

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou

Faculté de Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Science et Technologie

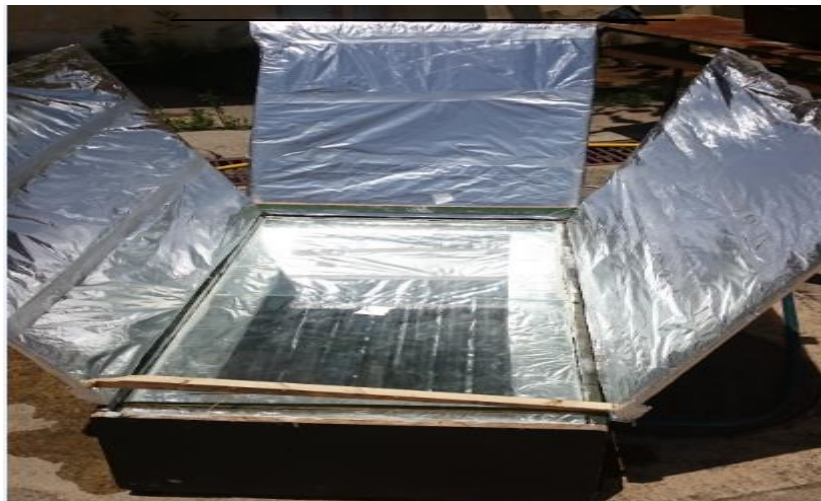
Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Option : Froid, chauffage et climatisation.

Thème

Etude et réalisation d'un concentrateur solaire avec
stockage d'énergie thermique



Présenté Par : Mr LACENE Mohamed

Mr GHERAB Medjber

Proposé et dirigé par :

Mr S.MAKHLOUF

Remerciements

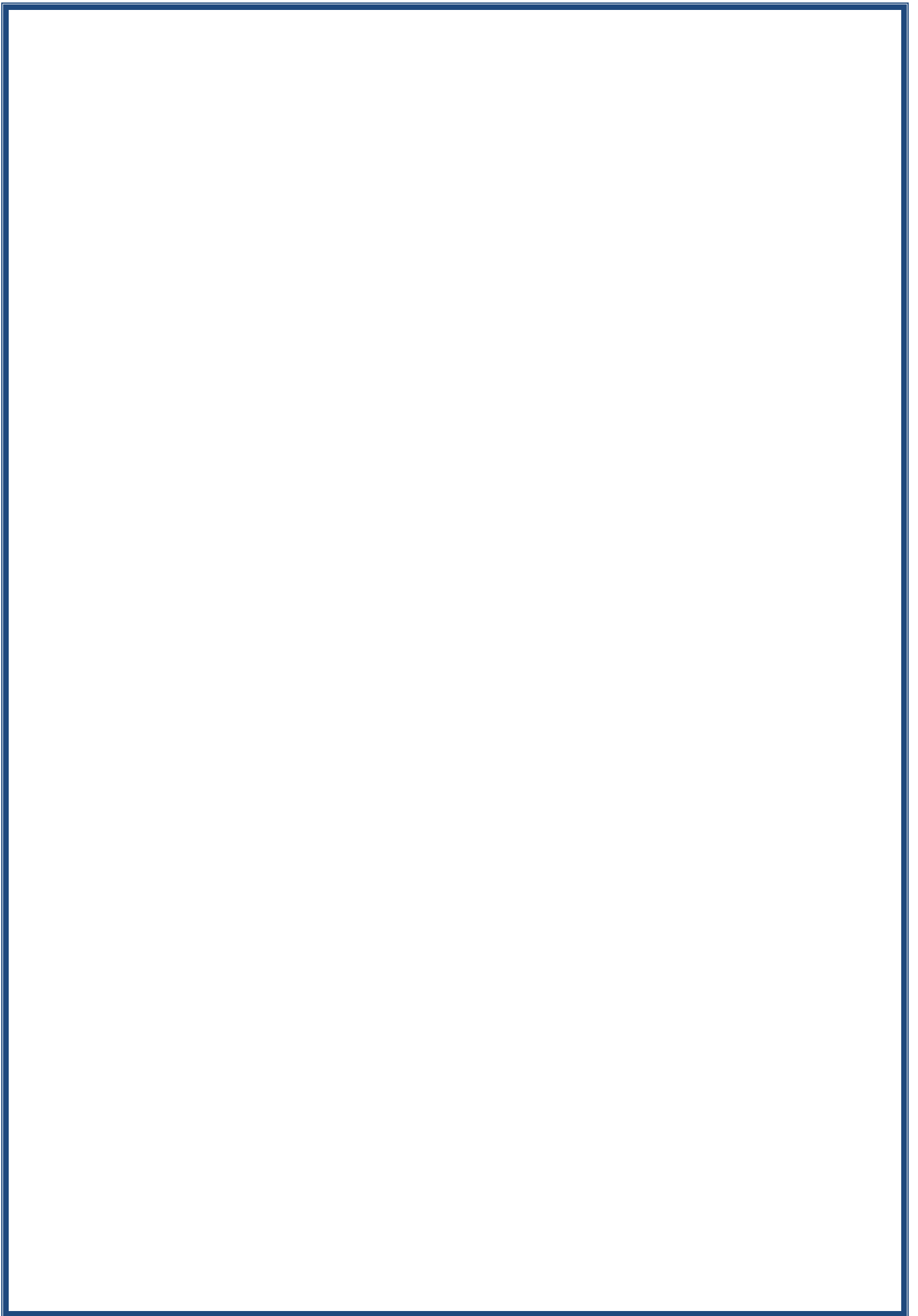
Il est particulièrement agréable d'exprimer ici notre reconnaissance envers tous ceux qui ont rendu possible ce travail.

Remercions Dieu, notre seigneur le grand et le clément qui nous a inspiré les justes réflexes, le courage, la patience, la santé et la force qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

Nous tenons à remercier grandement Mr MAKHLOUF pour ses grandes disponibilités ses encouragements et ses précieux conseils tout au long de la rédaction et la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier tous les membres du jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude et notre respect aux enseignants et étudiants de notre promotion.



NOMENCLATURE

Caractères	signification	Unités
Caractères latins minuscules		
m	masse	kg
ρ	masse volumique	kg/m ³
A, χ	Azimut su soleil	(°)
N	est numéro du jour à partir du premier Janvier.	-
kT	de clarté	-
c	vitesse de la lumière	m/s
λ	longueur d'onde	mètre
S0	la durée du jour	heure
Caractères latins majuscules		
Eph	Energie du photon	Joule
G _{SC}	la constante solaire	MJ.m ⁻² .mn ⁻¹
C	Vitesse de la lumière m. s-1	
G	irradiation solaire	J/m ²
G0	rayonnement extraterrestre	MJ. m-2.jour-1
H _{bi}	flux direct sur une surface inclinée	joule
H _{di}	flux diffus sur une surface inclinée	joule
H _{γ}	flux reçu par une surface inclinée	joule
T	température	°C
CP	chaleur massique	J. (kg K)-1
CS(T)	chaleur spécifique du corps à l'état solide	J. (kg K)-1
CL(T)	chaleur spécifique du corps à l'état liquide	J. (kg K)-1
L	chaleur latente de changement de phase	J. kg-1
LV	chaleur latente d'évaporation	J. kg-1
LF	chaleur latente de fusion	J.kg-1
ΔH	variation d'enthalpie	J.kg-1
H initiale	enthalpie initiale	J.kg-1
Hfinale	enthalpie finale	J/kg

T_i	température initiale	°C
T_f	température finale	°C
h	coefficient d'échange convectif	W/m ² K°
λ	conductivité thermique du polystyrène	W/m K°
$\dot{Q}$	flux de chaleur	W
$\dot{m}$	débit d'eau	L/s
S	surface	m ²

Caractères grecques

λ	Longueur d'onde	m
β	angle d'incidence	(°)
η	rendement	%
ω_0	angle horaire au coucher du soleil	(°)
α	longitude	(°)
ϕ	latitude(°)	
ω, H	angle horaire du soleil	(°)
δ	déclinaison du soleil	(°)
γ, H	hauteur du soleil	(°)
θ_z	angle zénital	(°)

Indices

STS	stockage thermique sensible
STL	stockage thermique latent
f	Finale
i	initiale
v	Vaporisation
f	Fusion
l	Liquide
s	solide
m	maximal
ρ_s	coefficient de réflexion de la lumière
F_γ	Facteur d'inclinaison du rayonnement réfléchi

h_i	coefficient d'échange convectif intérieur
h_e	coefficient d'échange convectif extérieur
Si	silice
Gr	graphite

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Réflecteur cylindro-parabolique.....	1
Figure I.2 : Réflecteur parabolique.....	1
Figure I.3 : centrale à tour.....	2
Figure I.4 : Capteur plan.....	4
Figure. I .5.Coordonnées géographiques terrestre.....	4
Figure I.6- La déclinaison du soleil en fonction des jours.....	5
Figure. I.7. Coordonnées horaire.....	7
Figure. I.8. Azimut du soleil.....	8
Figure. I .9.Coordonnées horizontales.....	8
Figure. I.10. Angle incident.....	8
Figure. I.11. Rayonnement solaire.....	9
Figure I.12- Le rayonnement extraterrestre en fonction des jours.....	9
Figure. I.13. Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	10
Figure. I.14. Rayonnement solaire.....	11
Figure. I.15. l'irradiation solaire en Algérie	14

Chapitre II

Figure II.1: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique	17
Figure II.2: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.....	20
Figure II.3: Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température ...	21
Figure II.4 classification des MCP.....	22

Chapitre III

Figure III.1: Échangeur monotube en serpentín	36
Figure III.2: Échangeur coaxial	37
Figure III.3: Échangeur à tube séparé	37
Figure III.4: Échangeur à tube rapproché	37
Figure III.5: Échangeur à tube ailette	38
Figure III.6: Autre différent type d'ailettes.....	39
Figure III.7: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire.....	40

Chapitre IV

Figure IV.1 : La Paraffine à l'état solide.....	45
Figure IV.2: La Silice.....	46
Figure IV.5: Le graphite.....	46
Figure IV.4 : Poudre de silice.....	46
Figure IV.3 : Grains de silice.....	47
Figure IV.6: Mélanges des trois éléments.....	48
Figure IV.7: La fonte des trois éléments.....	48
Figure IV.8: Le moulage du composite.....	48
Figure IV.9: Démoulage du composite.....	49
Figure IV.10 : Résultat du démoulage en forme de cylindre creux.....	49
Figure IV.11: Perçage des collecteurs d'eau.....	50
Figure IV.12 : Soudure des tubes.....	50
Figure VI.13 : Cannelles percées et peintes.....	52
Figure IV.14: Collage des cannelles.....	52
Figure IV.15: Collecteur de chaleur fini.....	53
Figure IV.16 : Boîtier en bois.....	54
Figure IV.17: Boîtier isolé avec du polystyrène.	54

Figure IV.18 : Boitier couvert avec du papier aluminium.....	55
Figure IV.19 : Réflecteur solaire.....	55
Figure IV.20 : L'assemblage du boitier et de l'échangeur.....	56
Figure IV.21 : Boitier avec vitre.....	56
Figure IV.22 : Boitier vitré avec réflecteurs.....	57
Figure IV.23 : Prototype achevé.....	57

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau. I.1. potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie.....	15
---	----

Chapitre II

Tableau II .1 : Propriétés des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C.....	17
Tableau II.2 Propriétés thermophysiques des paraffines	19
Tableau II.3 Exemples de propriétés physiques de paraffines	25
Tableau II.4 Propriétés thermophysiques des matières organiques non paraffiniques....	27
Tableau II.5 : Propriétés thermophysiques des acides gras	28
Tableau II.6 : Différents hydrates salins.....	29
Tableau II.7- Liste de quelques Eutectiques	30

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Propriétés chimiques et physiques de la Paraffine.....	45
Tableau IV.2 : Les propriétés chimiques et physiques de la Silice.....	46
Tableau IV.3: Propriétés chimiques et physiques du graphite.....	47
Tableau IIV.4 : Différents pourcentages en masse des constituants	47

Chapitre VI

Tableau VI.1 : Résultat des tests	59
---	----

Sommaire

Introduction

Chapitre I : généralités

I.1 Introduction.....	1
I.2 Définition d'un concentrateur solaire	1
I.3 Types de concentrateurs solaires.....	1
• I.3.1 Réflecteur cylindro-parabolique.....	1
• I.3.2 Réflecteur parabolique.....	2
• I.3.3 Centrale à tour.....	2
• I.3.4 Capteur plan.....	3
I.4. Coordonnées géographiques terrestres	4
• I.4.1. Altitude h	4
• I.4.2. Longitude α	4
• I.4.3. Latitude φ	4
I.5. Position du soleil.....	5
• I.5.1. Coordonnées horaire	5
• I.5.1.1. La déclinaison du soleil δ	5
• I.5.1.2. Angle horaire du soleil (ω , H).....	6
I.6. Coordonnées horizontales.....	7
• I.6.1. Hauteur du soleil (γ , H).....	7
• I.6.2. Azimut du soleil (χ , A).....	7
• I.6.3. Angle zénithal θ_z	8
• I.6.4. Angle incident	8
I.7. Rayonnement solaire.....	9
• I.7.1. Rayonnement extraterrestre (hors atmosphère).....	9
• I.7.2. Rayonnement solaire en atmosphère terrestre.....	10
I.8. Indice de clarté.....	11
I.9. Irradiation solaire.....	11
I.10. Durée d'insolation	11
I.11 Rayonnement solaire arrivant au sol.....	12
• I.11.1. Rayonnement direct.....	12
• I.11.2. Rayonnement diffus.....	12
• I.11.3. Rayonnement réfléchi.....	12
• I.11.4. Rayonnement global.....	12

I.12. Estimation du rayonnement solaire	12
• I.12.1.Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée	12
• I.12.2.Rayonnement direct sur une surface inclinée	13
• I.12.3.Rayonnement diffus sur une surface inclinée	13
• I.12.4.Rayonnement provenant de la réflexion	13
• I.12.5.Rayonnement global sur la surface inclinée	14
I.13. Rayonnement solaire en Algérie.....	14
Conclusion.....	15

Chapitre II : généralités sur les matériaux a changement de phases

Introduction	17
II. Différentes formes de stockage d'énergie thermique	18
• II.1. Stockage Thermique Sensible, STS.....	18
• II.2. Stockage thermique latent (STL).....	19
• II.3. Propriétés des matériaux à changement de phase.....	21
• II.3.1- Critères thermodynamiques.....	22
• II.3.2- Critères cinétiques	22
• II.3.3. Critères chimiques	22
• II.3.4- Critères économiques	22
• II.4. Classification des matériaux à changement de phase(MCP)	23
• II.4.1. les composés organiques	24
▪ II.4.1.1.Avantages et inconvénients des paraffines	25
▪ II.4.1.2.. Différentes cires paraffiniques	27
▪ II.4.1.3. Conditionnement des paraffines	27
▪ II.4.1.4Les composés organiques non-paraffiniques ..	27
• II.4.2. les sels hydratés (matières non-organiques)	29
• II.4.2.1- Différents hydrates salins	30
• II.4.3. les eutectiques	30
• II.5. Les matériaux composites	32
• Introduction.....	32
• II.5.1. Les renforts.....	32
• II.5.1.1. Fibre de verre	32
• II.5.1.2. Fibre de carbone	33
• II.5.1.3. Fibre de bore	33

• II.5.1.4. Fibre de silice (ou de quartz)	33
• II.5.1.5Caractéristiques moyennes des fibres et renforts.....	34
• II.5.2. Les charges.....	34
• II.5.2.1. Les silices	34
• II.5.2.2. Les argiles et alumino-silicates	34
• II.5.2.3. Le verre	34
• II.5.2.3.1. Poudres de verre	34
• II.5.2.4. Le carbone	35
• II.5.2.4.1. Le noir de carbone	35
• II.5.3.Les matrices	35

Chapitre III : généralités sur les échangeurs de chaleur

• Introduction.....	36
• III.1 Type des échangeurs de chaleur.....	36
• III.1.1 Les échangeurs tubulaires.....	36
• III.1.1.1 Échangeur monotube.....	36
• III.1.1.2 Échangeur coaxial.....	37
• III.1.2 Échangeur multitubulaire.....	37
• III.1.2.1 Échangeur à tubes séparés.....	37
• III.1.2.2 Échangeur à tubes rapprochés.....	37
• III.1.2.3 Échangeur à tubes ailettes.....	38
• III.1.3. Echangeur à plaques.....	40
• III.1.3.1 Échangeurs à surface primaire.....	40
• III.2 Classification des échangeurs.....	40
• III.2.1 Classement technologique.....	40
• III.2.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur.....	40
• III.2.2.1. Modes de transfert de chaleur	41
• III.2.2.1.1.Transfert de chaleur par conduction	41
• III.2.2.1.2.Transfert de chaleur par convection	41
• III.2.2.1.3.Transfert de chaleur par Rayonnement.....	41
• III.2.3 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur.....	42
• III.2.4 Classement fonctionnel.....	42
• III.2.5 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	42
• III.3. Etude thermique d'un échangeur.....	42
• III.3.1.Resistance et conductance thermique	42
• III.3.2Efficacité d'un échangeur.....	44
• Conclusion.....	44

Chapitre IV : partie expérimentale

• VI.1 Introduction	45
• VI.2 Elaboration du composite.....	45
• VI.2.1 La paraffine	45
• VI.2.2 La silice	46
• VI.2.3 Le graphite	47
• VI.3 Préparation du composite	47
• VI.4 Réalisation de l'échangeur	49
• VI.5 Réalisation du boîtier	53
• VI.6 Réalisation des réflecteurs.....	55
• VI.7 Assemblage	56

Chapitre V : résultats et discussion

Conclusion	65
-------------------------	----

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

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

Une autre façon de stocker de l'énergie calorifique consiste à utiliser des matériaux à changement de phase (MCP). L'énergie est alors emmagasinée sous forme de chaleur latente grâce à la fusion de ces matériaux, puis restituée au milieu ambiant grâce à leur solidification. Le choix d'un MCP dont la chaleur latente est élevée et dont la température de changement de phase est proche de la température ambiante permet à la fois de réduire considérablement l'encombrement de l'appareil et les pertes thermiques pendant la période de stockage.

Les systèmes utilisant ce procédé de stockage avec chaleur latente, sont obtenus par la transformation des rayons solaires en énergie thermique.

Cette énergie peut être transformée en chaleur à basse température, par des capteurs plans, utilisant conjointement l'absorption par une surface sélective et l'effet de serre créé par le vitrage, ces capteurs ne permettent pas en général de dépasser la température d'ambiance. Pour travailler à température élevée, il faut accroître le flux optique incident qui pourrait se faire par concentration du rayonnement solaire. Cette opération est réalisée à l'aide de capteurs appelés concentrateurs solaires

INTRODUCTION

Notre travail est consacré à l'étude et à la modélisation du concentrateur solaire et la réalisation d'un prototype. Le mémoire de synthèse des travaux réalisés a été comme suit :

Le premier chapitre est consacré à l'étude des concentrateurs solaires et l'estimation du rayonnement solaire.

Le second chapitre porte sur les généralités des matériaux à changement de phases et matériaux composites.

Le troisième chapitre parle des généralités sur les échangeurs de chaleur.

Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation d'un prototype du concentrateur solaire avec stockage d'énergie thermique.

Le dernier chapitre est porté sur l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus.

Le mémoire se termine par une conclusion qui reprend l'essentiel des résultats et les perspectives à venir.

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

CHAPITRE I

Généralités

Chapitre I : généralités

I.1 Introduction : l'énergie solaire est la plus abondante sur terre, d'où l'intérêt de créer des systèmes pour son exploitation dans les domaines thermiques et électriques.

I.2 Définition d'un concentrateur solaire

Un système qui utilise des lentilles ou des miroirs pour concentrer une grande surface de rayons du soleil, ou d'énergie thermosolaire, sur une petite surface.

I.3 Types de concentrateurs solaires

Il existe différentes façons de faire un concentrateur solaire. Il faut tout d'abord des collecteurs solaires ; il en existe quatre :

I.3.1 Réflecteur cylindro-parabolique

Le réflecteur cylindro-parabolique (figure I.1) est un capteur solaire à concentration à foyer linéaire qui utilise un réflecteur cylindrique de section parabolique. Il est le concentrateur le moins récent mais le plus utilisé car de nombreuses installations ont déjà vu le jour et ont déjà été commercialisées depuis 1980 dans le monde.

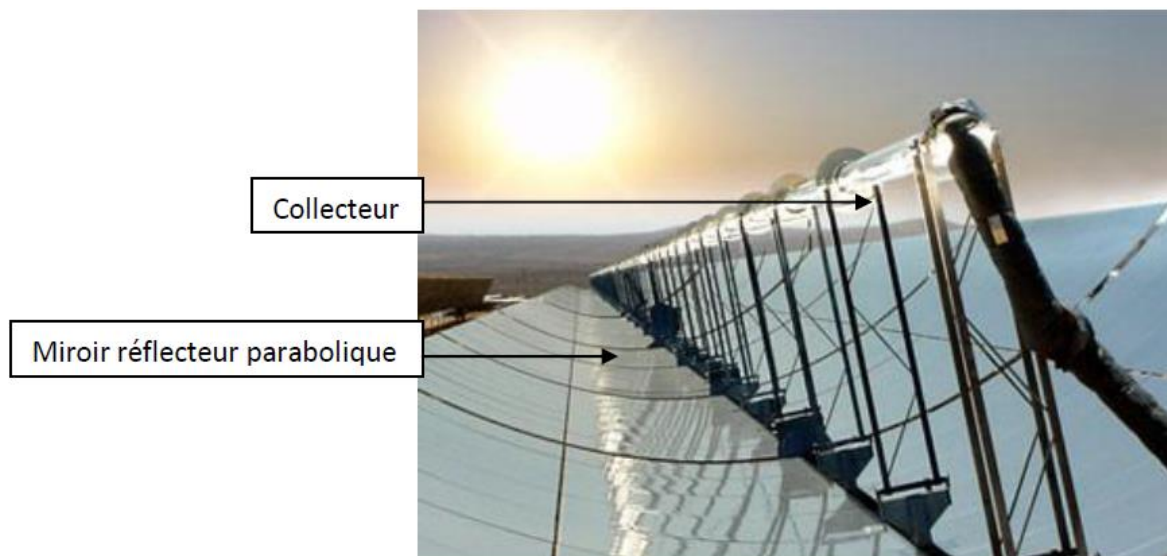


Figure I.1 : Réflecteur cylindro-parabolique[14].

Dans ce type de centrale, les miroirs réflecteurs sont alignés parallèlement et tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil et collecter le plus de rayons possibles. Ces rayons sont ensuite concentrés sur un tube horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur qui peut atteindre une température de 500°C.

Les principaux avantages des centrales cylindro-paraboliques sont :

- Fonctionnement 24h/24h grâce à un système de stockage de chaleur.
- Le soleil est une source d'énergie inépuisable et gratuite et il n'y a pas d'émission polluante.

Cependant, des inconvénients font défaut à ces centrales, dont nous citons :

- On ne peut pas créer ce type de centrale partout dans le monde car elle a besoin d'un fort ensoleillement....

Chapitre I : généralités

- Il faut disposer d'une surface importante au sol.

I.3.2 Réflecteur parabolique

Les concentrateurs solaires paraboliques (figure I.2) sont formés par un ensemble de miroir incurvés. Ressemblant à des paraboles de réception satellite, les concentrateurs paraboliques sont en 3 dimensions. En effet, ils forment une courbe de la même manière sur toute leur longueur et la largeur. Les concentrateurs sont bordés de miroirs ou recouverts d'un revêtement réfléchissant tel que l'aluminium. L'utilisation de certains revêtements entraîne des résultats plus élevés dans la réflectivité. Plus la réflectivité sera grande, plus les concentrateurs solaires seront puissants.



Figure I.2 : Réflecteur parabolique[14].

Le principal avantage de ce type d'installation réside dans le fait qu'il permet souvent d'avoir un bon rendement. Cependant, il faut savoir que ce concentrateur fonctionne par intermittence et connaît des diminutions considérables du rendement lors des changements météorologiques (jours nuageux ou pluvieux). Afin de compenser cette discontinuité, un système d'appoint ou un système de stockage peut être mis en place pour assurer l'autonomie de ce type d'appareil.

I.3.3 Centrale à tour

Une centrale solaire thermodynamique est une centrale présentant un dispositif de concentrateur solaire. Ce dispositif est composé de miroirs plans et d'une tour comportant un fluide caloporteur (figure I.3). A l'aide de miroirs plans appelés héliostats, les rayons solaires seront regroupés en une zone appelée foyer avec une grande précision. Cette zone est située en haut d'une grande tour pouvant dépasser les 100 mètres de haut. La température y régnant peut dépasser les 1000°C.



Figure I.3 : centrale à tour[14].

L'avantage de ces centrales à tour est la minimisation des déperditions d'énergie lors du transfert de chaleur. Quant à l'inconvénient, il réside dans le fait que ces tours doivent être très hautes et nécessitent un dispositif au sol important afin d'avoir une rentabilité acceptable.

I.3.4 Capteur plan

Le capteur plan est la technologie la plus simple et la plus utilisée, il est chargé de transformer le rayonnement solaire en chaleur, doté d'un réflecteur plan qui est en général mobile afin de suivre le soleil; on parle d'héliostat plan.

Ce système est utilisé dans le cas des centrales solaires thermiques à tour ou couplé à un miroir parabolique comme dans le cas des fours solaires de type Odeillo. Il existe deux types de capteurs plans :

- Le capteur plan vitré : est constitué d'une caisse isolée couverte par un vitrage. A l'intérieur, on retrouve l'absorbeur dans lequel circule le fluide caloporteur. Le vitrage bloque le rayonnement infrarouge et isole la lame d'air au-dessus de l'absorbeur pour garder la chaleur.
- Le capteur plan non vitré : est moins répandu, il est seulement constitué d'un absorbeur dans lequel circule le fluide caloporteur. Très dépendant de la température extérieure, il est en général utilisé en été pour chauffer l'eau des piscines.

Un capteur solaire plan est généralement composé d'un coffre, d'un vitrage, d'une isolation thermique, d'un absorbeur et de tubes permettant le passage du fluide caloporteur (figure I.4).

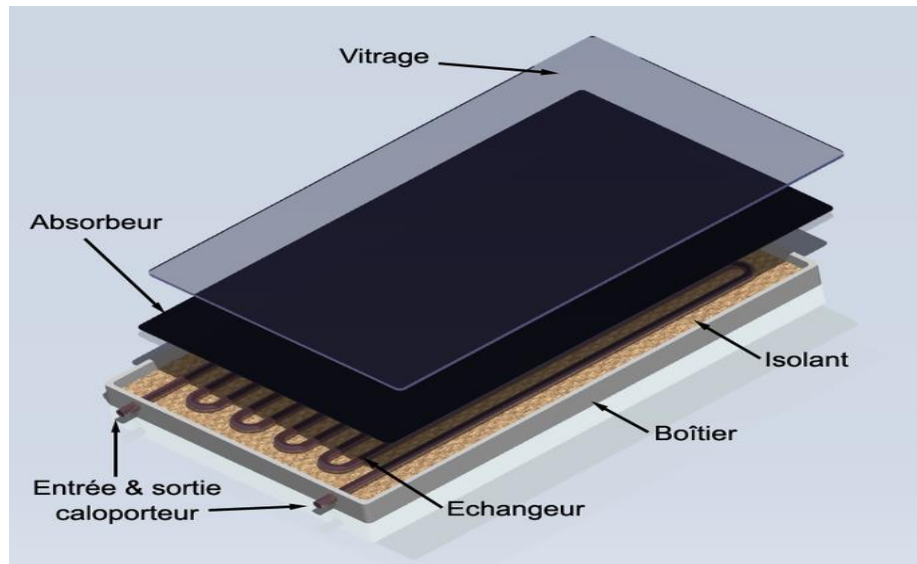


Figure I.4 : Capteur plan[14].

I.4. Coordonnées géographiques terrestres

On repère un point sur la surface de la terre par ces coordonnées :

I.4.1. Altitude h :

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (m).

I.4.2. Longitude α :

La longitude d'un lieu donné est l'angle formé par le méridien d'origine (méridien de GREENWICH), elle est comptée de 0° à 180° , positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest.

I.4.3. Latitude φ :

Une latitude donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie entre 0° et 90° , positivement vers le pôle Nord et négativement vers le pôle Sud.

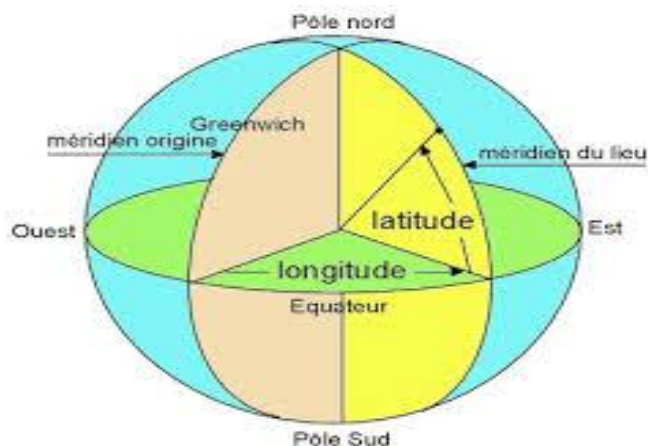


Figure. I .5.Coordonnés géographiques terrestres[14].

I.5. Position du soleil

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées :

I.5.1. Coordonnées horaire :

Les coordonnées horaires sont liées à l'heure de l'observation et n'ont aucune relation avec la position d'un observateur sur la terre. Elles ont comme plan de référence, le plan de l'équateur.

Les coordonnées horaires sont au nombre de deux :

I.5.1.1. La déclinaison du soleil δ

La déclinaison est l'angle que fait la direction d'observation du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. Elle est exprimée en degrés ($^{\circ}$), minute ($'$) et seconde ($''$) d'arc. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique.

En considérant la déclinaison comme constante sur une journée, l'équation de Kopernic fournit la relation qui relie ces deux grandeurs δ :

$$\delta = 23.45 \left[\sin \frac{2\pi(284+d)}{365} \right] \quad (I.1)$$

D : est le numéro du jour de l'année à partir du premier Janvier.

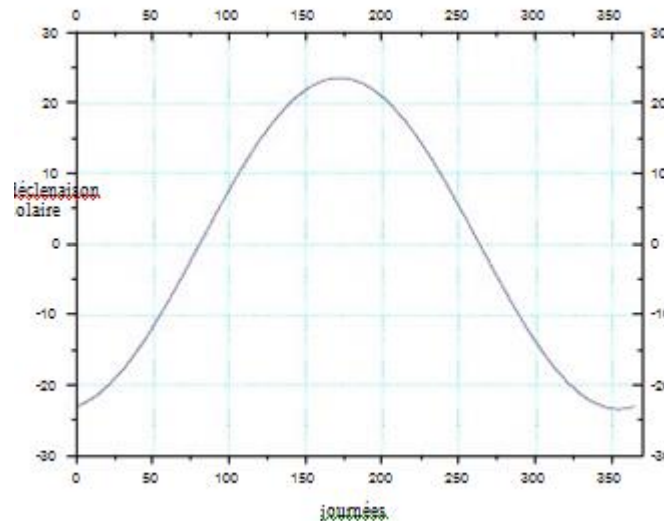


Figure I.6- La déclinaison du soleil en fonction des jours[14].

La déclinaison solaire varie de -23.45° au solstice d'hiver à 23.45° au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. Cette variation entraîne des variations de la hauteur du soleil pour un même site.

I.5.1.2. Angle horaire du soleil (ω , H)

L'angle horaire étant l'angle ou l'arc sur l'équateur dans le sens rétrograde à partir du plan vertical du lieu passant par le sud jusqu'au plan méridien passant par le centre du soleil. Il mesure la course du soleil dans le ciel. L'angle horaire définit le temps solaire vrai TVS, il est midi TSV si $\omega=0$.il augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24heures). L'angle horaire $\omega(^\circ)$ est donné par la formule suivante :

$$\omega = 15(\text{TVS} - 12) \quad (\text{I.2}) \quad (\text{I.5})$$

TSV : est le temps solaire vrai en heure, se calcule par l'équation suivante :

$$\text{TSV} = \text{TU} + \frac{L}{15} + \text{ET} \quad (\text{I.3})$$

$$\text{ET} = 9.8 \sin(2B) - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (\text{I.4})$$

$$B = \frac{2\pi (n-81)}{365} \quad (\text{I.5})$$

TU : est le temps universel du méridien de GREENWICH (GTM).

ET : équation du temps.

B : exprimé en radians, dépend du numéro du jour de l'année.

L : exprimé en radians, est la longitude

Cette formule n'est pas valable pour les heures de lever et de coucher du soleil, il faut ainsi déterminer l'angle solaire du coucher, et au lever qui dépendent de la déclinaison et de la latitude du lieu :

$$\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta)$$

L'angle solaire au coucher est tout simplement l'opposé de l'angle solaire au lever.

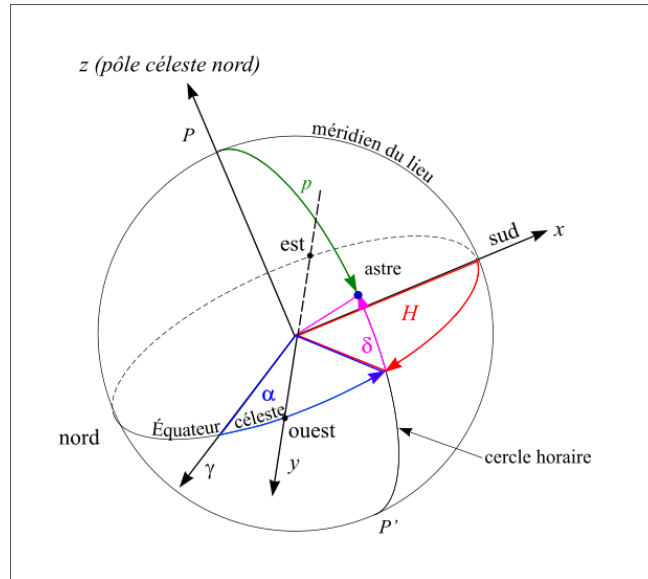


Figure. I.7. Coordonnées horaires [14]

I.6. Coordonnées horizontales

Les coordonnées horizontales dépendent du lieu d'observation. Elles ont comme plan de référence le plan horizontal, perpendiculaire à la verticale du lieu. Un objet est repéré dans ce système de coordonnées par ces composantes :

I.6.1. Hauteur du soleil (γ , H)

La hauteur angulaire du soleil, communément appelée hauteur du soleil ou élévation du soleil, est l'angle compris entre la direction apparente du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu considéré. Sa valeur est nulle au lever ou au coucher du soleil et maximale lorsque le soleil est au zénith. Elle varie au cours de la journée en fonction de la déclinaison δ de l'angle horaire ω , et de la latitude φ , de telle façon que :

$$\sin \gamma = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (\text{I.6})$$

I.6.2. Azimut du soleil (χ , A)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud ou Nord. Il est mesuré commençant par le Nord au par le Sud, soit vers l'Est soit vers l'Ouest, à travers un axe de 360° (l'azimut est compris entre -180° et $+180^\circ$).

Dans l'hémisphère Nord, l'origine des azimuts correspond à la direction du Sud. L'angle azimutal est compté positivement vers l'Ouest et négativement vers l'Est.

$$\sin \chi = \frac{\cos \delta \cos \omega \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi}{\cos \gamma} = \frac{\cos \delta \sin \delta}{\cos \delta} \quad (\text{I.7})$$

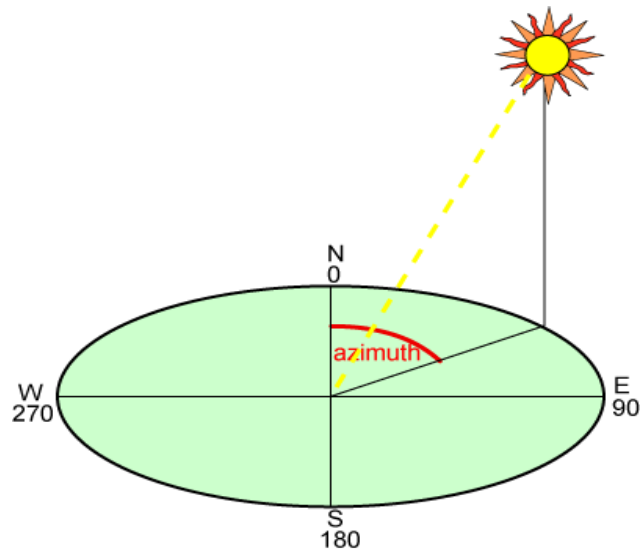


Figure. I.8. Azimut du soleil[14].

I.6.3. Angle zénithal θ_z

C'est l'angle entre le zénith local et la ligne joignant l'observateur et le soleil. Il varie de 0 à 19°

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (I.8)$$

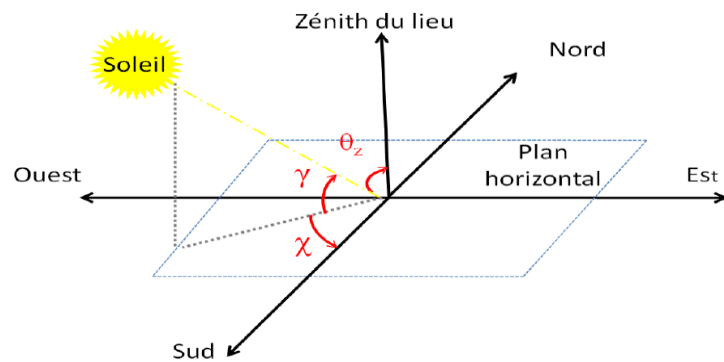


Figure. I .9.Coordonnées horizontales[14].

I.6.4. Angle incident

C'est l'angle formé par la normale du plan et les rayons du soleil.

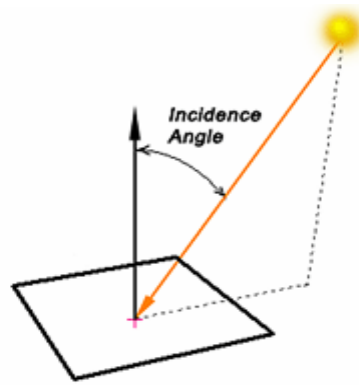


Figure. I.10. Angle incident[14].

I.7. Rayonnement solaire

Le soleil émet en permanence, dans toutes les directions de l'espace, des rayonnements électromagnétiques composés de « **grains** » de lumière appelés photons. Ces rayonnements se propagent à la vitesse de la lumière **C**. Il lui faut donc en moyenne 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour que ces rayons atteignent notre atmosphère. L'énergie, **E_{ph}**, de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ .

$$E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} \quad (I.9)$$

Où **h** est la constante de Planck, **h=6.62.10⁻³⁴J.s.**

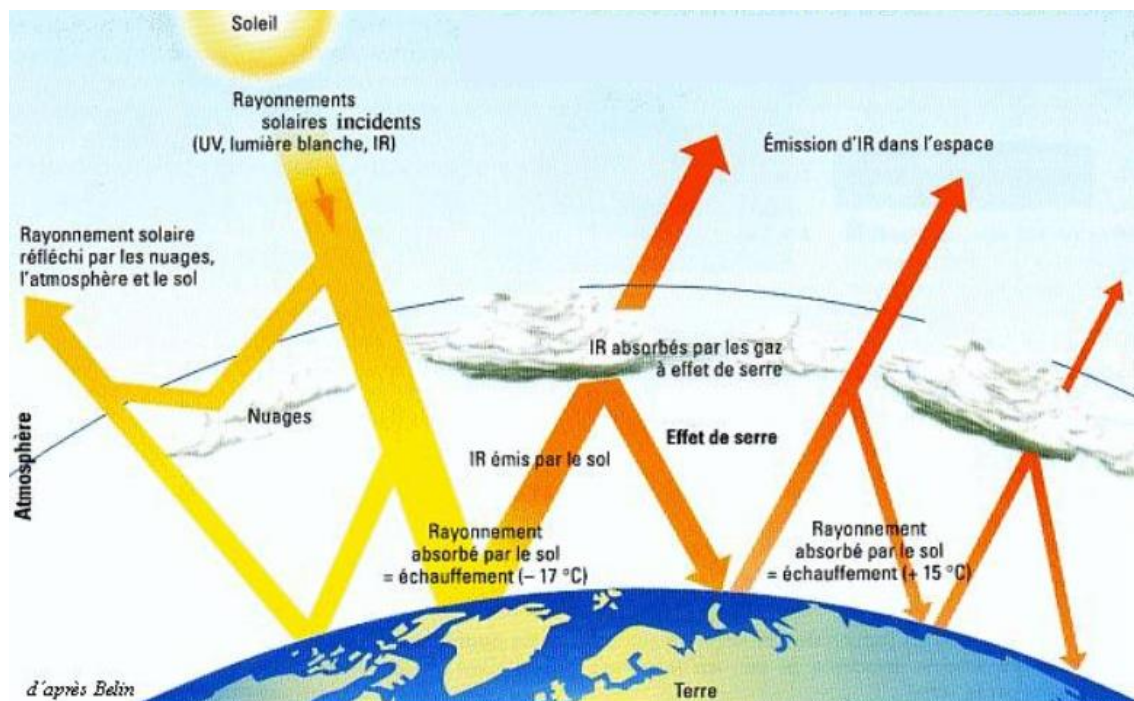


Figure. I.11. Rayonnement solaire[16].

I.7.1. Rayonnement extraterrestre (hors atmosphère)

Chapitre I : généralités

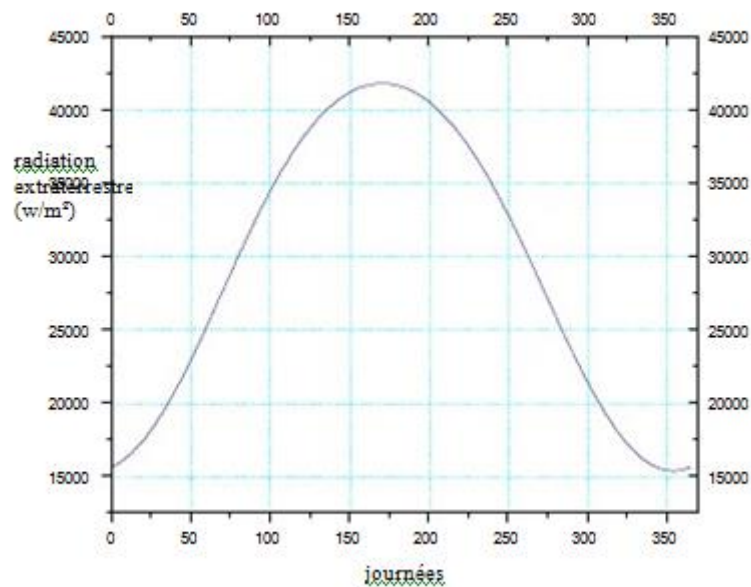
Le rayonnement solaire extraterrestre couvre un très large domaine de longueurs d'ondes. Il ne dépend d'aucun paramètre météorologique, mais il est fonction de quelques paramètres astronomiques et géographiques tels que : la latitude du lieu (ϕ), la déclinaison solaire (δ) et l'angle horaire au coucher du soleil (ω). Sur une surface horizontale, et pour le jour n , le rayonnement extraterrestre G_0 ($\text{MJ. m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$) est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$G_0 = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{SC} \left[1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] [\omega_0 \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \sin \delta \sin \omega_0] \quad (\text{I.10})$$

G_{SC} : est la constante solaire égale à $0.0082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{mn}^{-1}$

n : est numéro du jour à partir du premier Janvier.

Figure I.12- Le rayonnement extraterrestre en fonction des jours



I.7.2. Rayonnement solaire en atmosphère terrestre[16].

Le rayonnement reçu sur l'atmosphère terrestre n'occupe qu'une faible portion du spectre d'ondes électromagnétiques solaires. Il est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et $2.5 \mu\text{m}$. Il inclut le domaine du visible (ondes lumineuses de 0.4 à $0.8 \mu\text{m}$).

Les capteurs d'énergie solaire, qui correspondent aux cellules solaires devront donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme d'électrons.

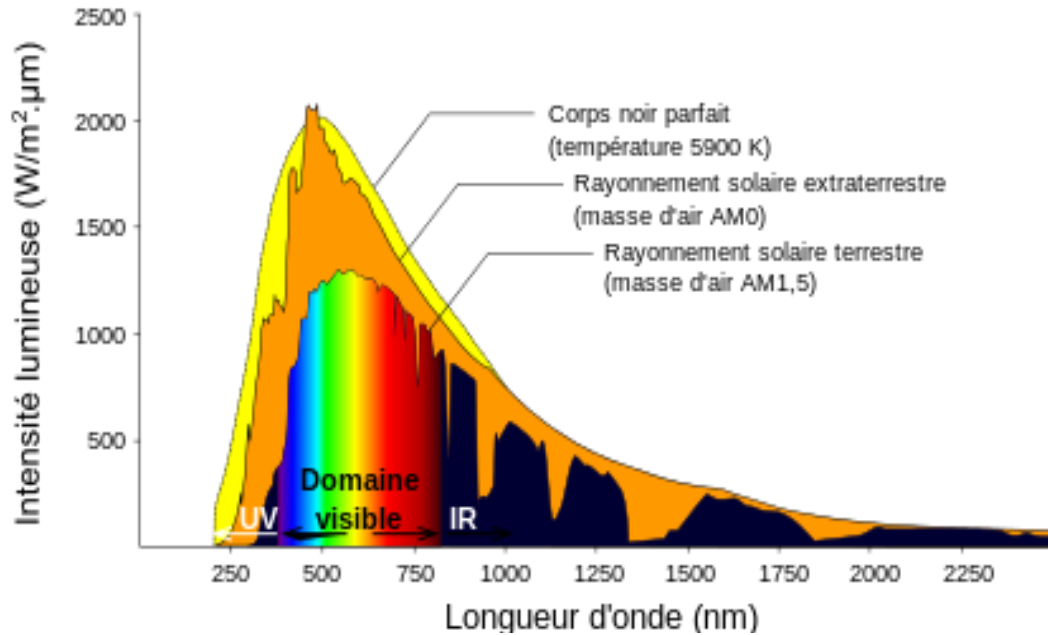


Figure. I.13. Répartition spectrale du rayonnement solaire[16].

I.8. Indice de clarté

On appelle indice de clarté k_T , le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre :

$$K_T = G / G_0 \quad (I.11)$$

Où G est l'irradiation solaire reçue sur un plan horizontal.

et G_0 est le rayonnement extraterrestre.

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté K_T varie selon les endroits et les saisons et varie généralement entre 0.3 (pour des régions où les saisons sont pluvieuses) et 0.8 (pour des saisons ou des climats secs et ensoleillés).

I.9. Irradiation solaire

L'irradiation solaire exprime la quantité d'énergie reçue, au niveau du sol, par unité de surface. Ses unités usuelles sont le J/m^2 , J/cm^2 , Wh/m^2 ou bien kWh/m^2 .

Elle dépend de nombreux facteurs, dont principalement la couverture nuageuse, la durée du jour, l'instant considéré dans la journée, l'orientation et l'inclinaison de la surface, la latitude du lieu, son degré de pollution et la hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon.

La combinaison de tous ces paramètres produit la variation dans l'espace et le temps de l'irradiation solaire. Dans les régions du globe comprises entre 40° Nord et Sud, l'énergie globale annuelle reçue par une surface horizontale est comprise entre 1400 et 2500 kWh/m^2 .

I.10. Durée d'insolation

Chapitre I : généralités

La durée d'insolation correspond à la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct reçu sur un plan normal dépasse un seuil fixé par la convention à 120W.m^{-2} .

En absence permanente des nuages, la durée de l'isolation est pratiquement égale à la durée du jour, qui s'appelle aussi la durée astronomique ou théorique du jour, elle est définie par :

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_0 \quad (\text{I.12})$$

ω_0 : est égale à l'angle horaire au coucher du soleil ($^\circ$).

S_0 : la durée du jour (h).

I.11 Rayonnement solaire arrivant au sol

Le calcul et les mesures par satellite montrent que la terre qui est située à environ 150 millions de kilomètres du soleil, reçoit de sa part un rayonnement d'une puissance moyenne de 1361W/m^2 . C'est la puissance reçue par une unité de surface qui serait perpendiculaire aux rayonnements juste au-dessus de l'atmosphère terrestre. En traversant l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est absorbé ou diffusé, on distingue plusieurs composantes :

I.11.1. Rayonnement direct

C'est le rayonnement reçu directement du soleil. C'est ce type de rayonnement qui est utilisé dans le système à concentration (four solaire, centrales solaires thermodynamique et photovoltaïque)

I.11.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffusé par les différents gaz constituant l'atmosphère, des rayons lumineux issus du Soleil traversent les nuages et se diffusent sur toute la surface de la Terre. Il contribue à l'éclairement mais ne peut pas être concentré (à l'inverse du rayonnement direct).

I.11.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie du rayonnement réfléchi par la Terre appelé aussi **albédo**.

I.11.4. Rayonnement global

C'est la somme du rayonnement direct et diffus, c'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaire thermique et photovoltaïque (système sans concentration).

I.12. Estimation du rayonnement solaire

I.12.1. Estimation du rayonnement solaire instantané sur une surface inclinée :

Dans la majorité des cas d'application, il est nécessaire de calculer le flux solaire sur des plans d'orientation quelconque.

Pour estimer l'énergie reçue par une surface inclinée à partir de données concernant une surface horizontale, il faut séparer la composante directe et la composante diffuse.

I.12.2. Rayonnement direct sur une surface inclinée :

Connaissant le flux direct sur une surface horizontale H_b , le flux direct sur une surface inclinée H_{bi} est donné par la formule suivante :

$$H_{bi} = R_b H_b \quad (I.13)$$

H_{bi} : flux direct sur une surface inclinée.

R_b : rapport du rayonnement direct journalier sur une surface inclinée à celui sur une surface horizontale, il est donné par l'expression suivante :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (I.14)$$

θ : angle d'incidence du rayonnement direct sur le concentrateur solaire

θ_z : angle au zénith

I.12.3. Rayonnement diffus sur une surface inclinée :

En admettant que le flux diffus est isotrope, c'est-à-dire uniformément réparti sur la voûte céleste, la valeur du rayonnement diffus est donnée par :

$$H_{di} = H_d F_p \quad (I.15)$$

H_{di} : flux diffus sur une surface inclinée.

F_p : facteur d'angle plan incliné-ciel, il est donné par :

$$F_p = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (I.16)$$

Ce qui donne :

$$H_{di} = \frac{H_d}{2} (1 + \cos \beta) \quad (I.17)$$

I.12.4. Rayonnement provenant de la réflexion :

De même, le flux réfléchi par le sol est isotrope, on a :

$$H_r = H \rho_s F_r \quad (I.18)$$

ρ_s : représente le coefficient de réflexion de la lumière diffus du sol (aussi appelé albédo du sol, valeur fixée à 0,2)

$$F_r = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (I.19)$$

F_r : Facteur d'inclinaison du rayonnement réfléchi.

L'équation H_r devient

$$H_r = H\rho_s \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (I.20)$$

H_r : Flux reçu par une surface inclinée provenant de la réflexion sur le sol.

I.12.5. Rayonnement global sur la surface inclinée :

Connaissant les trois composantes des flux et irradiation, on a finalement :

$$H_t = H_{di} + H_{bi} + H_r \quad (I.21)$$

$$H_t = H_b R_b + H_d \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) + H\rho_s \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (I.22)$$

H_t : rayonnement instantané sur une surface inclinée.

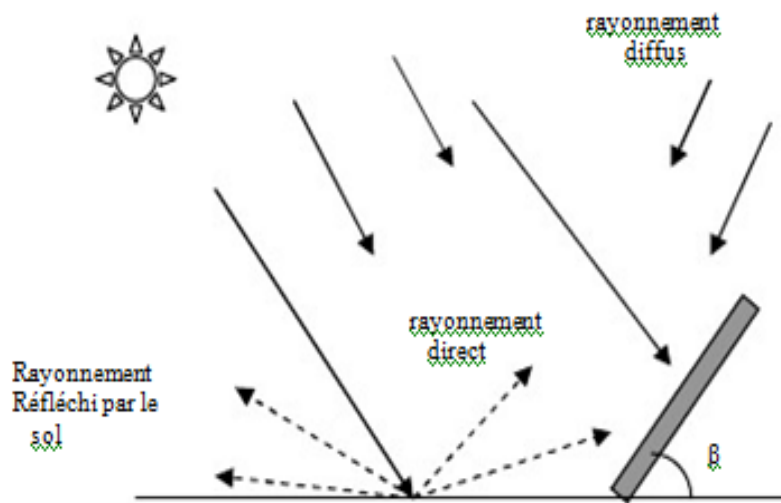


Figure. I.14. Rayonnement solaire[16].

I.13. Rayonnement solaire en Algérie.

Chapitre I : généralités

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme surtout dans le Sud du pays. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures.

Tableau. I.1. Potentiel de l'énergie photovoltaïque en Algérie.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficies (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (H/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	2650

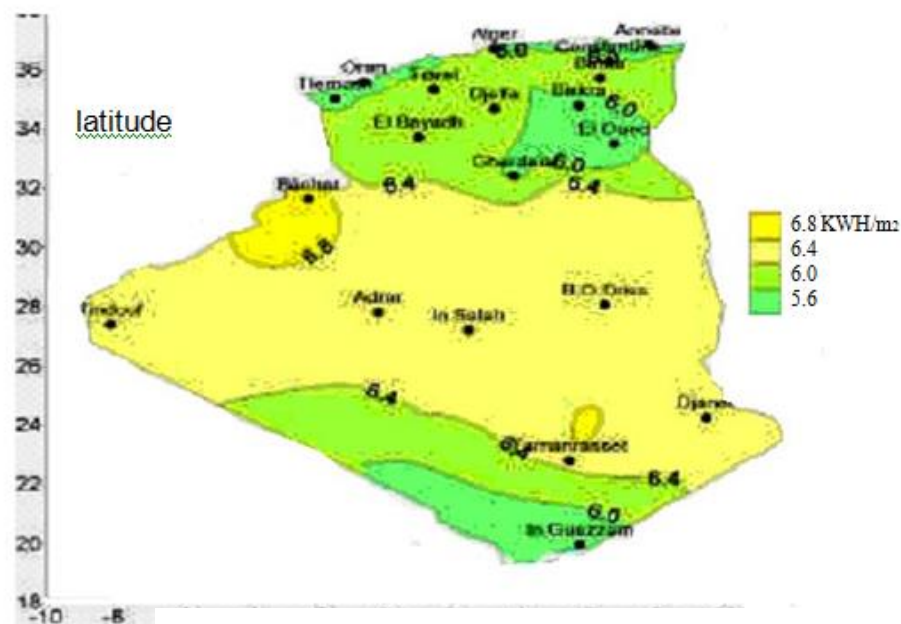


Figure. I.15. l'irradiation solaire en Algérie [16].

Conclusion :

Chapitre I : généralités

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire.

Le rayonnement reçu par un capteur dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu'il est orienté vers le sud et est incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Par exemple les capteurs installés à Constantine sont inclinés de 39° .

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du soleil.

CHAPITRE II

Généralités sur les matériaux à changement de phase

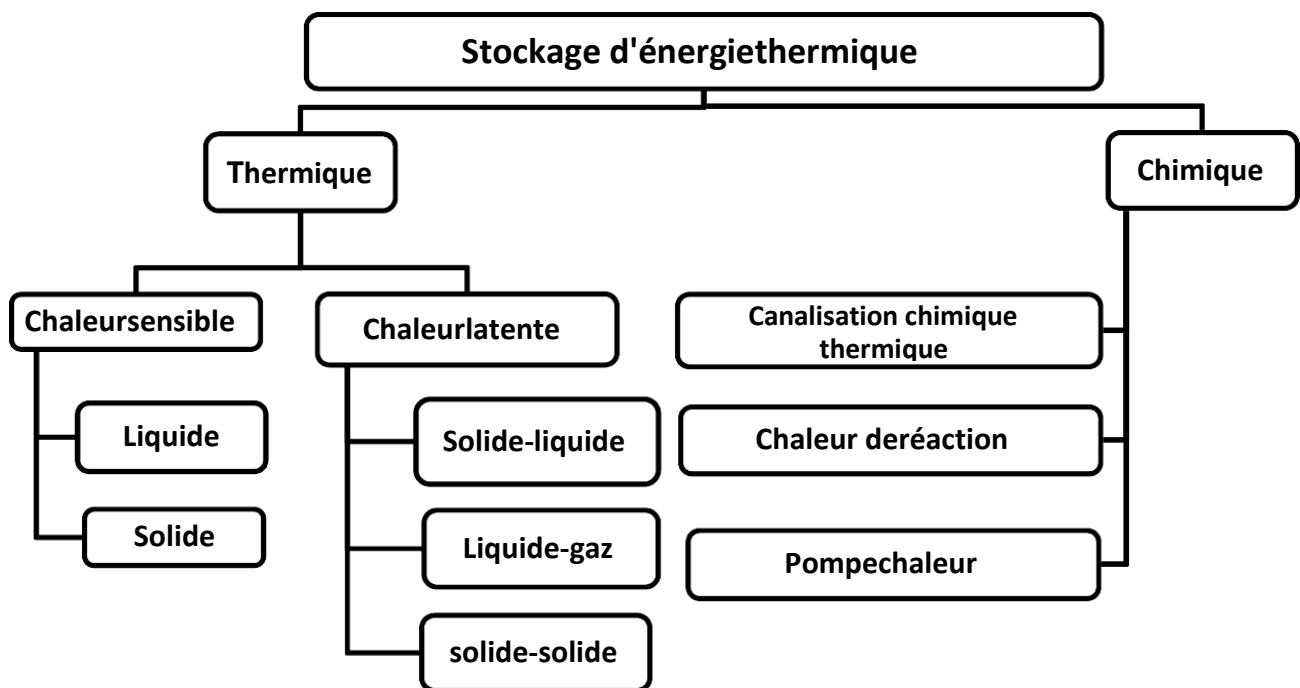
Introduction :

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

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

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

Figure II.1: Principales techniques de stockage de l'énergie thermique [3].



Parmi les applications usuelles du stockage thermique on peut citer :

- La récupération dans les installations industrielles de la chaleur perdue pendant la durée de leur fonctionnement pour l'utiliser ultérieurement pour d'autres besoins.
- Le stockage sous forme thermique du surplus d'énergie électrique produite pendant les heures creuses pour couvrir des besoins qui auraient nécessité le recours à la consommation d'énergie pendant les heures de pointe où les appels en puissance

- peuvent dépasser les capacités descentrales.
- Le stockage de l'énergie frigorifique en froid industriel et en climatisation quand la capacité libre de production de froid en heures creuses peut être utilisée pour couvrir les besoins lors de pointes de consommation, comme dans le cas de la gestion de l'énergie électrique.
- Le stockage de l'énergie produite dans les systèmes solaires passifs pendant le jour ensoleillé pour l'utiliser pendant la nuit ou dans une autre période.
- Le refroidissement des circuits électroniques où le fonctionnement en transitoire des circuits électroniques nécessite généralement des puissances de refroidissement bien supérieures aux puissances nominales qui conduisent à sur-dimensionner les circuits, leurs alimentations et leur système de refroidissement.

L'utilisation d'un stockage d'énergie associée à ces circuits permet de faire face aux appels transitoires de puissance sans ce surdimensionnement.

- la gestion du confort thermique dans les bâtiments qui dépend non seulement de la température et de l'humidité de l'air ambiant mais encore des températures des parois. C'est une des raisons pour laquelle le stockage par chaleur latente est attractif dans ce cas.

II. Différentes formes de stockage d'énergie thermique [3]. :

Principalement, l'énergie thermique est stockée sous deux formes : stockage par chaleur sensible à l'état liquide ou à l'état solide, et stockage par chaleur latente lors du changement de phase.

II.1- Stockage Thermique Sensible, STS [3].:

Dans le stockage de chaleur sensible de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide ; la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant le système de stockage de chaleur sensible sans aucun problème. C'est le plus important avantage de cette méthode.

Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considérée comme un inconvénient pour ce système. Dans ce système, la quantité de chaleur dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage. La chaleur sensible peut être stockée à l'aide d'un lit de roches ou galets, dans le sol, la brique, le sable, l'eau, l'huile ou l'air.

(Comparaison des volumes nécessaires au stockage d'une même quantité d'énergie) sel hydraté, air, pierres.

Ainsi, si à pression constante on réchauffe un corps solide ou liquide de masse m et de capacité thermique massique $c(T)$ de la température initiale T_1 , à la température finale T_2 , on peut stocker une quantité d'énergie donnée par sa variation d'enthalpie.

Cette quantité de chaleur est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\Delta H = H_{finale} - H_{initiale} = \int_{T_1}^{T_2} m \times C(T) dT \quad (II.1)$$

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de températures entre T_1 et T_2 ($C(T) = cte = C$) alors :

$$\Delta H = mc(T_1 - T_2) \quad (\text{II.2})$$

On remarque que la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température : ce type de stockage serait donc intéressant uniquement pour des grands écarts de température.

On distingue les deux cas suivants :

- si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud
- si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

Pour le stockage par chaleur sensible on utilise principalement des corps ayant des chaleurs spécifiques importantes comme par exemple des liquides tels que l'eau et des solides tels que des pierres.

On peut classer les supports de stockage de chaleur sensible comme suit :

- les supports de stockage liquide (eau, fluides à base d'huile, sel fondu, ...etc.)
- les supports de stockage solides (roches, les métaux et autres).

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

Matériaux	Densité Kg/m ³	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique volumique (J/m ³ .K)
Argile	1458	879	1.28
Brique	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

Tableau II.1 : Propriétés des matériaux de stockage par chaleur sensible à 20 °C [3].

II.2 – Stockage thermique latent (STL) [6].

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 pas 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.

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

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

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

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

$$Q = m(h_f - h_i) = mC_p(T_f - T_i) + m\Delta h_f(J) \quad (II.4)$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée figure 1.1. 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 T_f est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température T_1 à la température T_2 , avec $T_1 \leq T_f \leq T_2$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_f} mC_s(T)dT + mL + \int_{T_f}^{T_2} mC_L(T)dT \quad (II.5)$$

$C_s(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état solide.

$C_L(T)$: chaleur spécifique du corps à l'état liquide.

L : chaleur latente de changement de phase.

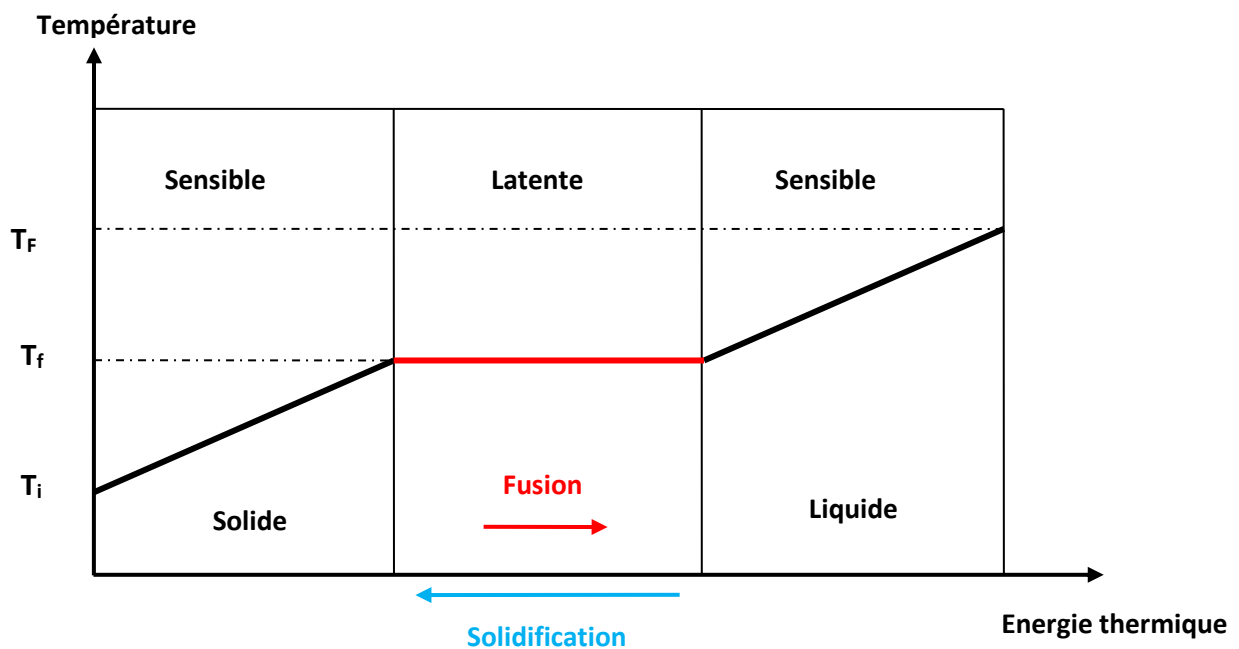


Figure.III.2.Evolution de la température d'un corps homogène avec changement de d'état[8].

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température (Figure.III.3), dans le cas d'un corps pur 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 (courbe a)

Dans le cas d'un mélange, la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe b) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion congruente (qui a le même comportement avec un corps pur).

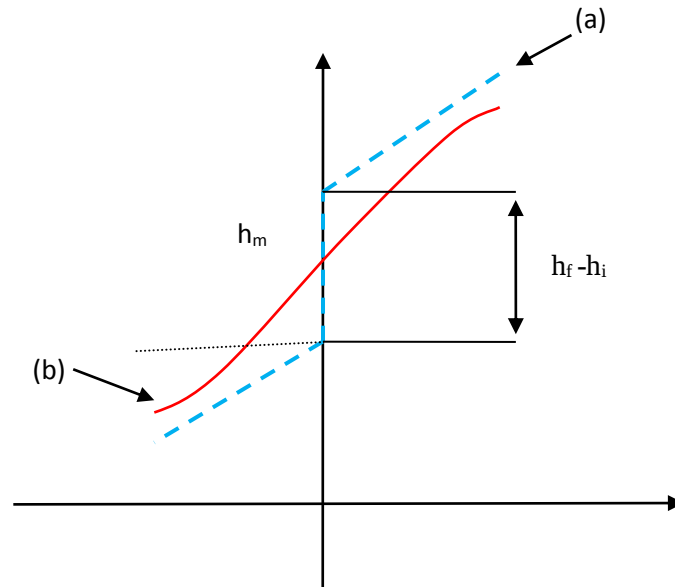


Figure.III.3.L'enthalpie spécifique en fonction de la température
Courbe(a) pour un corps pur, courbe(b) pour un mélange[8].

Les avantages de la chaleur latente :

- Des densités importantes de stockage.
- Une température de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.

II.3. Propriétés des matériaux à changement de phase

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

II.3.1- Critères thermodynamiques

Le matériau à changement de phase doit avoir :

- Une température de fusion dans la gamme de température souhaitée;
- Une chaleur latente par unité de masse élevée (une petite quantité du matériau doit pouvoir emmagasiner une grande quantité de chaleur);
- Une chaleur spécifique élevée de sorte que le matériau puisse disposer d'une chaleur sensible significative;
- Une fusion congruente;
- Une petite augmentation de volume pendant la phase de transition.

II.3.2- Critères cinétiques

Le matériau à changement de phase ne doit montrer ou presque pas de phénomène de surfusion.

Le matériau fondu doit se cristalliser à la température de solidification indiquée par les tables thermodynamiques.

II.3.3. Critères chimiques

Le matériau à changement de phase doit montrer:

- Une stabilité chimique;
- Aucune décomposition chimique de sorte qu'un système de stockage par chaleur latente soit fiable;
- Aucune action corrosive sur les matériaux de constructions ou sur leur contenant ;
Aussi le matériau ne doit pas être nocif; il doit être non inflammable et non explosif.

II.3.4- Critères économiques

Le matériau à changement de phase doit être:

- Disponible en grande quantité.
- A bon marché.

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

II.4. Classification des matériaux à changement de phase(MCP)

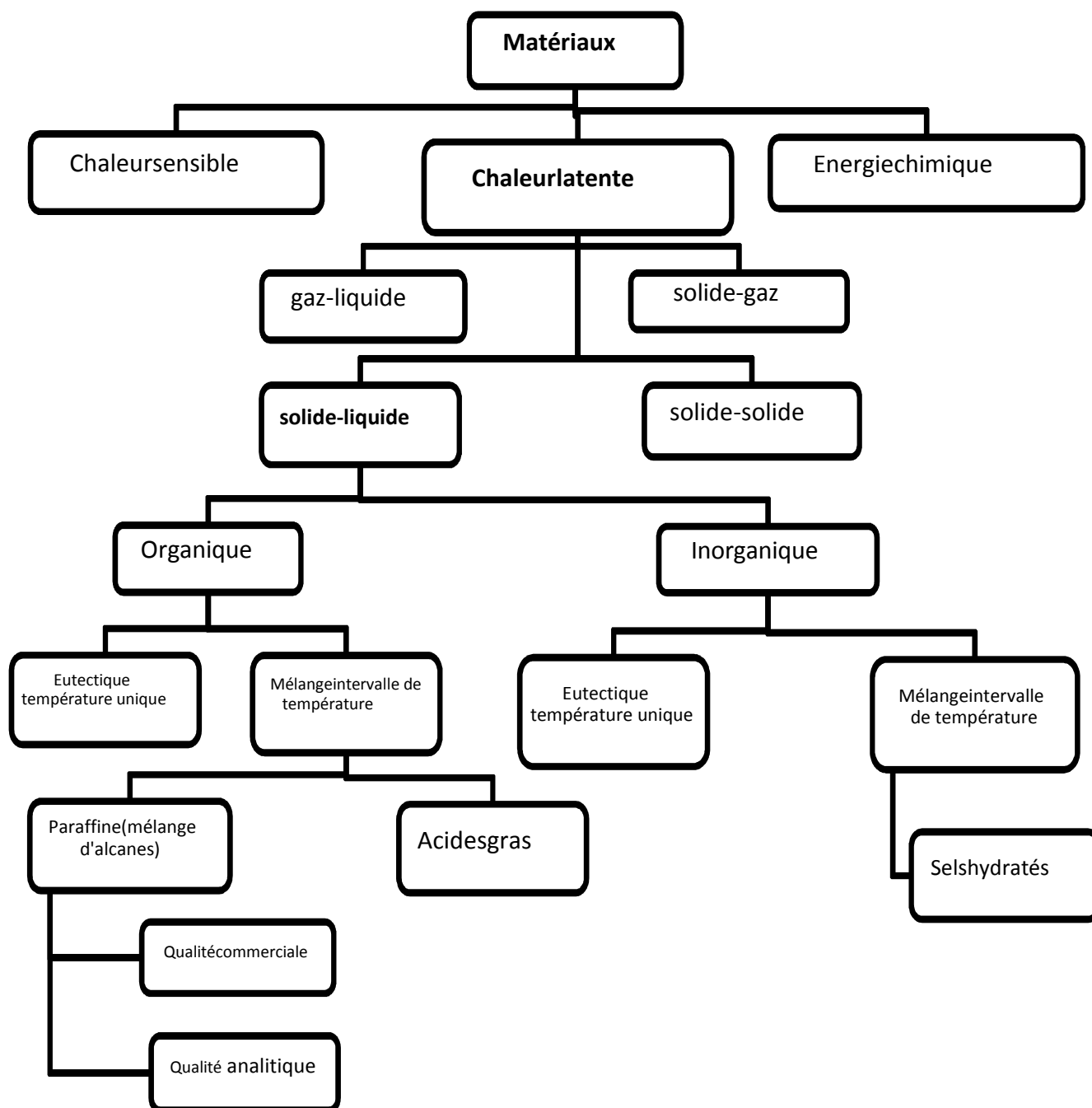


Figure II.4 classification des MCP [1].

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

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

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

On peut classer les MCP couramment utilisés selon trois catégories :

1. Les composés organiques: paraffines, corps non-paraffiniques, polyalcools.
2. Les composés inorganiques: hydrates salins, sels, métaux, alliages.
3. Les eutectiques de corps inorganiques et/ou organiques.

Les composés organiques et les composés inorganiques présentant des propriétés thermiques et chimiques très différentes qui affectent significativement la conception d'un système de stockage thermique pour une application donnée sont détaillés dans ce qui suit.

II.4.1. les composés organiques

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces

méthodes est l'utilisation de graphite expansé.

Des scientifiques ont signalé que le matériau composite MCP-graphite a une conductivité thermique 100 fois plus élevée que la paraffine pure

Certaines paraffines sélectionnées sont indiquées dans le tableau II.2 avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

Nombres d'atomes de carbone	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68	242
32	69.5	170
33	73.9	168
34	75.9	169

Tableau II.2 Propriétés thermophysiques des paraffines [1].

II.4.1.1. Avantages et inconvénients des paraffines :

- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg. Cette valeur est grande par rapport à celle des autres matériaux organiques dont la capacité thermique massique est de 2,1 kJ/kg.K. En tenant compte des deux valeurs (chaleur sensible et chaleur latente), on obtient une densité importante d'énergie de stockage. La capacité volumique de stockage de chaleur est 4-5 fois supérieure à celle de l'eau.
- La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation. En particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.
- Il n'y a pas de ségrégation de phase.
- Les cires paraffiniques sont inertes chimiquement (d'où le nom paraffine) avec presque

tous les matériaux (sauf certains plastiques ou le cuivre). Il y a donc peu de problèmes de corrosion avec les paraffines et leur conteneur. En effet, les cires paraffiniques sont utilisées pour protéger les matériaux de la corrosion (vernis de protection dans l'industrie automobile).

- Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes.

Elles sont non – toxiques et 100% recyclables.

- Quelques paraffines commerciales sont adaptées aux applications de l'énergie solaire.

Pour les applications dans les bâtiments, une paroi contenant 2cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 24cm.

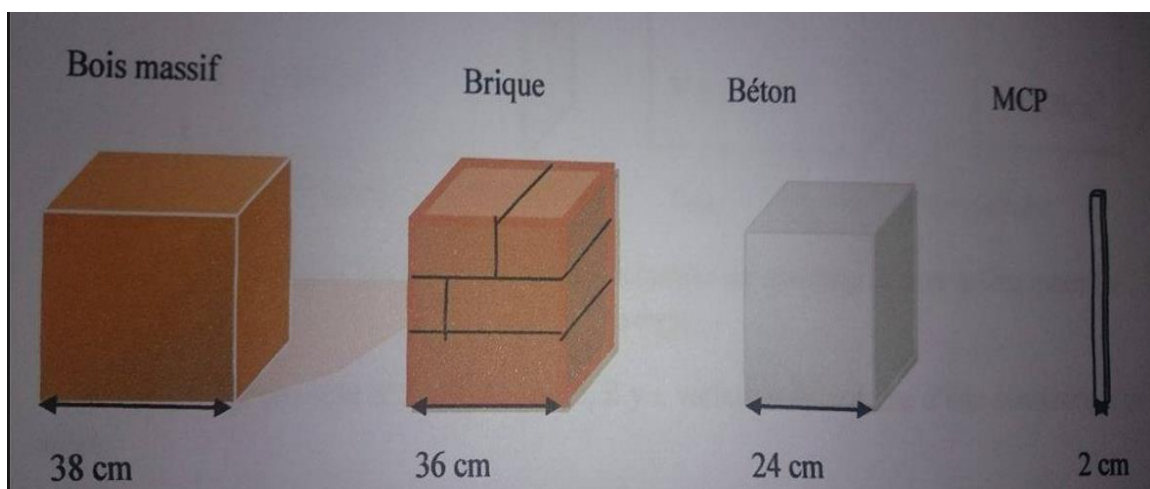


Figure II.5 : comparaison entre une paroi de paraffine et des parois d'autres matériaux. [10].

- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m³, et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m³. La dilatation volumique est donc environ 15 % pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.
- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnable. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. Par contre, les cires paraffiniques pures sont très coûteuses.

Les deux principaux inconvénients sont les suivants:

- Les cires paraffiniques présentent une très faible conductivité thermique (0,18 – 0,25 W/m.K), la moitié de celle des hydrates salins. Cette propriété diminue le taux de stockage/déstockage de la chaleur pendant les cycles fusion/solidification. Cette faible conductivité thermique qui est habituellement un handicap, bien que dans le transport de nourriture elle soit un avantage, peut être compensée par une grande surface d'échange ou par un conditionnement adapté.

Les cires paraffiniques sont facilement inflammables.

II.4.1.2.. Différentes cires paraffiniques :

	Paraffines			
	Tétradécane	Héxadécane	Octadécane	Eicosane
Formule	$C_{14}H_{30}$	$C_{16}H_{34}$	$C_{18}H_{38}$	$C_{20}H_{42}$
Température de fusion[°C]	5.5	16.7	28	36.7
Enthalpie de fusion [KJ/Kg]	226	237	244	247
Conductivité thermique [KJ/kg.°C]	0.15	0.15	0.15	0.15
Capacité thermique massique [KJ/Kg.°C]	2.07	2.11	2.116	2.21
Masse volumique solide [Kg/m]	825	835	814	856
Masse volumique liquide [Kg/m]	771	776	774	778
Retard à la solidification [°C]	Aucun	Négligeable	Négligeable	Aucun
Pression de vapeur [Pa]	133 à 75°C	133 à 105°C	133 à 75°C	133 à 100°C
Tension superficielle [N/m]	$27.4 \cdot 10^{-3}$	3.4	$27.4 \cdot 10^{-3}$	-
Viscosité [Cp]	2.1	-	3.4	-

Tableau II.3 Exemples de propriétés physiques de paraffines[10].

II.4.1.3. Conditionnement des paraffines :

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

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

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

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

II.4.1.4. Les composés organiques non-paraffiniques :

Il s'agit de la plus importante catégorie de matériaux aptes pour le stockage de la chaleur latente. Les composés organiques non-paraffiniques sont les MCP les plus nombreux, avec des propriétés très variées. Chacun de ces matériaux possède ses propres propriétés, contrairement aux paraffines qui ont des propriétés très similaires. Ces matériaux sont inflammables et ne devraient donc pas être exposés aux trop hautes températures, aux flammes ou aux agents oxydants.

Dans le tableau II.4 des composés organiques non-paraffiniques sont donnés à titre d'exemple avec des propriétés thermophysiques.

Matériaux	Poin t de fusio n (°C)	Chaleur latent de fusion (kJ/kg)
Acide formique	7.8	247
Acide caprylique	16.3	149
glycérine	17.9	198.7
Acide D-lactique	26	184
Méthylepalmitate	29	205
Camphénol	39	205
Docosyl bromide	40	201
Caprylone	40	259
Phénol	41	120
Heptadécane	41	201
1-Cyclohexyloctadécane	41	218
4-Heptadécane	41	197

Tableau II.4 Propriétés thermophysiques des matières organiques non paraffiniques [10].

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

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

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- forte chaleur de fusion,

- inflammabilité,
- faible conductivité thermique
- niveau variable de toxicité
- instabilité à haute température.

Certains acides gras jugés d'intérêt pour les applications de stockage d'énergie thermique à basse température sont représentés avec leurs propriétés thermophysiques dans le tableau II.5.

Les acides gras ont de fortes chaleurs de fusion comparables à celles des paraffines. Ils montrent également un processus de fusion/cristallisation réversible avec aucune surfusion.

Matériaux	Formule	Point de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (KJ/Kg)
Acide acétique	CH ₃ COOH	16.7	174
Polyéthylène glycol 600	H(OC ₂ H ₂) _n -OH	20-25	146
Acide caprique	CH ₃ (CH ₂) ₈ -COOH	36	152
Acide elaidique	C ₈ H ₇ C ₉ H ₁₆ -COOH	47	218
Acide laurique	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ -COOH	49	178
Acide pentadécanoïque	CH ₃ (CH ₂) ₁₃ -COOH	52.5	178
Tristéarine	(C ₁₇ H ₃₅ COO)C ₃ H ₅	56	191
Acide muristique	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ -COOH	58	199
Acide palmitique	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ -COOH	55	163
Acide stéarique	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ -COOH	69.4	199
Acétamide	CH ₃ CONH ₂	8.1	241
Fumarate de méthyle	(CH CO ₂ CNH ₃)	102	242

Tableau II.5 : Propriétés thermophysiques des acides gras[10].

II.4.2– les sels hydratés (matières non-organiques)

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale AB_nH₂O.

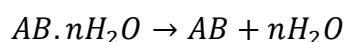
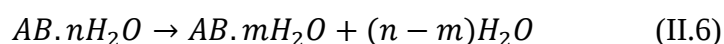
Les plus importantes propriétés des hydrates de sels sont les suivantes :

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

En dépit de ces propriétés, les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement et d'être corrosifs. Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase pour l'utilisation des hydrates de sels comme MCP sont l'addition d'un épaississant ou d'un agent de gélification de l'hydrate salin. Dans la première méthode, l'agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un polymère gel.

En outre, un agent de nucléation est ajouté pour éviter les phénomènes de surfusion.

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



II.4.2.1- Différents hydratessalins

Sur le tableau suivant [Tableau II.6], on donne un récapitulatif des principaux hydrates salins avec leurs caractéristiques.

hydrates salins	Température de fusion (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ/kg)
Sel de Glauber ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$)	32.4	252
Chlorure de calcium, hexa hydrate $CaCl_2 \cdot 6H_2O$	27-30	190
Acétate de sodium tri hydrate $Na CH_3 COOH \cdot 3H_2O$	58	170 à 264
Hydroxyde de Baryum octahydrate $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	78	301
$NH_4 \cdot Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	95	238.5
Phosphate de sodium, dodécahydrate $Na_3 \cdot PO_4 \cdot 12H_2O$	77	213
Pyrophosphate de sodium déca hydrate sous forme de capsules	70	184
Carbonate de calcium déca hydrate $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	32-35	247
Nitrate de calcium tétra hydrate $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	40-43	140

Tableau II.6 .Différents hydrates salins[10].

II.4.3.les eutectiques

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

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

Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques –inorganiques.

Sur le tableau II.7, on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Eutectiques Inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
$49.3\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 50.7\% \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	132.3
$61.5\% \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 38.5\% \text{NH}_4\text{NO}_3$	51	131.1
$58.3\% \text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 41.7\% \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	106
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{CaBr}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	14	140
Eutectique Organique		
Acides Caprique-Laurique	18	120
Acides Palmitique-Laurique	33	145
Acides Stéarique-Laurique	34	150

Tableau II.7- Liste de quelques Eutectiques [10].

II.5. Les matériaux composites :

Introduction

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et anisotropes.

Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

II.5.1. Les renforts

II.5.1.1. Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir du sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :



E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

R : pour les composites haute performance;

D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

II.5.1.2 Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.



II.5.1.3. Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

II.5.1.4. Fibre de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

II.5.1.5. Caractéristiques moyennes des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (Mpa)	Module de cisaillement (Mpa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	?	E	G	?	s_r	A	a
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0.5 \cdot 10^{-5}$
Verre R	10	2 500	86 000		0.2	3 200	4	$0.3 \cdot 10^{-5}$
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0.08 \cdot 10^{-5}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	$0.02 \cdot 10^{-5}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$-0.2 \cdot 10^{-5}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0.8	$0.4 \cdot 10^{-5}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1.5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

Tableau II.8- Caractéristiques moyennes des renforts [18].

II.5.2. Les charges

On désigne sous le nom général de **charge** toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini.

II.5.2.1. Les silices

La silice (SiO_2), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules.

Son incorporation dans la résine améliore les propriétés diélectriques, la résistance à la chaleur et à l'humidité des objets moulés

On constate également l'augmentation de la température de transition vitreuse, du module d'Young et de la résistance en compression, ainsi que la réduction du gonflement dans les solvants.

II.5.2.2. Les argiles et alumino-silicates

Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la **silice** (42 à 70 %) et de l'**alumine** (14 à 45 %).

Le kaolin contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau.

Comparé aux fibres de verre, il confère une moins bonne résistance aux chocs ; mélangé avec celles-ci, il permet une réduction des coûts.

II.5.2.3. Le verre

II.5.2.3.1. Poudres de verre

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13 μm est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées

II.5.2.4. Le carbone

II.5.2.4.1. Le noir de carbone

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant, pigment, barrière anti-UV, antioxydant.

Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules. Par contre, la conductivité électrique des matériaux chargés augmente avec le taux de carbone et avec la finesse des particules.

II.5.3. Les matrices

Est une matière servant de liant et à transférer les efforts au renfort (fibres, billes, microsphères, etc.), qui est plus rigide et plus

CHAPITRE III

Types et classification des échangeurs de chaleur

Introduction :

Dans les sociétés industrielles, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie. Une grande part (90 %) de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ces procédés. On les utilise principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.). Le choix d'un échangeur de chaleur, pour une application donnée, dépend de nombreux paramètres : domaine de température et de pression des fluides, propriétés physiques et agressivité de ces fluides, maintenance et encombrement. Il est évident que le fait de disposer d'un échangeur bien adapté, bien dimensionné, bien réalisé et bien utilisé permet un gain de rendement et d'énergie des procédés.

III.1 Type des échangeurs de chaleur

III.1.1 Les échangeurs tubulaires

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant les tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories suivant le nombre de tubes et leur arrangement, toujours réalisés pour avoir la meilleure efficacité possible pour une utilisation donnée [17].

III.1.1.1 Échangeur monotube

Dans lequel le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín comme montré sur à la figure ci-dessous.



Figure III.1: Échangeur monotube en serpentín [17].

Chapitre III : généralités sur les échangeurs de chaleur

III.1.1.2 Échangeur coaxial

Dans lequel les tubes sont le plus souvent cintrés ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur comme montré sur la figure ci-dessous.

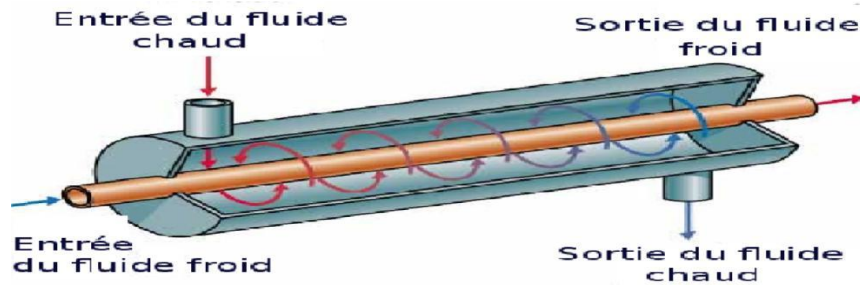


Figure III.2: Échangeur coaxial [17].

III.1.2 Échangeur multitubulaire

Existant sous quatre formes :

III.1.2.1 Échangeur à tubes séparés

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm) maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé [17].

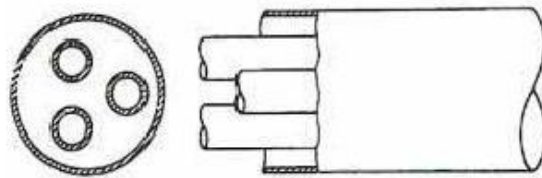


Figure III.3: Échangeur à tube séparé [17].

III.1.2.2 Échangeur à tubes rapprochés

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans [1].

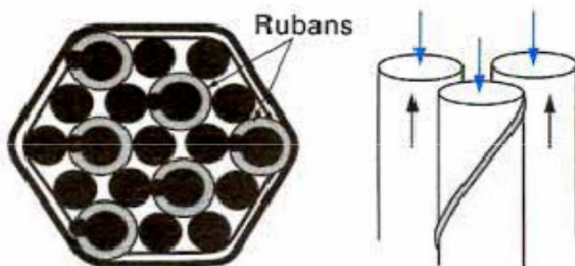


Figure III.4: Échangeur à tube rapproché [17].

III.1.2.3 Échangeur à tubes ailettes

Ces tubes permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique ; différents types d'ailettes sont toutefois présentées ci-dessous.

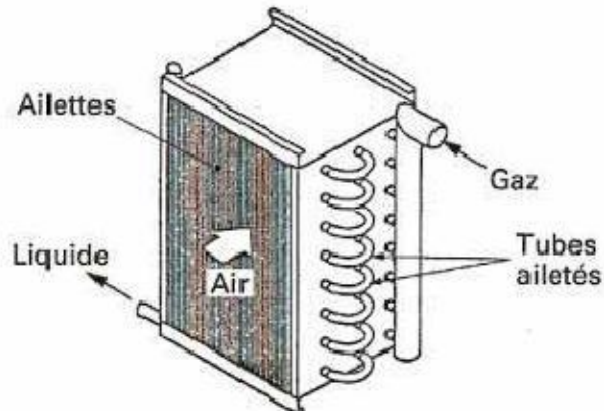
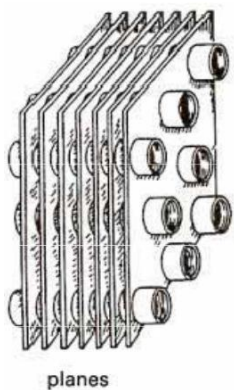
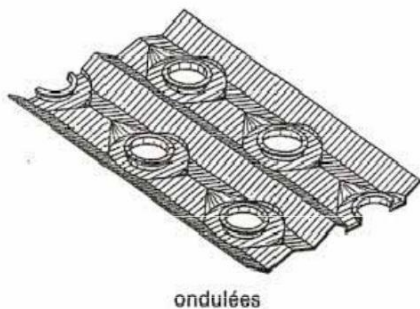


Figure III.5: Échangeur à tube ailette [17].

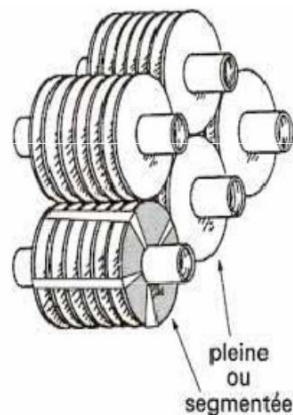
•Ailettes transversales :



planes



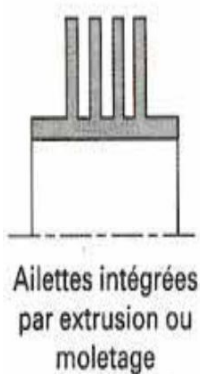
ondulées



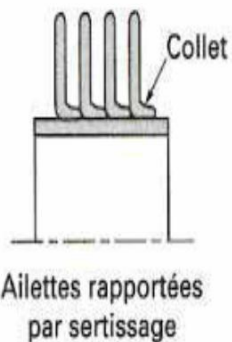
pleine
ou
segmentée

Ailettes continues [17].

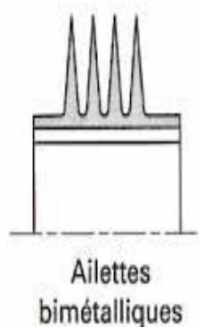
Ailettes indépendantes [17].



Ailettes intégrées
par extrusion ou
moletage



Ailettes rapportées
par sertissage

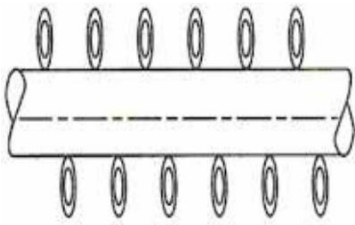


Ailettes
bimétalliques

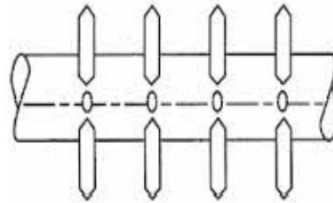
Ailettes annulaires [17].



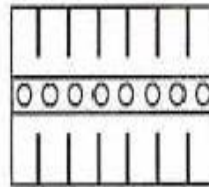
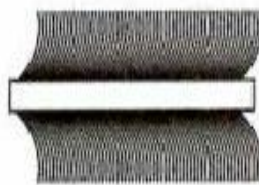
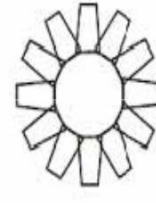
Ailettes spirales [17].



Ailettes à fils préformés [17].

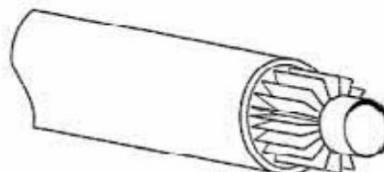
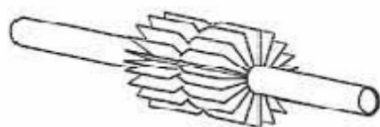
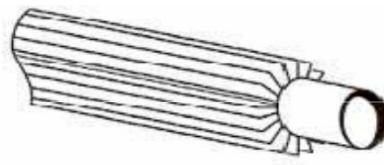


Ailettes poinçonnées [17].



Ailettes en brosse [17].

- Ailettes longitudinales :



Type d'ailettes longitudinal.

Figure III.6: Autre différent type d'ailettes [17].

III.1.3. Echangeur à plaques

III.1.3.1 Échangeurs à surface primaire

Les échangeurs à surface primaire sont constitués de plaques corruguées, nervurées ou picotées. Le dessin du profil de plaques peut être assez varié mais il a toujours un double rôle d'intensification du transfert de chaleur et de tenue à la pression par multiplication des points de contact.

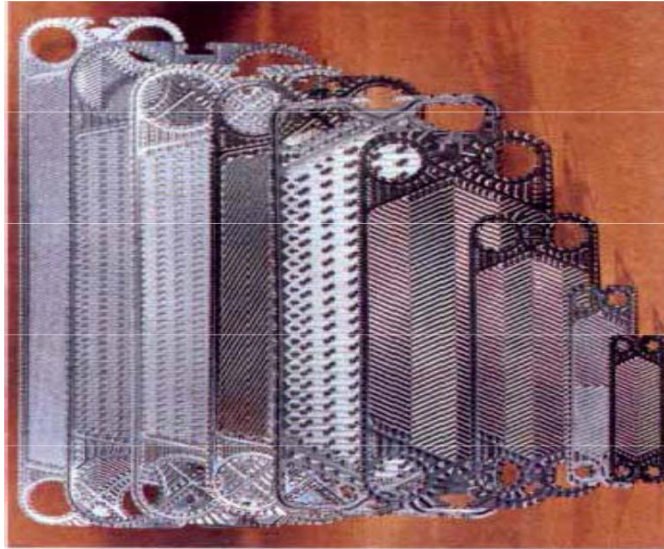


Figure III.7: Différentes géométries de plaques d'échangeurs à surface primaire [17].

III.2 Classification des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. On cite les plus importants.

III.2.1 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
- autres types : contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.

III.2.2 Classement suivant le mode de transfert de chaleur

Les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) sont couplés dans la plupart des applications (chambre de combustion, récupération sur les fumées, etc.) ; il y a

Chapitre III : généralités sur les échangeurs de chaleur

souvent un mode de transfert prédominant. Pour tout échangeur avec transfert de chaleur à travers une paroi, la conduction intervient [1].

III.2.2.1. Modes de transfert de chaleur

Le transfert d'énergie thermique est une transmission de cette énergie d'une région à une autre, sous l'influence d'une différence de températures. On reconnaît classiquement trois modes de transmissions de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement

III.2.2.1.1. Transfert de chaleur par conduction :

Dans la transmission par conduction la chaleur se diffuse de proche en proche d'une particule à l'autre grâce aux vibrations des atomes ou des molécules et des mouvements des électrons ; ce mode de transfert nécessite donc une présence de matière, mais sans déplacements macroscopiques de celles-ci. Le transfert de chaleur par conduction est régi par la loi de Fourier, établie expérimentalement pour le cas d'un transfert unidirectionnel d'un corps solide indéformable.

$$dq = -\lambda S \frac{dT}{dx} dt$$

Où λ la conductivité thermique du matériau
Le flux de chaleur s'écrit alors :

$$\Phi = \frac{dq}{dt} = -\lambda S \frac{dT}{dx}$$

La densité du flux s'exprime par :

$$\varphi = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

III.2.2.1.2. Transfert de chaleur par convection :

En ce qui concerne la convection, le transfert de chaleur se fait par le mouvement des fluides, sous l'effet d'une variation d'une température ou d'une force extérieure : dans le premier cas il s'agit d'une convection naturelle et dans le second d'une convection forcée. ce mode de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\Phi = h S (T_p - T_\infty)$$

h : Coefficient d'échange convectif

S : Surface d'échange en contact avec le fluide

T_p : Température de la paroi

T_∞ : Température loin de la paroi

III.2.2.1.3. Transfert de chaleur par Rayonnement :

Le rayonnement est le seul mode qui ne nécessite pas de supports matériels il peut avoir lieu entre deux corps placés dans le vide. Des ondes électromagnétiques véhiculent leur chaleur, cette puissance est évaluée par la loi de Stephan Boltzmann

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

Où ε est l'émissivité de la surface

σ est la constante de Stephan Boltzmann.

Après avoir défini les modes de transfert de chaleur, nous passons à un cas pratique (les échangeurs de chaleur) où ces différents modes de transfert de chaleur peuvent coexister à la fois.

Chapitre III : généralités sur les échangeurs de chaleur

Cependant les échangeurs radiatifs n'interviennent que très rarement dans les échangeurs de chaleurs

III.2.3 Classement suivant le procédé de transfert de chaleur

Suivant qu'il y a ou non stockage de chaleur, on définit un fonctionnement en récupérateur ou en régénérateur de chaleur :

- transfert sans stockage, donc en récupérateur, avec 2 ou n passages et un écoulement en général continu ;
- transfert avec stockage, donc en régénérateur, avec un seul passage et un écoulement intermittent, la matrice de stockage étant statique ou dynamique.

III.2.4 Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les différents cas suivants :

- les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- un seul fluide à un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapo-condenseurs.

III.2.5 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

- les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

III.3. Etude thermique d'un échangeur

III.3.1. Résistance et conductance thermique

Ce calcul fait appel aux concepts déjà vus en transfert de chaleur. Entre deux domaines respectivement à la température T_1 et T_2 , le flux transite dans un tube. La densité du flux entre ces deux domaines est égal à $(T_1 - T_2) / R$, R étant la résistance thermique entre ces deux domaines.

En conduction pure, la résistance thermique entre deux plans parallèles de surface dS est

$$\frac{e}{\lambda} \cdot dS \quad ,$$

Chapitre III : généralités sur les échangeurs de chaleur

Alors que pour un tube de longueur dx et de rayons extérieur r_2 et intérieur r_1 , cette résistance thermique s'écrit :

$$\frac{1}{2\pi\lambda dx} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

En convection cette résistance thermique pour une surface dS a pour expression

$$\frac{1}{hdS}$$

Dans les échangeurs, nous avons simultanément des transferts par conduction et par convection. Les différentes résistances étant en série, il suffit d'additionner toutes les résistances mises en jeu.

Par exemple, pour une plaque plane (épaisseur e , conductivité λ) séparant deux fluides 1 et 2 dont les coefficients d'échanges superficiels sont respectivement h_1 et h_2 , la résistance mise en jeu pour une surface dS est alors :

$$dR_T = \frac{1}{dS} \left(\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_2 r_2} \right)$$

De même, pour un tube de longueur dx , de rayons extérieur r_2 et intérieur r_1 , cette résistance devient

$$dR_T = \frac{1}{2\pi dx} \left(\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_2 r_2} \right)$$

Remarque : Pour des raisons de commodité, on utilise souvent pour les problèmes plans la notion de résistance surfacique et surtout son inverse la conductance surfacique :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}$$

et pour les problèmes cylindriques la notion de résistance linéique et encore plus couramment la conductance linéique:

$$K = 2\pi \frac{1}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_2 r_2}}$$

Si la plaque ou le tube est constitué de plusieurs matériaux, il suffit d'additionner toutes les résistances de ces matériaux.

III.3.2 Efficacité d'un échangeur

L'efficacité d'un échangeur, notion similaire à celle d'un rendement, est très utile pour caractériser la qualité d'un échangeur.

Lorsque l'on cherche à transférer de l'énergie d'un fluide vers un autre, l'échangeur idéal est celui qui permet l'échange maximum.

Par exemple, si le fluide chaud pénètre à la température T_{ce} , l'idéal serait qu'il sorte de l'échangeur à la température d'entrée du fluide froid T_{fe} .

L'efficacité d'un échangeur est alors défini par :

$$E = \frac{\text{Puissance thermique réellement échangée}}{\text{Puissance maximale échangeable}} = \frac{\Phi_{réel}}{\Phi_{max}}$$

Conclusion

Vu l'importance industrielles des échangeurs de chaleur, il existe une diversité de différents types d'échangeurs de chaleur qui ont de nombreuses applications dans les différents domaines.

On s'intéresse dans cette étude aux échangeurs à plaques et joints qui sont très utilisés dans le domaine géothermique. Le chapitre suivant explique ces échangeurs en détails.

CHAPITRE IV

Partie Expérimentale

IV.1 Introduction :

Le stockage de l'énergie thermique par chaleur latente est largement utilisé dans le secteur du bâtiment en raison de la capacité de stockage élevée à température constante dans un volume réduit de matériau de construction. Le stockage se fait par l'intermédiaire d'un matériau dit à changement de phases (MCP).

Notre projet a pour objectif de réaliser un composite à base de paraffine, silice et de graphite afin de l'utiliser dans l'étude de stockage de l'énergie thermique.

Ce chapitre est devisé en deux parties

Partie 1 : élaboration du composite

Partie 2 : réalisation de l'échangeur

IV.2 Elaboration du composite

Matériaux utilisés :

Le matériau à changement de phase utilisé est la paraffine, la silice est utilisée comme matrice et le graphite pour améliorer la conductivité thermique du composite.

IV.2.1 La paraffine :

Il s'agit d'un distillat obtenu lors du procédé de raffinage du pétrole (figure IV.1), on en distingue trois types (liquide, huileuse, solide). Cela dépend de la composition chimique.



Figure IV.1 : La Paraffine à l'état solide[2].

Le choix de ce matériau revient à sa basse température de fusion (60-70) qui est acceptable pour notre étude (tableau II.1).

Tableau IV.1 : Propriétés chimiques et physiques de la Paraffine[2].

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule brute : C_nH_{2n+2}	T° de fusion : 65°C (± 5) Masse volumique : 0.90 g.cm ⁻³

IV.2.2 La silice :

Le dioxyde de silicium est un composé chimique (figure II.2), constitué d'une proportion d'un atome de silicium pour deux atomes d'oxygène et dont la formule peut s'écrire SiO_2 et existe sous différentes formes ; amorphes ou cristallines.



Figure IV.2: La Silice.

Le tableau VI.2 montre les propriétés chimiques et physiques de la Silice.

Tableau IV.2 : Les propriétés chimiques et physiques de la Silice [2].

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule brute : SiO_2 Masse molaire : $60.0843 \pm 0.0009 \text{ g/mol}$ O : 53.26% Si : 46.74%	T° de fusion : $1650^\circ\text{C} (\pm 75^\circ\text{C})$ T° d'ébullition : 2230°C Solubilité : 0.12 g/mol

Préparation de la silice en poudre :

La silice (figure IV.3) est tout d'abord broyée puis tamisée jusqu'à obtenir une poudre très fine (figure IV.4).



Figure IV.3: Grains de silice.

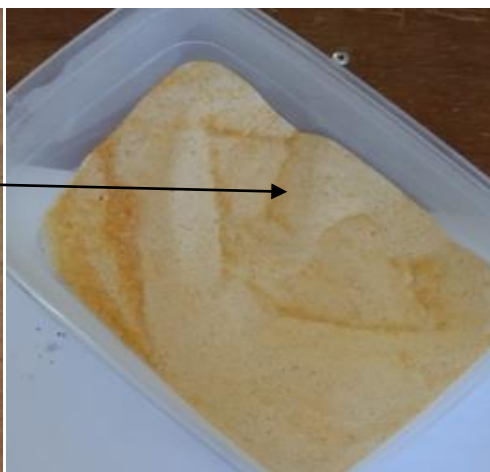


Figure IV.4: Poudre de silice.

VI.2.3 Le graphite :

Le graphite (figure VI.5) est une espèce minérale qui est, avec le diamant, la chaoite, l'un des allotropes naturels du carbone. Sa formule chimique est «C» (tableau II.3), mais les formes natives permettent de retrouver des traces d'hydrogène «H», d'azote «N», d'oxygène «O», de silicium «Si», d'aluminium «Al», de fer «Fe» ou encore d'argile.

Tableau IV.3: Propriétés chimiques et physiques du graphite.

Propriétés chimiques	Propriétés physiques
Formule chimique : C Masse volumique : 2,09–2,23 g·cm ⁻³	Température de fusion : 3550°C

On trouve cette matière chez le groupe (A-L-D-I-M société algérienne d'outils diamantés) qui est spécialisé dans la fabrication des outils de forages. Après avoir tamisé plusieurs fois, on a eu une poudre fine de graphite.



Figure IV.5: Le graphite.

VI.3 Préparation du composite

Pour la préparation du composite on commence par :

- Pesée des différents composants (silice, paraffine, graphite) avec la balance électronique. La proportion en masse de paraffine a été modifiée de 90% à 60% pendant la préparation du composite de façon à ne pas avoir de fuite de MCP lors du processus de fusion.
- Mélange de ces trois éléments de façon homogène (figure IV.6) et chauffage jusqu'à la fusion dans un bain marie (figure IV.7).
- Versée du mélange homogène dans un moule afin d'obtenir des cylindres creux.
- Remplissage des cannettes.

Tableau IV.4 : Différents pourcentages en masse des constituants

N°	Matrice	MCP	Graphite	Composite
1	5%	90%	5%	Si 5, Pa 90, Gr 5
2	10%	80%	10%	Si 10, Pa 80, Gr 10
3	15%	70%	15%	Si 15, Pa 70, Gr 15
4	20%	60%	20%	Si 20, Pa 60, Gr 20



Figure IV.6: Mélanges des trois éléments. **Figure IV.7:** La fonte des trois éléments.

➤ *Le Moulage :*

Le moule : afin de remplir les cannettes avec le MCP, on commence d'abord à usiner un moule, qui prend les dimensions des cannettes, il est en aluminium et composé de trois parties :

Partie basse du moule, c'est elle qui reçoit le MCP. En fusion à l'aide de la 2^{ème} partie englobe le MCP. 3^{ème} partie : c'est la partie mobile qui compresse le tout et finit le moule.

La quantité théorique utilisée : après que le choix des cannettes soit fait, on procède au calcul des masses de matériaux à utiliser.

Après avoir conçu un moule de forme cylindrique creux, on procède au moulage (figure IV.8).



Figure IV.8: Le moulage du composite.

Après moulage, on procède au démoulage (figure IV.9).

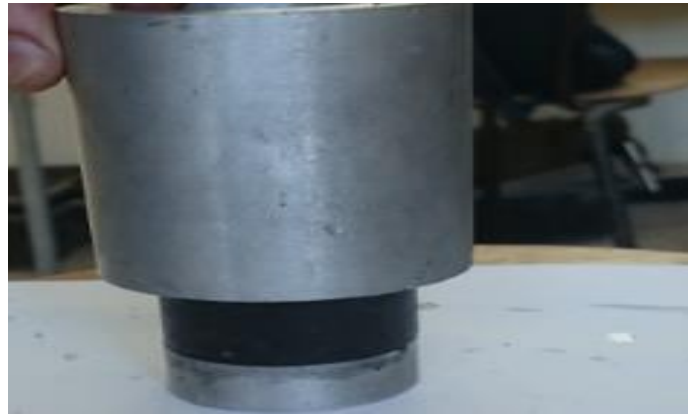


Figure IV.9: Démoulage du composite.

Le résultat du démoulage est illustré sur la figure IV.10.



Figure IV.10: Résultat du démoulage en forme de cylindre creux.

IV.4 Réalisation de l'échangeur

C'est la partie mécanique du projet qui consiste à réaliser un échangeur de chaleur en cuivre (conductivité thermique élevée).

- En premier lieu, nous commençons par la fabrication des collecteurs d'eau.
 - Nous avons utilisé des boîtes en cuivre de forme parallélépipède rectangle de dimensions (43.5cmX8cmX5.5cm).
 - Nous avons réalisé des trous à pas équidistants tout le long de l'aire de la base de la boîte à l'aide d'une perceuse (figure IV.11)



Figure IV.11: Perçage des collecteurs d'eau.

Une fois le perçage achevé, nous sommes passés à la soudure des tubes et la partie basse du collecteur (figure IV.12).



Figure IV.12: Soudure des tubes.

- En deuxième lieu, nous avons procédé au remplissage des cannettes avec le composite que nous avons précédemment élaboré.

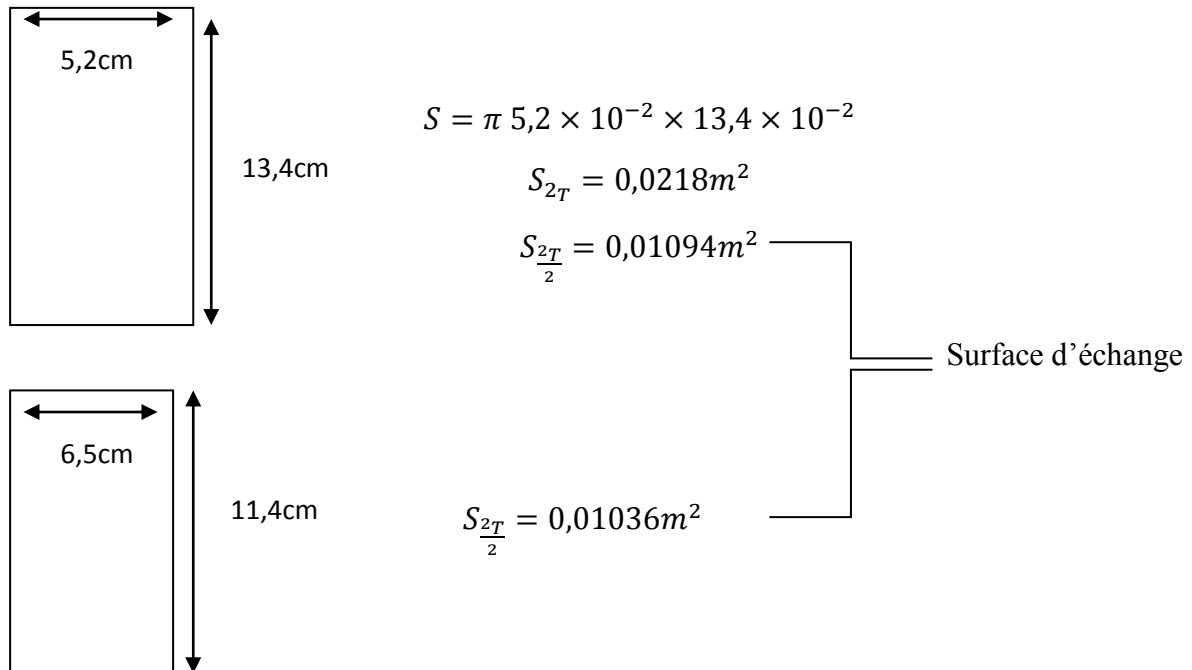
Les cannettes sont percées selon le diamètre du tube et peintes de couleur noire (figure IV.13). La masse du MCP utilisée est la même pour toutes les cannettes (200 à 210g)

Le choix des cannettes :

On a deux modèles de cannettes.

Chapitre IV : partie expérimentale

La 1^{ère} étape consiste à calculer la surface d'échange pour les mêmes surfaces donnée de cannettes



Surface d'échange pour les cannettes N°1:

$$S = 0,01036 \times 26,8 = 0,2776 m^2$$

Surface d'échange pour les cannettes N°2 :

$$S = 0,01093 \times 28,5 = 0,31179 m^2$$

➤ La surface d'échange est plus importante pour les cannettes N°2.

La surface sur le volume :

Volume cannette 2 :

$$V = 2,90 \times 10^{-4} m^3$$

Volume cannette 1 :

$$V = 3,58 \times 10^{-4} m^3$$

Sachant qu'on a soustrait le volume du tube qui passe à l'intérieur des cannettes.

Le rapport S/V :

✓ Pour cannette N°1:

$$\frac{S}{V} = \frac{0,01036}{3,5814 \times 10^{-4}} = 28,92 m^{-1}$$

✓ Pour cannette N°2 :

Chapitre IV : partie expérimentale

$$\frac{S}{V} = \frac{0,01094}{2,6089 \times 10^{-4}} = 40,68 \text{ m}^{-1}$$

Le rapport surface/volume représente la capacité d'échanger l'énergie thermique entre les parois.



Figure IV.13: Cannelles percées et peintes.

L'étape suivante consiste à coller les cannettes de façon à obtenir 6 lignes sur 7 colonnes (FigureIV.14).



Figure IV.14: Collage des cannettes.

Après avoir collé les cannettes entre elles pour faire un conduit, on rassemble tout le squelette du collecteur comme indiqué sur la figure IV.15 ci-dessous.



Figure IV.15: Collecteur de chaleur fini.

IV.5.Réalisation du boîtier :

Pour la réalisation de celui-ci (figure IV.16), nous avons utilisé du bois de récupération.



Figure IV.16: Boitier en bois.

Afin de diminuer les pertes de chaleur, on isole le boitier avec du polystyrène (figure II.17).



Figure IV.17: Boitier isolé avec du polystyrène.

On couvre le tout avec du papier aluminium pour refléter l'rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur (figure IV.18).



Figure IV.18: Boitier couvert avec du papier aluminium.

IV.6.Réalisation des réflecteurs

Pour cela, nous avons fabriqué un cadre en bois que nous avons couvert avec du papier aluminium (figure IV.19).



Figure IV.19:Réflecteur solaire.

IV.7. Assemblage :

Après avoir fini avec la réalisation des différents éléments, nous sommes passés à l'assemblage de tous les éléments qui s'est fait en parties.

- Assemblage du boîtier et l'échangeur (figure IV.20).



Figure IV.20: L'assemblage du boîtier et de l'échangeur.

- Réalisation d'un vitrage afin de créer l'effet de serre et le faire monter sur le boîtier (figure IV.21).



Figure IV.21: Boîtier avec vitre.

Chapitre IV : partie expérimentale

- Assemblage du boîtier vitré et des réflecteurs (figure IV.22).

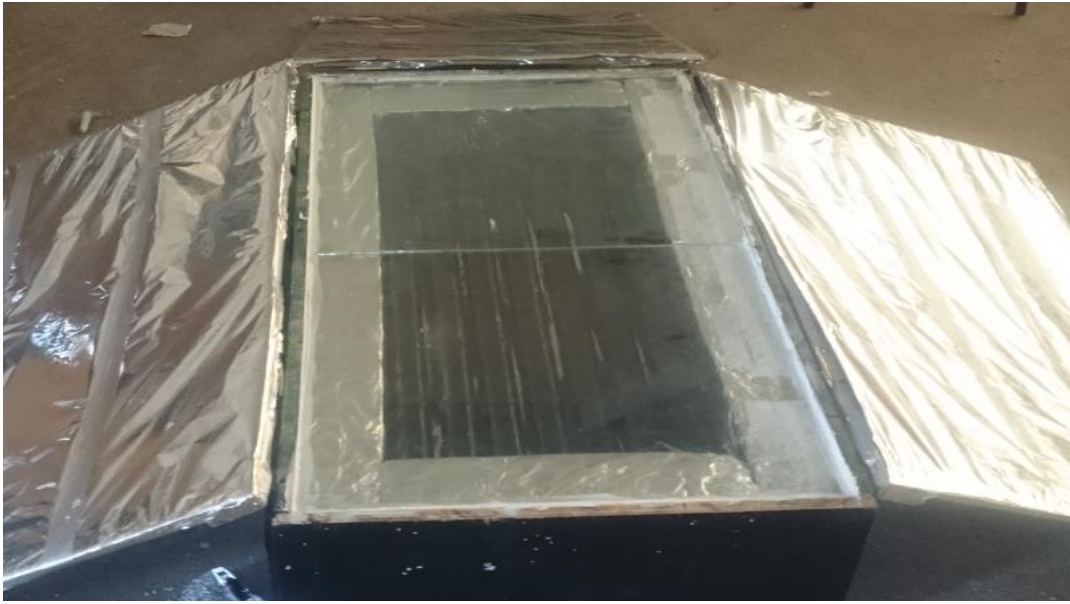


Figure IV.22: Boîtier vitré avec réflecteurs.

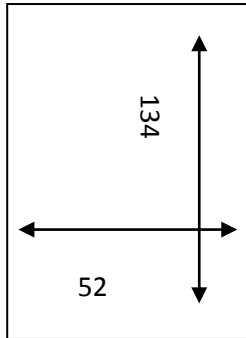
- La mise en forme finale du prototype est montrée sur la figure IV.23.



Figure IV.23: Prototype achevé.

Chapitre IV : partie expérimentale

La quantité théorique utilisée : après que le choix des cannettes soit fait, on procède au calcul des matériaux utilisés.



Calcul du volume :

$$V_C = 2,46 \times 10^{-4} m^3$$

$$V_t = 2,73 \times 10^{-5} m^3$$

$$V_{eC} = 2,18 \times 10^{-4} m^3$$

Etant donné que :

V_C est le volume de la cannette

V_t est le volume du tube en cuivre

V_{eC} est le volume de la cannette sans le volume du tube

Les matériaux qu'on a utilisés sont :

Paraffine $\rho_P = 900 \text{ kg/m}^3$

Graphite $\rho_G = 2160 \text{ kg/m}^3$

Silice $\rho_S = 2650 \text{ kg/m}^3$

Sachant que les pourcentages des matériaux sont comme suit :

60% Pr, 20% Gr, 20% Si.

$$\rho_t = \frac{60 \text{ Pr} + 20 \text{ Gr} + 20 \text{ Si}}{100} = 1502 \text{ kg/m}^3$$

La quantité théorique des matériaux utilisée est estimée à 13,79kg :

$$\text{Pr} = 0,6 \times 13,79 = 8,274 \text{ kg}$$

$$\text{Gr} = 0,2 \times 13,79 = 2,758 \text{ kg}$$

$$\text{Si} = 0,2 \times 13,79 = 2,758 \text{ kg}$$

La quantité des matériaux utilisée pour l'élaboration des composites MCP est estimée à 10,44kg.

$$\text{Pr} = 0,6 \times 10,44 = 6,26 \text{ kg}$$

$$\text{Gr} = 0,2 \times 10,44 = 2,08 \text{ kg}$$

$$\text{Si} = 0,2 \times 10,44 = 2,08 \text{ kg}$$

CHAPITRE V

Résultats et discussions

Chapitre V : résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des tests effectués sur le panneau solaire.

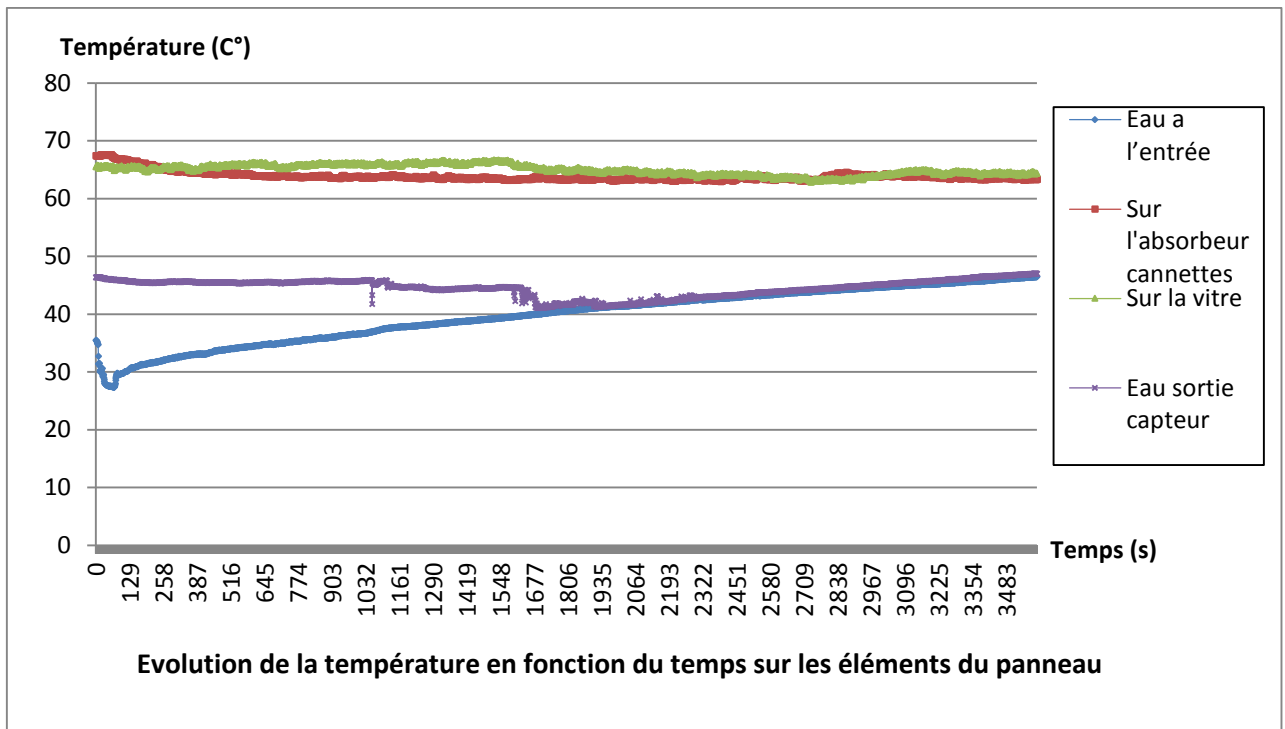
Tableau « 1 » représente les Résultats des tests effectués sur le concentrateur solaire pour une période d'une heure, le 10 juillet 2016 de 12h :00mn à 13h :00mn

Temps (s)	Eau à l'entrée (°C)	Sur l'absorbeur cannettes (°C)	Sur la vitre (°C)	Eau à la sortie du capteur (°C)
1	35,48	67,47	65,55	46,41
100	29,73	66,81	65,39	45,85
200	31,48	65,78	65,01	45,47
300	32,4	64,8	65,54	45,6
400	33,14	64,44	65,6	45,44
500	33,87	64,39	65,79	45,52
600	34,45	64,03	66,22	45,45
700	34,94	63,96	65,37	45,47
800	35,57	63,8	65,9	45,64
900	36,02	63,61	66	45,73
1000	36,57	63,79	65,96	45,7
1100	37,45	63,9	66,2	45,77
1200	37,88	63,64	66,25	44,71
1300	38,28	63,65	66,07	44,25
1400	38,74	63,54	66,18	44,4
1500	39,14	63,48	66,24	44,5
1600	39,57	63,25	65,86	43,19
1700	40,07	63,63	65,24	41,15
1800	40,58	63,4	64,65	41,69
1900	41,03	63,39	64,91	42,1
2000	41,36	63,34	64,77	41,61
2100	41,69	63,54	64,81	41,92
2200	42,08	63,19	64,42	42,33
2300	42,49	63,46	63,62	42,83
2400	42,77	63,29	64,31	43,18
2500	43,12	63,58	64,11	43,54
2600	43,41	63,34	63,44	43,89
2700	43,79	63,2	63,43	44,19
2800	44,08	63,56	63,5	44,48
2900	44,36	64,09	63,5	44,79
3000	44,65	63,82	64,05	45,1
3100	44,97	63,82	64,82	45,48
3200	45,17	63,71	64,75	45,75
3300	45,49	63,65	64,81	46,09
3400	45,77	63,36	64,52	46,51
3500	46,17	63,47	64,65	46,74
3600	46,5	63,35	64,36	47,04

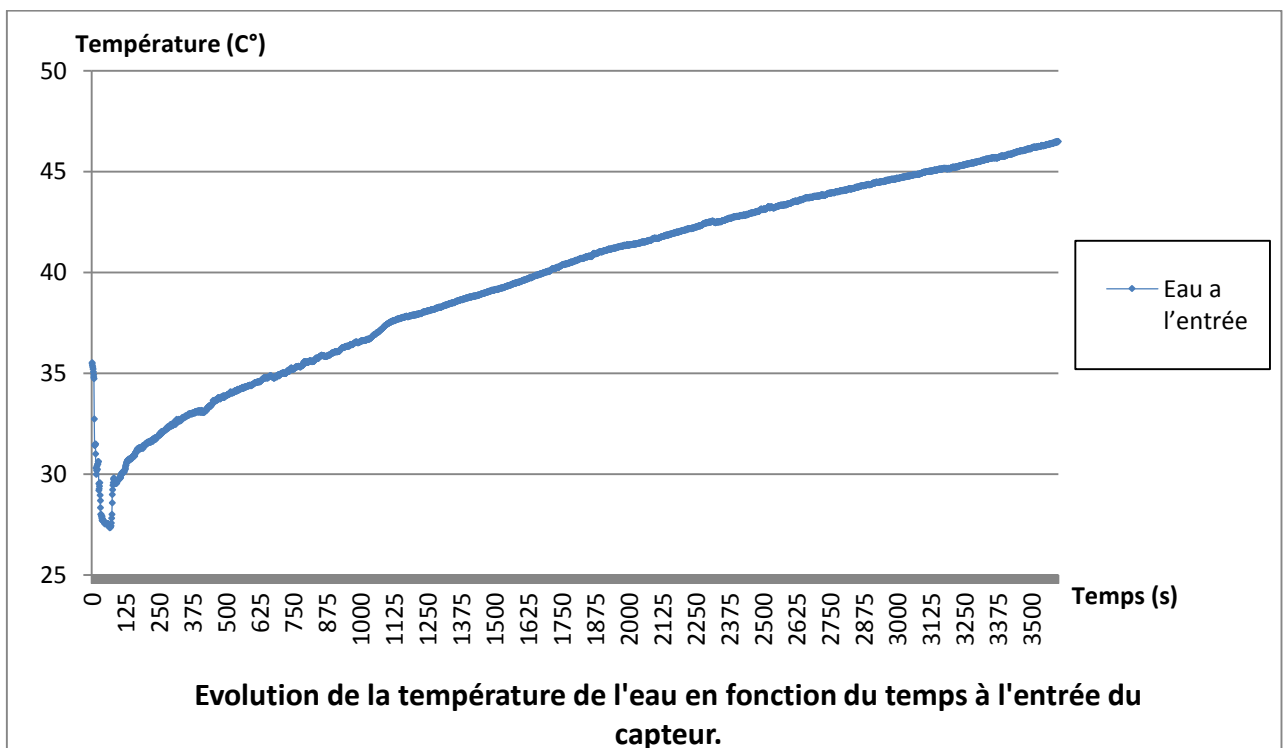
Tableau V.1 : Températures de différents endroits du concentrateur solaire en fonction du temps

Chapitre V : résultats et discussion

Le graphe (1) ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps sur tous les éléments du panneau.



Le graphe (2) ci-dessous montre l'évolution de la température de l'eau en fonction du temps à l'entrée du capteur.

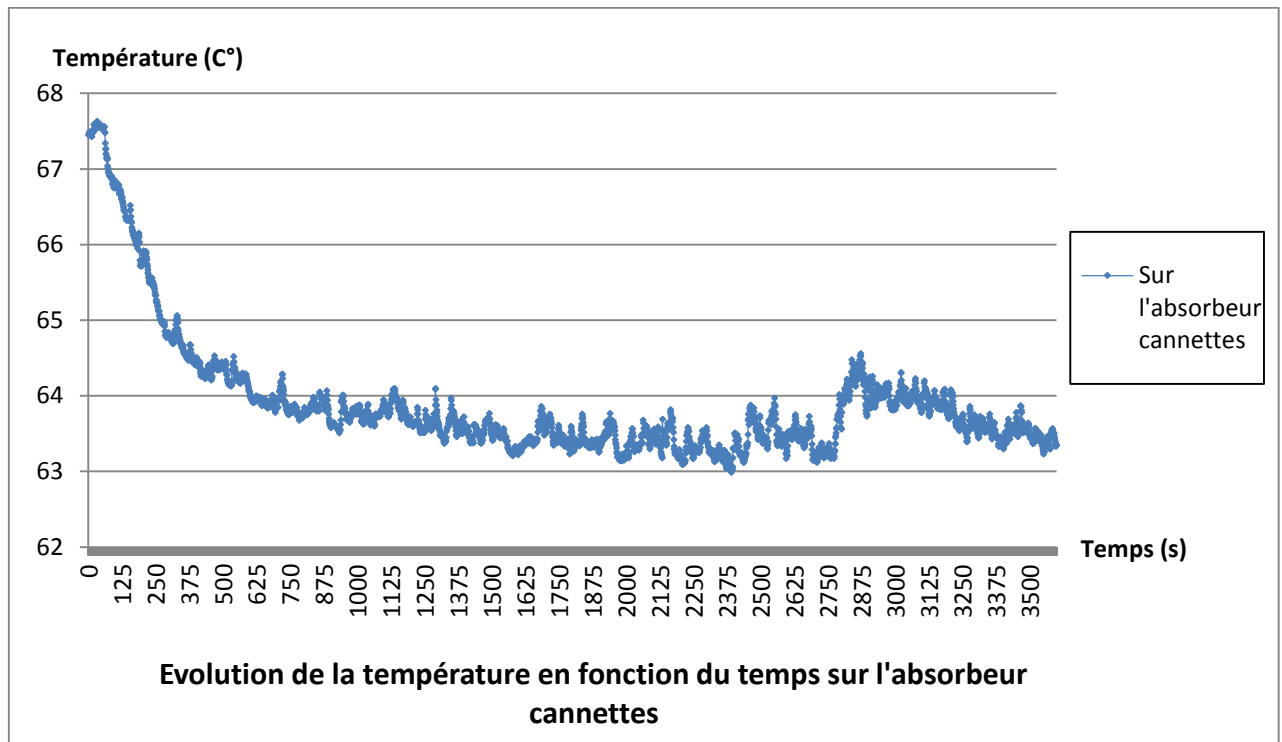


Chapitre V : résultats et discussion

Commentaire : On remarque que la température augmente au cours du processus.

Explication : Le dispositif travaille en cycle fermé.

Le graphe (3) ci-dessous montre l'évolution de la température en fonction du temps sur l'absorbeur(cannettes) :

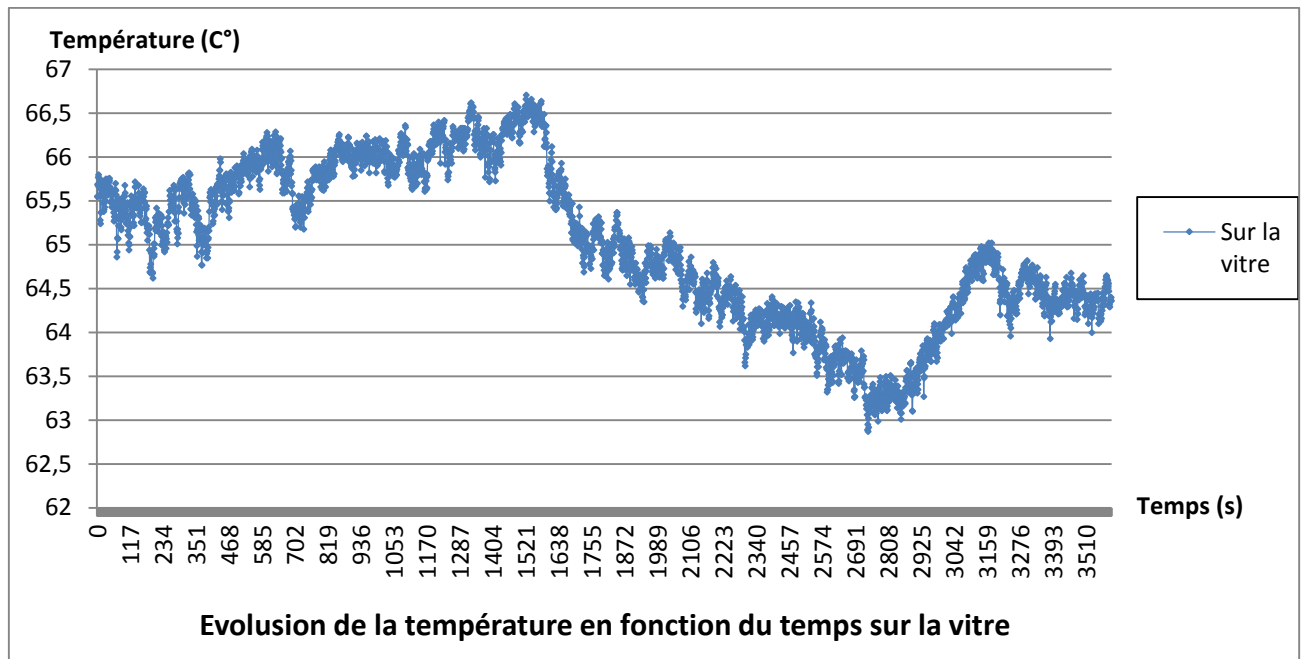


Commentaire :

1^{ère} partie : comprise (0s-1125secondes) où se fait l'absorption du surplus de la quantité de chaleur par le MCP cela explique la diminution de la température de 67,5 à 64 °C (car la température de fusion du MCP est à environ 64°C).

2^{ème} partie : la stabilité de la température s'explique par le changement de phase du MCP (Température de fusion autour de 64°C).

Le graphe (4) ci-dessous montre l'évolution de la température sur la vitre :

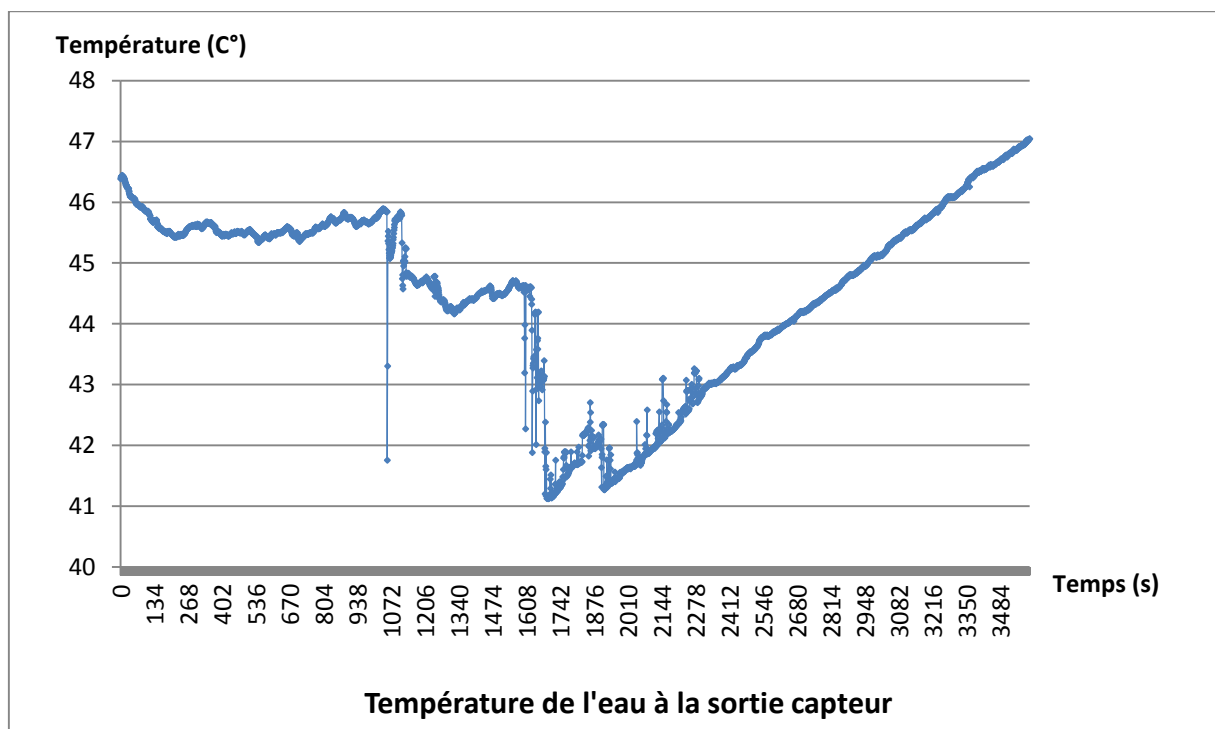


1^{ère} partie : où il y a une élévation de la température, le dispositif est exposé à une source de chaleur.

2^{ème} partie : la température diminue, cela revient à l'absorption d'une quantité considérable de la chaleur par le MCP.

3^{ème} partie : étant donné que le changement de phase est effectué par le MCP, la température de la vitre reprend son élévation.

Le graphique (5) ci-dessous montre l'évolution de la température de l'eau en fonction du temps à la sortie du capteur :



Chapitre V : résultats et discussion

1^{ère} partie : on remarque que la température diminue puis se stabilise, étant donné que le dispositif est exposé à une source de chaleur (ensoleillement pendant environ 30min). L'eau monte en température mais dès le renouvellement de cette eau par l'eau de robinet la température se stabilise.

2^{ème} partie : on remarque que la température diminue jusqu'à atteindre 41°C, cela s'explique par l'absorption de la chaleur par le MCP.

3^{ème} partie : on remarque que la température augmente de nouveau, cela s'explique par la fusion complète de MCP ; ce qui crée un gradient de température, donc la quantité de chaleur est récupérée par l'eau.

Détermination de la conductivité thermique du matériau composite MCP.

$\lambda_{\text{paraffine}}$: 0.26 W/m.K.

$\lambda_{\text{graphite}}$: 500 W/m.K.

λ_{silice} : 1.4 W/m.K.

Conductivité des composites:

1^{er} cas : 90% paraffine, 5% graphite, 5 % silice

$$\lambda_{c_1} = 0,9 \lambda_p + 0,05 \lambda_{gr} + 0,05 \lambda_s = 45,29 \text{ W/m. K}$$

2^{ème} cas : 80% paraffine, 10% graphite, 10% silice.

$$\lambda_{c_2} = 0,8 \lambda_p + 0,1 \lambda_{gr} + 0,1 \lambda_s = 90,34 \text{ W/m. K}$$

3^{ème} cas : 70% paraffine, 15% graphite, 15% silice

$$\lambda_{c_3} = 0,7 \lambda_p + 0,15 \lambda_{gr} + 0,15 \lambda_s = 135,385 \text{ W/m. K}$$

4^{ème} cas : 60% paraffine, 20% graphite, 20% silice

$$\lambda_{c_4} = 0,6 \lambda_p + 0,20 \lambda_{gr} + 0,20 \lambda_s = 180,43 \text{ W/m. K}$$

Conclusion:

D'après le calcul de la conductivité thermique pour les quatre composites, on constate que : $\lambda_{c_1} < \lambda_{c_2} < \lambda_{c_3} < \lambda_{c_4}$.

Le graphite améliore la conductivité thermique des matériaux, même avec un faible pourcentage.

Détermination de la masse volumique des composites :

ρ_{graphite} : 2,09g/cm³ = 2090 kg/m³

$\rho_{\text{paraffine}}$: 0,9g/cm³ = 900 kg/m³

ρ_{silice} : 2,6g/cm³ = 2060 kg/m³

Chapitre V : résultats et discussion

$$\rho_{c1} = 0,9\rho_{par} + 0,05(\rho_{gr} + \rho_s) = 104,5 \text{ kg/m}^2$$

$$\rho_{c2} = 0,8\rho_{par} + 0,10(\rho_{gr} + \rho_s) = 1189 \text{ kg/m}^2$$

$$\rho_{c3} = 0,7\rho_{par} + 0,15(\rho_{gr} + \rho_s) = 1333,5 \text{ kg/m}^2$$

$$\rho_{c4} = 0,6\rho_{par} + 0,2(\rho_{gr} + \rho_s) = 1478 \text{ kg/m}^2$$

Conclusion :

La poudre du graphite et de silice contribuent à avoir un matériau plus dense et avec une viscosité élevée, ce qui l'empêche de couler des cannettes.

Calcul de le flux de chaleur reçue par l'eau :

$$\dot{Q} = \dot{m} c_{eau} \Delta T \quad (V.1)$$

Avec : $\dot{m}$ = débit d'eau

On a le débit volumique de l'eau (mesuré ; en remplissant une bouteille de 1.5L avec de l'eau en 12.94 seconde)

$$\dot{m} = 1,5L / 12,94s = 0,115 \text{ l/s}$$

$$\dot{m} = 0,115 \times 10^{-3} \times \frac{1000 \text{ kg}}{m^3} = 0,115 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} c_{eau} \Delta T = 0,115 \times 4180 (47,04 - 35,84)$$

$$\dot{Q} = 5383,84 \text{ W}$$

Calcul du rendement du panneau [15] :

Tout d'abord, on commence par calculer la puissance reçue par le panneau.

Calcul de la surface : (la surface totale qui est exposé aux rayons solaire)

$$S = (1,10 \times 0,64) + \sin 20 [(1,10 \times 0,70) \times 2 + (0,7 \times 0,7)]$$

$$S = 2,68 \text{ m}^2$$

On calcule le flux perdu à travers les parois et la vitre :

A travers les parois :

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{e_b}{\lambda_b}} * S1 \quad (V.2)$$

h_i : coefficient d'échange convectif intérieur

Chapitre V : résultats et discussion

h_e : coefficient d'échange convectif extérieur

λ_p : conductivité thermique du polystyrène λ_b : conductivité thermique du bois

e_p : épaisseur du polystyrène e_b : épaisseur du bois

S_1 : la surface latérale du boîtier

$$S_1 = 0.534 \text{ m}^2$$

$$\phi = \frac{63.9-30}{0.17 + \frac{0.1}{0.036} + \frac{0.02}{0.13}} * 0.534$$

$$\phi = 5.83 \text{ W}$$

A travers la vitre :

$$\phi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{e_v}{\lambda_v}} * S_2 \quad (\text{V.3})$$

S_2 : est la surface de la vitre

$$S_2 = 0.39 \text{ m}^2$$

λ_v : conductivité thermique de la vitre

e_v : épaisseur de la vitre

$$\phi = \frac{63.9-30}{0.17 + \frac{0.008}{1.2}} * 0.39$$

$$\phi = 55.86 \text{ W}$$

La quantité d'énergie solaire (rayonnement) reçue par une surface donnée (au nord de l'Algérie) mesuré par un pyromètre en juillet à :

1. 12H30 est de 822,28 W/m²
2. 13H00 est de 814,27 W/m²

Pour le rayonnement 1 :

$$822,28 \text{ W/m}^2 \text{ on a } P = 2209.36 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{reçue par l'eau}}}{P_{\text{reçue par l'eau}} + P_{\text{rayonnement}} + P_{\text{perdue}}} \quad (\text{V.4})$$

$$= \frac{5383,84}{5383,8 + 2209,36 + 61.69}$$

$$\eta = 0.70 = 70\%$$

Chapitre V : résultats et discussion

Pour un rayonnement 2 :

$$814,27 \text{ W/m}^2 \quad P=2182,2\text{W}$$

$$\eta = \frac{5383,84}{7654.85}$$

$$\eta = 0,70 = 70\%$$

Pour un rayonnement:

$$804,14 \text{ W/m}^2 \quad P=2155.09\text{W}$$

$$\eta = \frac{5383,84}{7600.58}$$

$$\eta = 0,70 = 70\%$$

Conclusion :

D'après le calcul du flux généré par le montage expérimental, on constate que la variation de température est estimée à 12°C, ce qui nous donne une puissance de 5 kW environ. Le flux perdu par les parois et la vitre de l'échangeur est estimé à 0.06 kW qui est faible par rapport à celui récupéré par l'eau. Au final, on peut dire que la puissance cédée par le matériau à changement de phase est égale à la somme du flux récupéré par l'eau et celle perdue à travers les parois et la vitre.

Conclusion :

Le travail que nous avons entrepris, nous a permis de mettre en application nos connaissances théoriques sur les échangeurs à base de chaleur latente. Le but de notre projet est d'étudier un système de stockage de chaleur latente de fusion dans un matériau à changement de phase.

L'objectif est la réalisation d'un échangeur de chaleur (eau/MCP), pour stocker le surplus d'énergie thermique (chaleur) en utilisant un MCP, les résultats des différents tests effectués dans ce but ont été comme suit :

- La paraffine a été bien retenue dans le gel de silice utilisé comme support de stockage.
- La conductivité thermique de la paraffine a été bien améliorée avec l'ajout du graphite.
- L'utilisation des cannettes de petites dimensions augmentent la surface d'échange.
- Le composite (MCP/Gr/Si), dont la température de début de fusion est de 64°C avec une chaleur latente de 240 KJ/KG est approprié pour des applications de stockage d'énergie.

En conclusion notre élément de stockage MCP peut être l'une des méthodes de stockage d'énergie dont la mise en valeur permettra dans certaines mesures de satisfaire les besoins énergétiques futurs.

BIBLIOGRAPHIE:

- [1] Rijalalaina ROKOTOSAONA. Thèse De Doctorat. Etude et modélisation des équilibre liquide/solide et solide/solide des mélange binaire de n-alcanes linéaires et des mélange multiconstituants. 21 décembre 2005 à l'institut polytechnique de LORRAINE
- [2] Jérôme Lopez. Thèse de Doctorat. Nouveau matériaux Graphite/sel pour le stockage d'énergie à haute température. Etude des propriétés de changement de phase. Université Science et Technologies- Bordeaux . 2007.
- [3] Amina Akrouche. Mémoire De Master. Etude du stockage et déstockage d'énergie dans matériau à changement de phase. Ecole Des Mines de Nantes. 29 Octobre 2011.
- [4] Sari et autres 2000 Sari, A., Kaygusuz, K. (2000). Energy and exergy calculations of latent heat storage systems .Energy Sources 22: 117-126.
- [5] Telkes & Al (1978) Telkes, M. (1978). Trombe wall with phase change storage material. *Proceedings of the 2nd national passive solar conference*. Philadelphia, PA, USA.
- [6] Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles*. USA: CRC.
- [6] Abhat (1983) . Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. Solar Energy, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332.
- [7] Lane (1986). Lane, G.A. (1989). Phase Change Thermal Storage Materials. In: *Hand Book of Thermal Design*. In: Guyer, C., ed. McGraw Hill Book Co.
- [8] Brousseau. P., Lacroix. M.. "Numerical simulation of a compact multi-layer phase change material energy storage system". Fundamentals of phase change: Sublimation Solidification . conf. organised by ASME . Chicago, Nov. 13- 18. 1994.
- [9] Farid M. M., et Kanzawa A. (1989), Thermal Performance of a Heat Storage Module using PCM's with Different Melting Temperatures: Mathematical Modeling, ASME J. Solar Energy Eng., Vol. 111, pp. 152- 157.
- [10] Farid M. M., Kim Y., et Kanzawa A. (1990). Thermal Performance of a Heat Storage

Module using PCM's with Different ~MeltingT emperatures: Experimen tal, ASME J. Solar Energy Eng., Vol. 1 12, pp. 125- 13 2.

[11] Lacroix M. (1993), Numerical Simulation of a Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit, Solar Energy, Vol. 50, No. 4, pp. 357-367.

[12] Charles Chauliaguet: L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Eyrolle 1981
P22, 32 et p147-148.

[13] Yves Jannot. Thermique solaire. Paris (2007).

[14] Pierre Henri Communay: Héliothermiques; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Groupe de Recherche et d'Édition-2002.

[15] R. Bernard, G. Merguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire: conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième Édition-1980.

[16] M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).

[17] Nafila SMADJI, Mémoire De Magister. Optimisation et modélisation d'un distillateur solaire à ailettes avec stockage de chaleur, ALGER (2003)

[18] Reda Takieddine, mémoire de magister. Étude et dimensionnement d'un système solaire combiné SETIF (2009)

Site web:

<http://aviatechno.free.fr/thermo/thermo01.php> mesure de température par Thermocouples.