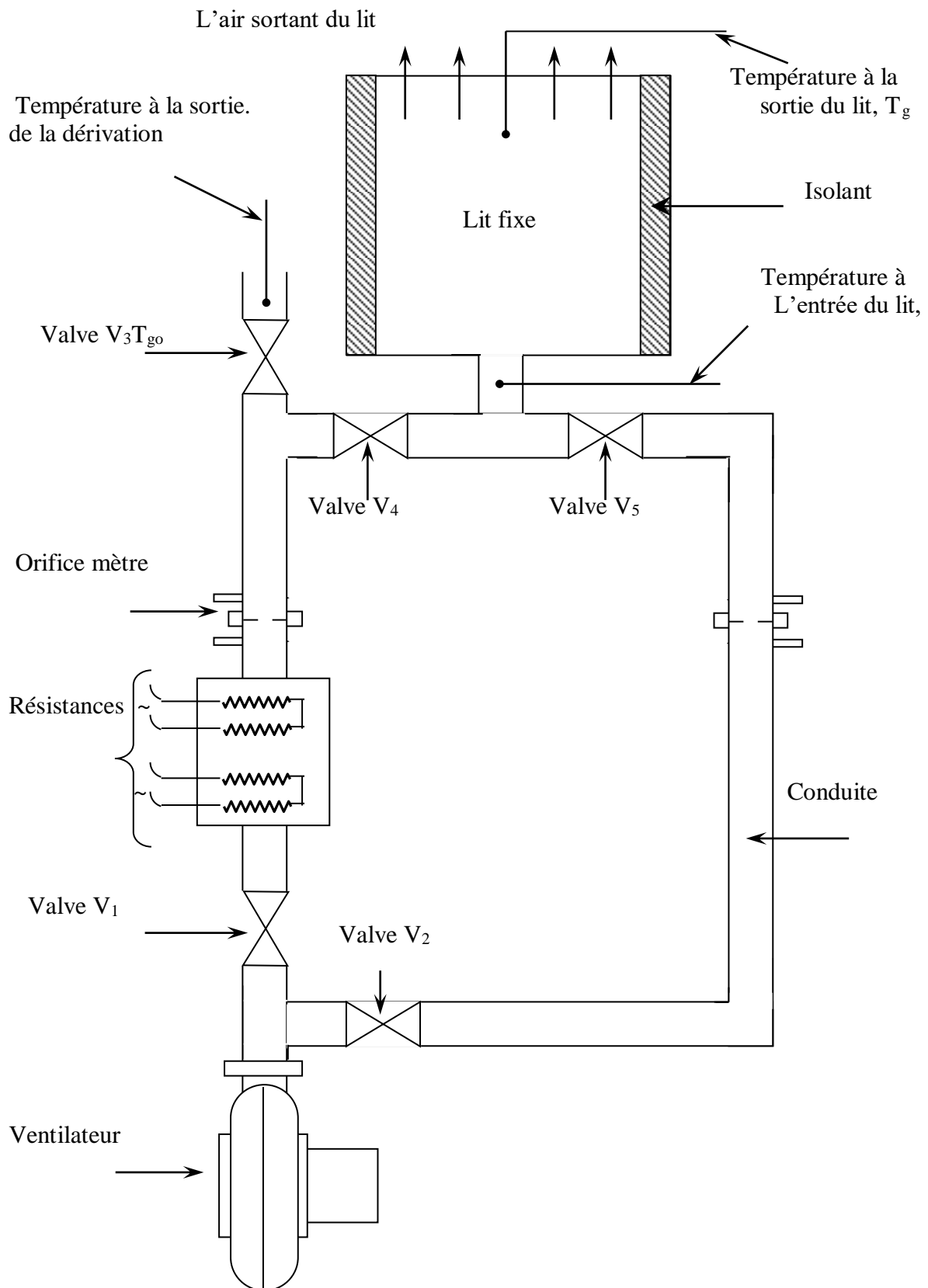
On remplit la colonne par les billes de verre à une hauteur désirée. Le ventilateur et les appareils de chauffage sont mis en marche et réglés pour donner le débit et la température voulus de l'air à l'entrée du lit : à ce moment le chauffage commence. Les températures d'entrée et de sortie de l'air sont enregistrées en fonction du temps. Lorsque la température à la sortie du lit se rapproche de celle de l'entrée, l'expérience de chauffage est terminée.

A ce moment là, le débit d'air ambiant désiré circule dans le lit chaud à travers la conduite de refroidissement. Après ces étapes, le refroidissement du lit commence. On applique la même procédure utilisée pendant le chauffage pour mesurer les températures d'entrée et de sortie. Mentionnons à ce stade qu'il n'a pas été possible de choisir et contrôler la température de refroidissement car elle dépend des conditions ambiantes.

Tableau IV.1 : Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C

[37]

Matériaux	Densité (Kg/m³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique Volumétrique (J/m³ K)
Verrebille de les	2710	837	2.27



Figure(4.1) Schéma simplifié de l'installation

IV.3. Calibrage de l'orifice mètre:

L'orifice mètre est constitué d'une plaque circulaire de tôle mince de 3 mm d'épaisseur, percée d'un orifice circulaire de 0.02 m de diamètre dont le centre est sur l'axe de la conduite qui mène l'air au lit (Figure 1.1). Un manomètre différentiel (tube en U) verticalement placé pour mesurer la chute de pression à travers la plaque à l'aide de deux prises de pression montées en amont et en aval de la plaque de l'orifice. L'orifice mètre est utilisé pour déterminer le débit de l'air à la base du lit. Un thermo-anémomètre est utilisé pour mesurer le débit de l'air à la base du lit.

Le thermo-anémomètre à fil chaud est un dispositif permettant de mesurer la vitesse en un point donné dans un fluide. Il peut être utilisé pour une large gamme de vitesses de 0 à 20 (m/s) avec une précision (± 0.5 m/s, +5 % V). La sonde est connectée à l'appareil à l'aide d'un câble de 1.5 m, et est composé d'un fil mince placé sur un support mécanique fixe. Cette sonde est introduite dans l'écoulement et le fil qui constitue le capteur est chauffé par un courant électrique à une température supérieure à celle du fluide. L'écoulement du fluide, de vitesse, v , refroidit le capteur par convection, faisant varier la résistance du capteur. Cette variation dépend de la puissance électrique dissipée sous forme de chaleur et de vitesse de fluide à mesurer.

Pour mesurer la vitesse et la température de l'air, la sonde du thermo-anémomètre est placée en différents points sur une section de 60 mm de diamètre à la fin de la conduite qui mène à la base du lit. La valeur correspondante de la différence de niveaux indiquant la chute de pression à travers la plaque de l'orifice est notée. Une valeur moyenne a été obtenue pour la vitesse d'air pour la valeur correspondante de ΔH , indiquée par le manomètre.

On maintient la température de l'air constante, faisant varier la vitesse de l'air à l'aide de la valve placée au début de la conduite ; on note pour chaque vissée in différence de niveaux dans le manomètre correspondante. Cette procédure a été reproduite pour une série de températures.

On représente graphiquement la valeur moyenne de la vitesse, v_o , en fonction de la racine carrée de la différence de niveaux, $\sqrt{\Delta H}$, pour les différentes températures .

Les data montrent une proportionnalité linéaire de V_o et $\sqrt{\Delta H}$, pour toutes températures utilisées. ce qui nous permet d'écrire, v_o

IV.4. Les appareille et accessoires :



Figure(4.3) Banc d'essai de stockage de l'énergie thermique



Figure (4.4) thermocouple

IV.4.1. Un thermocouple:

Ou couple thermoélectrique (CTE), est, en physique, un couple de matériaux dont l'effet Seebeck, découvert en 1821 par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck, est utilisé pour la mesure de la température. Ils sont bon marché et permettent la mesure dans une grande gamme de températures. La principale limite est la précision obtenue. Il est relativement difficile d'obtenir des mesures avec une incertitude inférieure à $0,1\text{ °C}$ [49].



Figure (4.5) Anémomètre à hélice (testo 416)

IV.4.2. Le testo 416 :

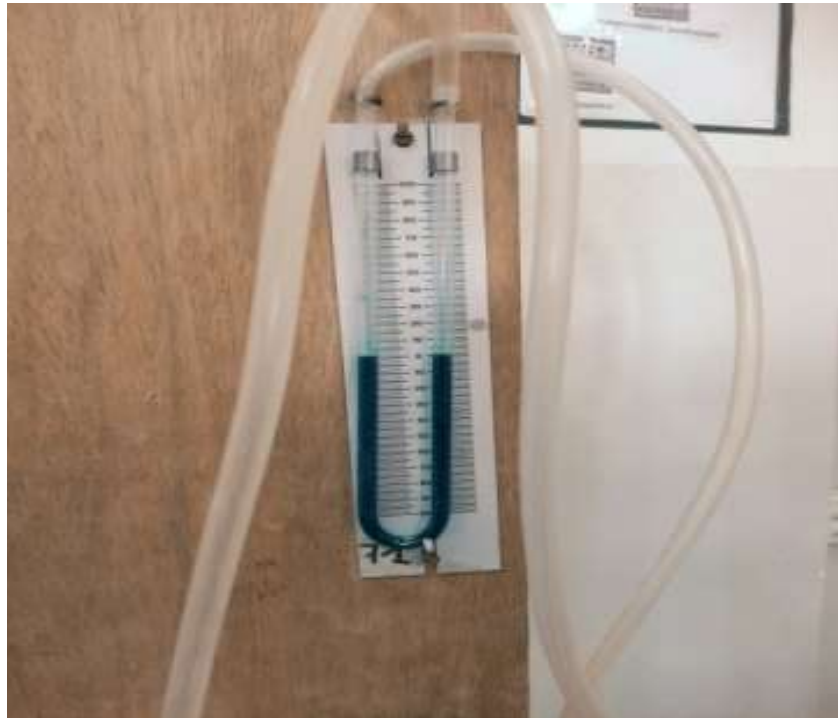
est un anémomètre à petites palettes facile à utiliser avec une sonde à palettes attachée sur une poignée télescopique pour mesurer dans les conduits d'air. Cet anémomètre à palettes numérique portatif vous permet de basculer rapidement entre les mesures de débit et de vitesse [46].



Figure(4.6)la densimètre

IV.4.3.Un densimètre électronique :

C'est un appareil de laboratoire de type détecteur de densité capable de faire des mesures de densité sur des liquides ou des gaz. Il permet de déterminer rapidement des concentrations quand les tables de conversion densité/concentration existent ou tout simplement connaître le rapport masse/volume d'une substance à une température de référence [49].



Figure(4.7) manomètre (mesure de pression)

IV.4.4. Un manomètre:

C'est un dispositif pour mesurer les pressions. Un manomètre simple commun se compose d'un tube en forme de U de verre rempli de liquide. Généralement, le liquide est du .mercure en raison de sa haute densité [48].



Figure(4.8) les bille de verre

IV.4.5.Les billes en verre :

Elles sont polies, transparentes, de forme sphérique, solides pour une utilisation générale en laboratoire.

Les billes en verre ont une excellente résistance aux produits chimiques et sont utilisées comme billes de mélange, pierre d'évaporation comme remplissage de colonnes de distillation [47].



Figure (4.9) transformateur variable

IV.4.6. Transformateur variable :

Est un appareil qui permet de mesurer la tension (ou différence de potentiel électrique) entre deux points, grandeur dont l'unité de mesure est le volt (V)¹. Le plus souvent, il peut mesurer des tensions continues et alternatives. La grande majorité des appareils de mesure actuels est construite autour d'un voltmètre numérique, la grandeur physique à mesurer étant convertie en tension à l'aide d'un capteur approprié. C'est le cas du multimètre numérique qui, en plus d'offrir la fonction voltmètre, comporte au moins un convertisseur courant tension permettant de le faire fonctionner en ampèremètre et un générateur de courant constant pour fonctionner en ohmmètre [48].



Figure (4.10) lit fixe

IV.4.7.Lit fixe :

Le dispositif catalytique à lit fixe est également appelé réacteur à lit plein. Réacteur catalytique rempli de catalyseurs solides ou de réactifs solides pour obtenir un processus de réaction hétérogène. Les solides sont généralement sous forme de granulés, avec une taille de particule d'environ 2-15mm, et s'empilent dans un lit avec une certaine hauteur (ou épaisseur). Le lit est immobile, et le fluide passe à travers le lit pour réagir. La différence entre elle et le réacteur à lit fluidisé et le réacteur à lit mobile est que les particules solides sont dans un état statique. Les réacteurs à lit fixe sont principalement utilisés pour réaliser des réactions catalytiques en phase gazeuse-solide, telles que les tours de synthèse de l'ammoniac, les oxydants en contact avec le dioxyde de soufre et les réformateurs à vapeur d'hydrocarbures. Lorsqu'il est utilisé en phase gazeuse-solide ou en phase liquide-solide non catalytique, le lit est rempli de réactifs solides. Un réacteur à lit d'eau peut également être classé comme un réacteur à lit fixe, dans lequel la phase gazeuse et la phase liquide descendent à travers le lit en parallèle, dans un contact phase solide gaz-liquide [48].

Chapitre V

Résultats

V.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux obtenus sous formes de tableaux et de graphes. Tous les graphes sont tracés par le logiciel origine 6. Les corrélations de ces résultats sont aussi présentées.

V.2. Calibrage de l'orifice mètre :

T'ablue (5.1). Calibrage de l'orifice mètre pour T=312 K (chauffage) :

V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	V5 (m/s)	V_{moy} (m/s)	ΔH (m)	$\sqrt{\Delta H}$
1.2	1.1	1.2	1.3	1.3	1.22	0.8	0.89
0.7	0.7	0.8	0.7	0.7	0.72	0.3	0.54
1	0.8	0.9	1	1.1	0.98	0.5	0.70
1.1	0.9	1.1	1	1.2	1.12	0.7	0.83
1.2	1.2	1.1	1.1	1.3	1.18	0.8	0.89

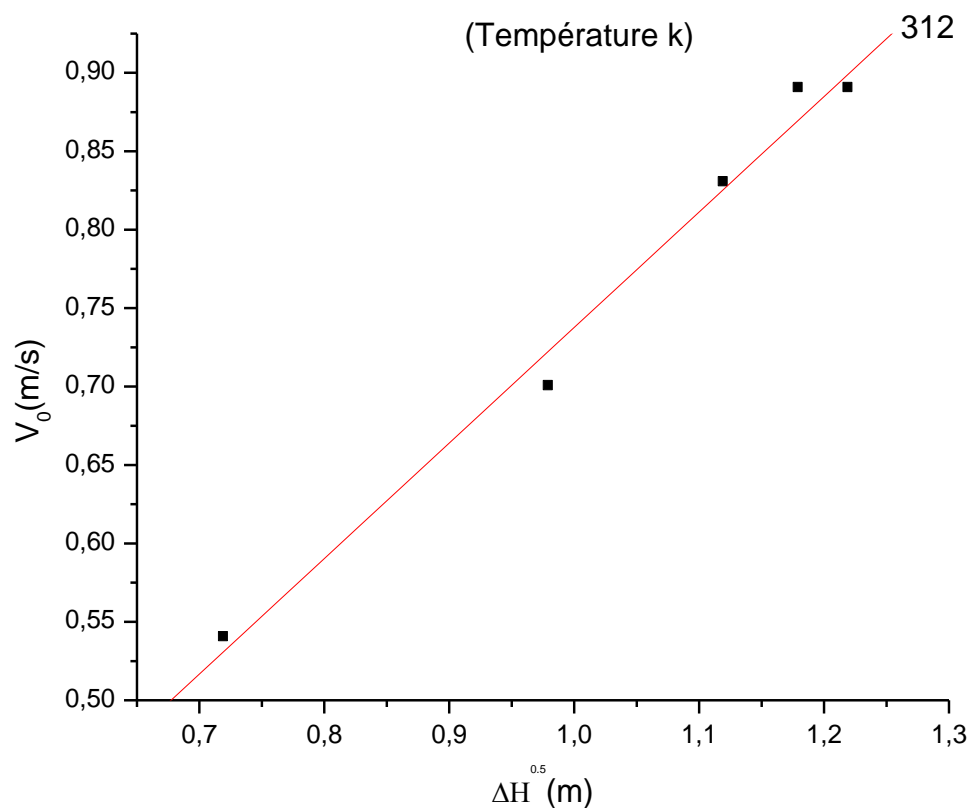


Figure (5.1) Calibrage de l'orifice mètre de chauffage.

Tableau (5.2). Calibrage de l’orifice mètre pour T=296 K (Refroidissement) :

V1 (m/s)	V2 (m/s)	V3 (m/s)	V4 (m/s)	V5 (m/s)	V_{moy} (m/s)	ΔH (m)	$\sqrt{\Delta H}$
1.1	0.9	0.9	0.9	1	0.96	0.2	0.44
0.2	1.3	1.6	0.6	1.5	1.36	0.3	0.54
1.6	1.6	1.8	1.8	1.4	1.54	0.7	0.89
1.7	1.5	1.7	1.7	1.7	1.62	0.7	0.86
1.8	1.5	1.7	1.7	1.7	1.64	0.8	0.89

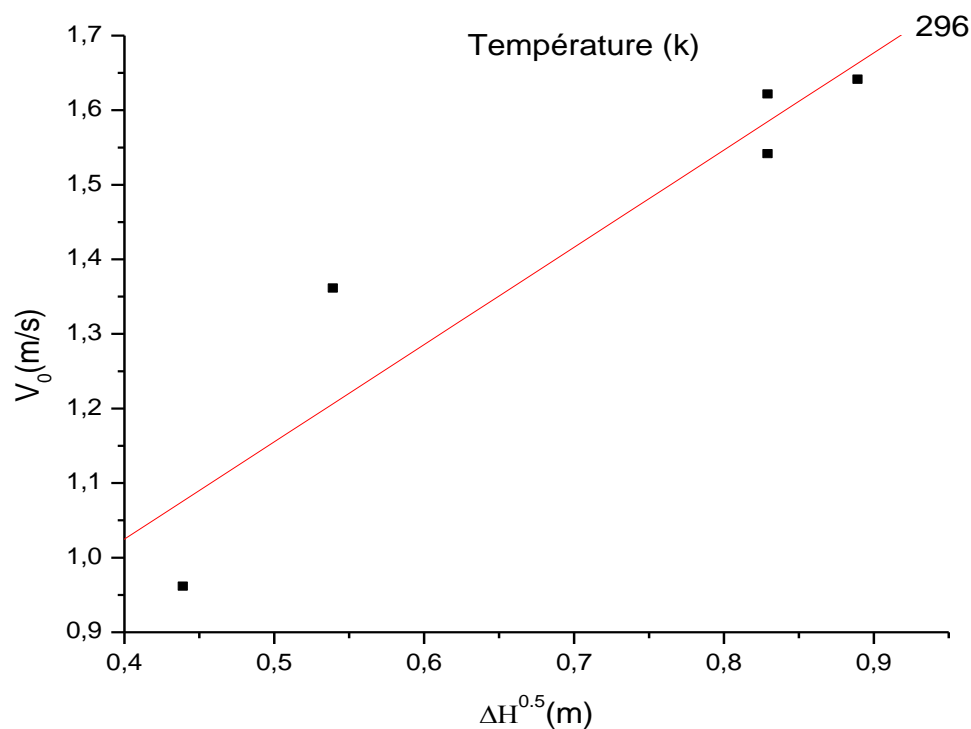


Figure (5.2) Calibrage de l’orifice mètre de refroidissement.

V.3.Courbe de chauffage et refroidissement :

Utilisant les données expérimentales, on trace pour chaque expérience la variation de $(Tg-Ts_0)/(Tg_0-Ts_0)$(5.1) en fonction du temps dans une échelle semi-logarithmique.

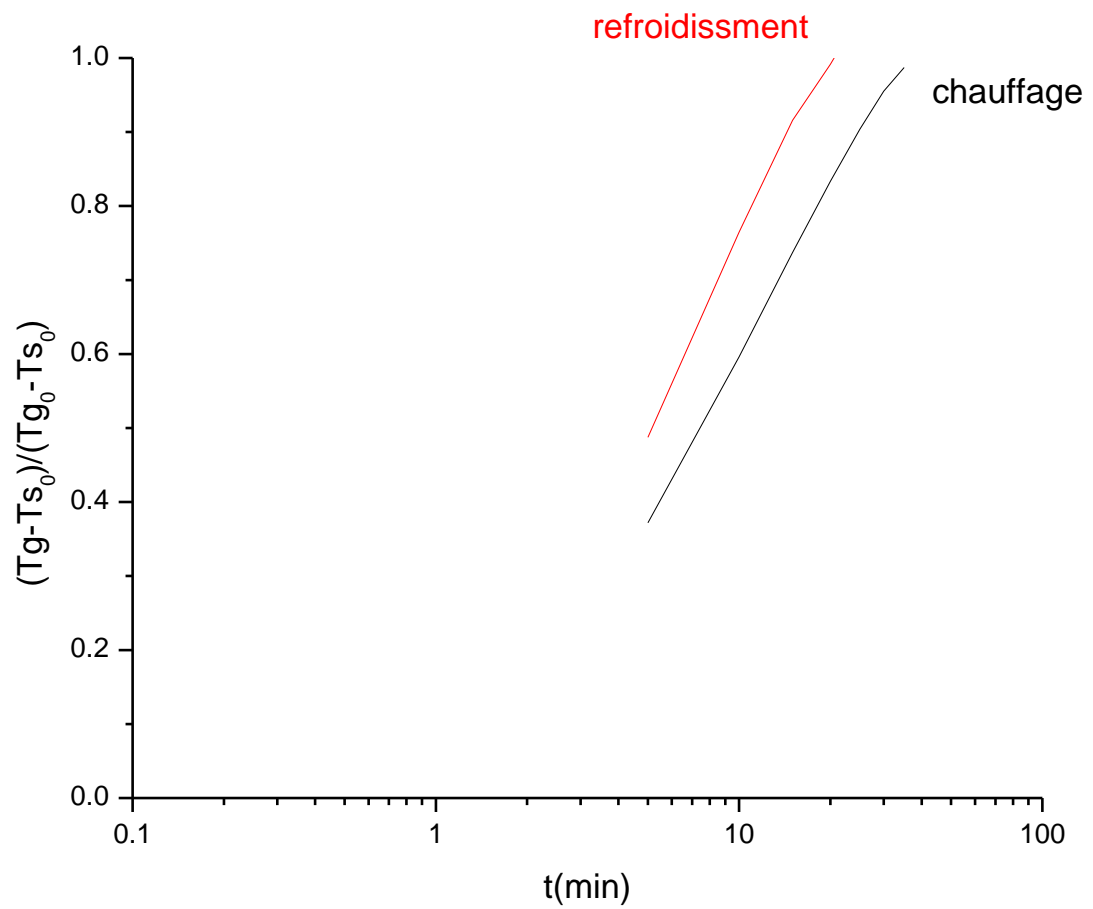


Figure (5.3) Variation de la température de sortie du lit avec le temps de bille de verre ($T = 39^\circ\text{C}$).

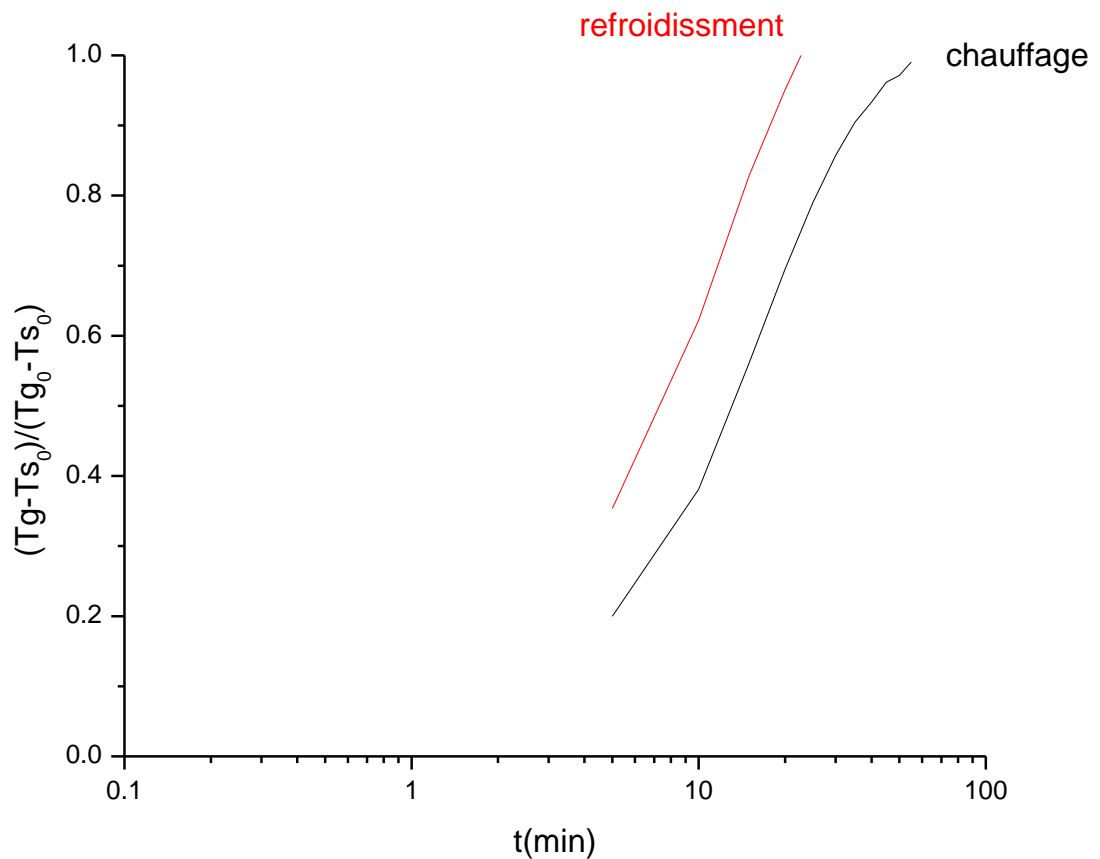


Figure (5.4) La variation de la température de sortie du lit avec le temps de bille de verre ($T=35C^\circ$).

Le graphe obtenu est comparé avec les courbes théoriques de Schumann pour obtenir le paramètre y , puis on calcul le coefficient de transfert de la chaleur, h , à partir de l'équation,

$$y = h L / C_g G \dots\dots\dots(5.2)[50].$$

Au cours de la comparaison des courbes, plus d'importance a été donnée à la pente de la courbe au début et à la fin de ces courbes.

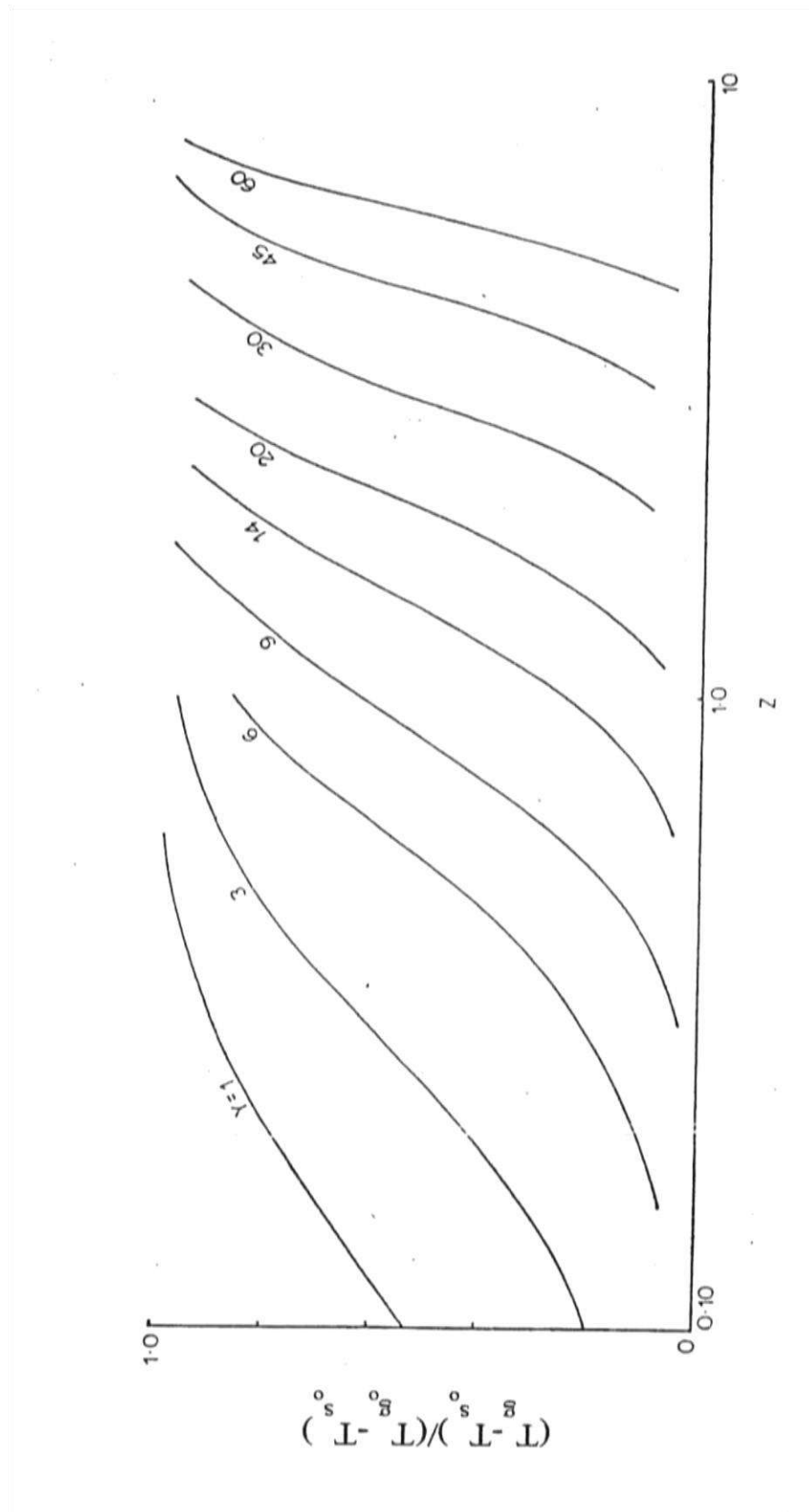


Figure (5.5) courbes typiques de Schumann étendues par Furnes[50].

V.4. Résultats de coefficient de bille de verre :

Tableau (5.3) Tableau de résultats de bille de verre pour L=0.240 (chauffage) .

N°	G (kg/m ² .s)	Tg _o (K)	Ts _o (K)	h (kW/m ³ .k)	Y
1	0.434	312	302.2	36.339	20
2	0.256	312	305.7	21.448	20
3	0.349	312	307.9	29.197	20
4	0.399	312	309.4	33.366	20
5	0.420	312	310.5	35.149	20
6	0.434	308	299.6	54.411	30
7	0.256	308	301.5	32.109	30
8	0.349	308	303.4	43.796	30
9	0.399	308	304.8	49.949	30
10	0.420	308	305.8	52.620	30

Tableau (5.4) Tableau de résultats de bille de verre pour L=0.240 (refroidissement).

N°	G (kg/m ² .s)	Tg _o (K)	Ts _o (K)	h (kw/m ³ .k)	y
1	0.360	305.2	306	45.21	30
2	0.509	302.9	302.7	64.062	30
3	0.577	301.3	300.9	72.535	30
4	0.607	300.3	299.2	76.310	30
5	0.614	299.6	298.8	77.246	30
6	0.360	302.6	305	67.696	45
7	0.509	301.3	302.8	95.903	45
8	0.577	300.4	301.1	108.596	45
9	0.607	299.8	300.1	114.237	45
10	0.614	299.3	299.4	115.648	45

Remarque :

Pour calculer la quantité de chaleur emmagasinée dans les matériaux de stockage thermique bille de verre (Q) il faut calculer coefficient de transfert de chaleur globale

" h " qui est :

$$h = KG^n \dots\dots\dots (5.3)[50].$$

K : constant

Les data sont insuffisants pour permettre le calcul de h avec corrélation.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le stockage de chaleur par changement de phase (MCP) des matériaux est le procédé le plus utilisé ces dernières années. Dans ce mémoire, nous avons essayé faire une étude comparative du stockage de la chaleur sensible et latente pour plusieurs matériaux avec des intervalles de température différents.

La comparaison est effectuée selon des critères bien définis : chaleur de fusion et température de fusion de chaque matériau.

Matériaux à chaleur de fusion élevée :

- $\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{LiNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.
- ParanC18.
- $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.
- Strontium Hydroxide octahydrate.
- Oxalic acid dihydrate.

Matériaux à faible chaleur de fusion :

- $\text{ZnCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.
- Octadecylthio-glycolate.
- $\text{K}(\text{CH}_3\text{COO})_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.
- Calcium Bromide tetrahydrate.

Référence

Référence:

[1] GUERRAICHE Djemaa ,thèse doctorat, Contribution à l'étude des Transferts Thermiques lors de la Solidification d'un Liquide dans un Capteur Solaire thèse doctorat , Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd 2020 p6.

[2] Adrien LOMONACO, thèse doctorat, STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR MATÉRIAUX À CHANGEMENTS DE PHASE ADAPTÉ AUX CENTRALES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES , de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour ,le 22 septembre 2015,p[25-26].

[3] LAGHZAOU (Amine) et PEERHOSSAINI (Donia), ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE STOCKAGE DE CHALEUR : ENERGIE SOLAIRE ET AUTRES APPLICATIONS (HEAT STORAGE: SOLAR ENERGY AND OTHER APPLICATIONS), ECOLE DES MINES DE DOUAI, ,2009/2010.p15.

[4] Khaoussou BAKHOUM ,Diplôme d'Ingénieur de Conception Titre: ETUDE D'UN SYSTEME DE STOCKAGE ET DE-DESTOCKAGE DE CHALEUR A CHALEUR LATENTE DEFUSION: application à la cuisinière solaire ,2004/2005.p4

[5] Akrouche Amina Diplôme de magister, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase, , Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdes Faculté des Sciences de l'Ingénieur , le 29 Octobre 2011.p [13-14]

[6] Matthieu Martinelli, Stockage d'énergie thermique par changement de phase application aux réseaux de chaleur, Thèse de doctorat, Université grenoble alpes, 05 décembre 2016.p134.

[7] Adèle Soupart-Caron (Soupart). Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. PhDthesis, 2015. Thèse de doctorat dirigée par Marty, Philippe et Fourmigue_, Jean-Franc_ois Mécanique des _uides, procédés, énergétique Grenoble Alpes 2015.

[8] Maha A., 2004. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Ph. D. thesis, Université Joseph Fourier – Grenoble 1.

Référence

- [9] J.K. Kissock, J.M. Hannig, T.I. Whitney, and M.L. Drake. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. part 1_concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 2010.
- [10] Marie Duquesne. Resolution and reduction of a non-linear energy storage model by adsorption on zeolites. Theses, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, January 2013.
- [11] David Verdier-Gordias, Stockage thermique de protection à chaleur latente intégré à un récepteur solaire à air pressurisé Soutenu le 29 Janvier 2016 .
- [12] Pinel P., Cruickshank C.A., Beausoleil-Morrison I., Wills A., A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3341-3359, 2011.
- [13] LOUAZENE Abderrahmane et BOUHNİK Abdallah MASTER ACADEMIQUE, Etude Numérique d'une Cheminée Solaire à MCP Intégré Destinée à la Ventilation d'un Séchoir Solaire, Faculté des Sciences Appliquées Le: 25/05/2017 p3.
- [14] A. Felix Regin, S.C. Solanki, and J.S. Saini. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using pcm capsules : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9) :2438_2458, 2008
- [15] Siad Redouane et Djouhri Sliman MASTER ACADEMIQUE Amélioration de l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air avec système de stockage d'énergie thermique, Faculté des Sciences Appliquées 15/06/2021 p12
- [16] J.K. Kissock, J.M. Hannig, T.I. Whitney, and M.L. Drake. Early results from testing phase change wallboard, *Phase Change Materials and Chemical Reactions for Thermal Energy Storage*. The International Energy Agency, 2011.

Référence

- [17] Cabeza.L.F., Advances in Thermal Energy Storage Systems 1st Edition, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [18] AMIRAT Sofiane et MOUHOUBI Abdelfattah, MASTER ACADEMIQUE, Etude comparative des différents matériaux a changement de phase pour le stockage thermique, Faculté des Sciences Appliquées le / 06 / 2016 p [15 ,30-48].
- [19] Maha AHMAD. Couplage materiaux a changement de phase super isolation apports solaires. PhDthesis, Université JOSEPH FOURIER, 2004.
- [20] GUEZEI Abbassi Diplôme de Master Académique, Etude numérique des transferts de chaleur et de masse lors de la fusion d'un matériau à changement de phase, Université Mohamed Larbi Ben M'hidi 2017/2018 p [27-28]
- [21] Ango, S.E., Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment: développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. 2011, Arts et Métiers ParisTech.
- [22] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: Heat storage materials and techniques, Energy research, Vol. 39(11), pp. 1127 – 1138, 1997.
- [23] B. Zalba, J.M. Marin, L.F. Cabeza, H. Melhing, Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 251 – 283, 2003.
- [24] A.M. Khudhair et M.M. Farid, A review on energy conservation in building. Applications with thermal storage by latent heat using phase change materials, Energy conversion and management, Vol. 45 , pp. 263 – 275, 2004.
- [25] Ahmad, M., "Nouveaux Composants Actifs pour la Gestion Energetique de L'Enveloppe Legere des Batiments," Ph.D. Thesis, Universite Joseph Fourier, Nov. 2004.
- [26] [Tyagi, 2006] Vineet Veer Tyagi and D. Buddhi, PCM thermal storage in buildings: a state of art, Renewable and Sustainable Energy Reviews, in press.
- [27] [Principi, 2005] Paolo Principi, Roberto Fioretti, PCM (Phase Change Materials) : A state of the art, IEA – ECBCS – ANNEX 44 November 2005. tel-00217686

Référence

- [28] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman, Latent heat storage in concrete. II, Solar energy materials, Vol. 21, pp. 61 – 80, 1990.
- [29] D.H. Hawes and D. Feldman, Absorption of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 27, pp. 91 – 101, 1992.
- [30] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman, Latent heat storage in building materials, Energy and Buildings, Vol. 20, pp. 77-86, 1993.
- [31] P. Lamberg, J. Jokisalo, K. Sirén, The effects on indoor comfort when using phase change materials with building concrete products, Helsinki University of Technology, Finland (Rapport interne).
- [32] M. Vénuat, Ciments et bétons, PUF, Paris, 1978.
- [33] D.W. Hawes, D. Banu and D. Feldman, The stability of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol 27, pp. 103-118, 1992.
- [34] Hweswt al [20] D.W. Hawes, D. Feldman and D. Banu, Energy conservation through latent heat thermal storage in building materials, Proc. 5th Jacques Cartier Conf., Montreal, 1992.
- [35] Jahns, E. (1999). Microencapsulated phase change materials. Proceedings of the 4th IEA ECES IEA Annex 10 Workshop. Benediktbeuern, Germany.
- [36] Akeiber, H., et al., A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling inbuilding envelopes. 2016. 60: p. 1470-1497.
- [37] DĐNÇER, Đ., ROSEN,(2002). Thermal Energy Storage Systems and Applications, Wiley and Sons Publishing Company, New York, USA.
- [38]]Atul Sharma et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and

Référence

applications. Renewable and sustainable energy review. vol13, February 2009.

[39]Parfait Tatsidjoudoung, Nolwenn Le Pierrès, and LingaiLuo. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 18 :327 _ 349, 2013.

[40] krackeler. <http://www.krackeler.com>. [date de consultation:18/04/2016].

[41] alibaba. <http://www.alibaba.com>. [date de consultation :18/04/2016].

[42] <http://company.indiatradepage.com>. [date de consultation:18/04/2016].

[43] guide hem. <http://www.guidechem.com>. [date de consultation:18/04/2016].

[44] sigmaaldrich. <http://company.indiatradepage.com>. [date de consultation:18/04/2016].

[45] Fabien Roget. Définition, modélisation et validation expérimentale d'une capacité de stockage thermique par chaleur latente adaptée à une centrale80thermodynamique solaire à basse température. PhDthesis, 2012. Thèse de doctorat dirigée par Favotto, Claude et Rogez, Jacques Physique et sciences de la matière Toulon 2012.

[46] <http://www.blog-testo.fr> 2022

[47] <https://www.humeau.com> 2022

[48] <http://www.smallrefnery.com> 2022

[49] <https://en.wikipedia.org/wiki> 2022

[50] Bechki Djamel thèse de magistère, stockage de l'énergie thermique dans un lit fixe, centre universitaire de Ouargla ,le 17/06/2000 p35

Référence

[51] H. Stéphanie, Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de Doctorat (2011), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Mécanique, Energétique, Acoustique.

[52] S.M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* 11 (1998) 1127-1138.

[53] S. Himran, A. Suwono and G. Mansoori, Characterization of alkanes and paraffin waxes for application of phase change energy storage medium, *Energy Sources* 16 (1994) 117-128.

Résumés :

Dans cette étude nous avons essayé d'établir une comparaison entre deux types de stockage de chaleur en utilisant plusieurs matériaux.

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur sensible et latente enregistre des applications industrielles de plus en plus importantes.

Les résultats obtenus permettent, de voir les matériaux, MCP et sensibles le plus intéressât en matière de stockage de l'énergie sous forme de chaleur.

Mots clés : chaleur latente, chaleur sensible, MCP, stockage, comparaison.

Abstract:

In this study we tried to make a comparison between two types of heat storage using several materials.

The storage of thermal energy by sensitive and latent heat has increasingly important industrial applications.

The results obtained make it possible to see the materials, MCP and sensitive most interesting in terms of energy storage in the form of heat.

Keywords: latent heat, sensitive heat, MCP, storage, comparison.

ملخص:

حاولنا في هذه الدراسة إجراء مقارنة بين نوعين من تخزين الحرارة باستخدام عدة مواد.

إن تخزين الطاقة الحرارية عن طريق الحرارة الحساسة والكامنة له تطبيقات صناعية متزايدة الأهمية.

النتائج التي تم الحصول عليها تجعل من الممكن رؤية المواد، MCP والأكثر حساسية من حيث تخزين الطاقة في شكل حرارة.

الكلمات الرئيسية: الحرارة الكامنة، الحرارة الحساسة، MCP، التخزين المقارنة.