

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique,  
Option : Énergétique

### **Thème :**

**Etude et réalisation d'un concentrateur solaire cylindro-  
parabolique avec stockage d'énergie par chaleur latente**

### **Encadré par :**

Pr. MAKHLOUF Said

### **Réalisé par :**

Mr. KROUCHI Ghiles

Mr. OUACHEHI Gaya

### **Soutenu devant le jury composé de :**

**Président:** Mr. FERROUK UMMTO

**Examineur :** Mr. BETAGY UMMTO

**Rapporteur :** Pr. MAKHLOUF Said UMMTO

**Année universitaire 2019/2020**

# Remerciements

Nous commençons par remercier notre dieu le tout puissant de nous avoir procuré volonté, courage et patience pour la réalisation de notre travail.

Nos remerciements profonds et haute considération vont aussi à :

- ❖ Pr MAKHLOUF : notre promoteur, pour avoir accepté de diriger ce modeste travail. Honorées d'avoir travaillé avec lui et tiré un immense profit de son savoir, de ses conseils utiles et de ses discussions fertiles.
- ❖ L'équipe du laboratoire MCI sis au département Génie Mécanique.
- ❖ Les enseignants du département de Génie Mécanique, pour le temps qu'ils nous ont accordé pour notre formation et les informations utiles qu'ils nous ont fournies.
- ❖ Aux membres du jury qui ont accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.
- ❖ Au groupe laitier TIFRA-LAIT pour nous avoir fourni gracieusement les matières grasses en guise de MCP.
- ❖ A monsieur BETAGY pour nous avoir fourni des données qui nous ont aidés dans nos calculs.
- ❖ A notre ami FODIL Nazim pour ces précieuses aides lors de la réalisation de ce mémoire.
- ❖ A toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de notre projet.

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail  
à mes parents qui m'ont soutenu et encouragé  
durant ces années d'études,  
A mes deux sœurs et ma famille,  
A mes proches, mes amis  
et à ceux qui ont partagé avec moi tous les  
moments d'émotion lors de la réalisation de ce  
travail  
A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé,  
et à qui je souhaite plus de succès  
A tous ceux que j'aime Merci.*

*Ghiles*

## Dédicaces

*Je dédie ce Modest travail à tous ceux que j'aime. Mes premières pensées vont tout particulièrement à mon père là où il est, ma mère à qui je dois ce succès et pour qui a le sens du sacrifice, au cours de ces longues années d'étude, ne s'est jamais tari et a été le plus précieux de ses cadeaux. Grâce à son soutien et à leurs encouragements subtilement dosés, ils m'ont permis de vivre mes années de scolarité avec sérénité et efficacité.*

*A mes frères et sœurs que j'aime beaucoup.  
A tous mes amis qui m'ont soutenu lorsque j'avais besoin d'eux et à qui je souhaite toute la réussite.*

*Gaya*

# Liste des figures

## Chapitre I

- Fig.I.1.** Carte d'identité du soleil.
- Fig.I.2.** Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre.
- Fig.I.3.** Mouvement de la terre autour du soleil.
- Fig.I.4.** Coordonnées géométriques.
- Fig.I.5.** Déclinaison du soleil en fonction des mois.
- Fig.I.6.** Repérage du soleil.
- Fig.I.7.** Analyse spectrale du rayonnement solaire.
- Fig.I.8.** Différents composants du rayonnement.
- Fig.I.9.** Transfert par conduction.
- Fig.I.10.** Transfert par convection.
- Fig.I.11.** Carte de l'ensoleillement moyen en Algérie.

## Chapitre II

- Fig.II.1.** Schéma de principe des capteurs plans.
- Fig.II.2.** Distribution du gisement solaire à concentration dans le monde.
- Fig. II.3.** Capteurs solaires à concentration.
- Fig.II.4.** Concentrateur parabolique.
- Fig.II.5.** Schéma de principe de miroirs de Fresnel.
- Fig.II.6.** Schéma d'une centrale à tour.
- Fig.II.7.** Schéma d'un collecteur cylindro-parabolique.
- Fig.II.8.** Structure du tube absorbeur.
- Fig. II.9.** Les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique.
- Fig.II.10.** Trajectoire des rayons parallèles dans un miroir parabolique.
- Fig.II.11.** Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante
- Fig.II.12.** Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur.
- Fig.II.13.** Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur.

## Chapitre III

- Fig.III.1 :** Différents types de stockage thermique de l'énergie thermique.
- Fig.III.2 :** Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.
- Fig.III.3.** Equivalence entre la chaleur latente et chaleur sensible
- Fig.III.4 :** Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température.
- Fig.III.5 :** classification des MCP
- Fig.III.6 :** Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire.
- Fig.III.7.** Récipients contenant du sang et des organes qui contiennent MCP.

## Chapitre IV

- Fig.IV.1.** support en bois
- Fig.IV.2.** support en bois isolé.
- Fig.IV.3.** Pose de la sous-couche type fer blanc.
- Fig.IV.4.** application du scotch aluminium adhésif sur le fer blanc.

**Fig.IV.5.** Perçage des canettes.  
**Fig.IV.6.** Assemblage des canettes.  
**Fig.IV.7.** Pate a joint haute température.  
**Fig.IV.8.** Tube cuivre avec ailettes.  
**Fig.IV.9.** dimensions d'une seule canette.  
**Fig.IV.10.** Acide gras.  
**Fig.IV.11.** tamisage du graphite.  
**Fig.IV.12.** Préparation de l'MCP sur le bain marie.  
**Fig.IV.13.** absorbeurs assemblés.  
**Fig.IV.14.** Concentrateur fini sans vitre.  
**Fig.IV.15.** Concentrateur fini avec vitre.  
**Fig.IV.16.** Etapes de réalisation du bac stockeur.  
**Fig.IV.17.** Pompe immergée.  
**Fig.IV.18.** Thermocouple type K.  
**Fig.IV.19.** Pico log USB.  
**Fig.IV.20.** Emplacement des thermocouples

## **Chapitre V**

**Fig.V.1** Courbes des températures du test 1.  
**Fig.V.2** Courbes des températures du test 1 entre 0 et 1500 secondes.  
**Fig.V.3** Courbes des températures du test 1 entre 1500 et 3000 secondes.  
**Fig.V.4** Courbes des températures du test 2.  
**Fig.V.5** Courbes des températures du test 1 entre 0 et 1290 secondes.  
**Fig.V.6.** Courbes des températures du deuxième test entre 1290 et 2580 secondes

## Liste des tableaux

**Tableau I.1** : Albédo solaire de différentes surfaces.

**Tableau I.2** : Valeurs de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique de différents matériaux.

**Tableau I.3** : Variation de  $\alpha$  selon le type de convection et du matériau.

**Tableau III.1** : Propriétés thermo-physiques de certains MCP.

**Tableau IV.1** : Caractéristiques du site de Tizi-Ouzou.

**Tableau.V.1** : Températures relevées entre 0 et 1500 secondes lors du premier test.

**Tableau.V.2** : Températures relevées entre 1500 et 3000 secondes lors du premier test.

**Tableau.V.3** : Températures relevées entre 0 et 1290 secondes lors du deuxième test.

**Tableau.V.4** : Températures relevées entre 1290 et 2580 secondes lors du deuxième test.

**Tableau V.5** : Rayonnement global sur un plan fixe pour la journée du 08/06/2020 à TIZI-OUZOU.

## Nomenclature

Symbol	Signification	Unité
$\delta$	Déclinaison solaire	$^{\circ}$
$I$	Constante solaire	$W/m^2$
$h$	Hauteur du soleil	$^{\circ}$
$a$	Azimut	$^{\circ}$
$\omega$	Angle horaire	$^{\circ}$
$\varphi$	La latitude d'un lieu	$^{\circ}$
$\lambda$	Longueur d'onde	$\mu m$
$S$	Puissance du rayonnement incident	$W$
$D_2$	Rayonnement diffus par le sol	$W.m^{-2}$
$D_3$	Rayonnement diffus rétro diffuse	$W.m^{-2}$
$Q$	Flux de chaleur	$W$
$Q_{cd}$	Flux de chaleur par conduction	$W$
$Q_{cv}$	Flux de chaleur par convection	$W$
$Q_r$	Flux de chaleur par rayonnement	$W$
$a$	Largeur d'ouverture	$m$
$A$	Surface d'un cylindro parabolique	$m^2$
$Aa$	Surface d'un cylindro parabolique	$m^2$
$Ar$	Surface d'ouverture du miroir	$m^2$
$C$	Rapport de concentration	-
$d$	Diamètre du récepteur	$m$
$f$	Distance focale	$m$
$h$	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
$I$	Eclairement solaire direct	$W.m^2$
$l$	Longueur	$m$
$q_{absorbée}$	Quantité d'énergie solaire absorbée	$W/m^2$
$q_{utile}$	Puissance reçue par unité de longueur	$W/m^2$
$q_{intérieur}$	Quantité d'énergie qui indique le transfert thermique par convection et par rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe en verre	$W/m^2$
$q_{extérieur}$	Quantité d'énergie qui indique le transfert thermique entre l'enveloppe en verre et l'environnement	$W/m^2$
$T$	Température	$K$
$\vartheta$	Vitesse d'écoulement	$m.s^{-1}$
$x$	Cordonnées cartésiennes	
$y$	Cordonnées cartésiennes	
$\psi$	Angle d'ouverture	$^{\circ}$
$\rho$	Masse volumique	$Kg.m^3$
$\gamma$	Facteur optique du collecteur (interception)	-
$\tau$	Facteur de transmission du miroir	-
$\rho$	Facteur de réflexion du miroir du concentrateur	-
$\lambda$	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.k^{-1}$
$\mu$	Viscosité thermique	$Pa.s$
$\nu$	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
$\sigma$	Constant de Stefan-Boltzmann	$W.m^{-2}.K^{-2}$
$\varepsilon$	Emissivité	-

E	Rayonnement solaire incident	W/m <sup>2</sup>
E <sub>b</sub>	Rayonnement incident sur le plan d'ouverture	W/m <sup>2</sup>
m	Débit massique	Kg/s
C <sub>p</sub>	Pouvoir calorifique	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
UL	Coefficient des pertes thermiques	
Q <sub>u</sub>	Puissance utile	W
h	Enthalpie	KJ/kg

*TSV* : temps solaire vrai.

# Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction generale.....	
I. Gisement solaire.....	1
I.1 Introduction.....	1
I.2 Le soleil.....	1
I.2.1 L'origine de l'énergie solaire.....	1
I.2.2 Carte d'identité du soleil.....	2
I.3 Constitution physique du soleil.....	3
I.4 Structure et composition de l'atmosphère.....	3
I.5 Données géométriques du soleil.....	4
I.5.1 Le mouvement de la terre autour du soleil.....	5
I.5.2 Coordonnées géométriques du soleil.....	5
I.5.3 La constante solaire.....	6
I.5.4 Déclinaison du soleil $\delta$ .....	6
I.5.5 Repérage du soleil à une instante donnée.....	7
I.6 Le rayonnement solaire.....	8
I.6.1 Rayonnement solaire direct.....	9
I.6.2 Rayonnement diffus.....	10
I.6.3 Rayonnement réfléchi (Albédo).....	11
I.6.4 Rayonnement global.....	11
I.7 Modes de transfert thermique.....	12
I.7.1 Conduction.....	12
I.7.2 Convection.....	14
I.7.3 Rayonnement.....	15
I.8 Gisement solaire en Algérie.....	16
I.9 Conclusion.....	16
II. Les concentrateurs solaires.....	19
II.1 Introduction.....	19
II.2 Capteurs solaires thermiques.....	19
II.2.1 Capteur sans concentration (Capteur plan).....	20
II.2.2 Capteur avec concentration.....	21
II.3 Etude du concentrateur solaire cylindro-parabolique.....	26
II.3.1 Les composants d'un concentrateur cylindro parabolique.....	26
II.3.2 La géométrie et l'optique des concentrateurs cylindro-parabolique.....	28

II.3.2.1	Les paramètres géométriques [19].....	28
II.3.2.2	Performances optiques d'un concentrateur cylindro parabolique .....	30
II.3.3	Les différents modes de transfert thermique dans un capteur cylindro-parabolique.....	32
II.3.4	Bilan énergétique.....	34
II.3.5	Bilan thermique [21] .....	35
II.3.5.1	Bilan thermique (vitre paroi extérieure) .....	35
II.3.5.2	Bilan thermique (vitre paroi intérieure).....	36
II.3.5.3	Bilan thermique (tube absorbeur) .....	36
II.3.5.4	Bilan thermique (fluide caloporteur) .....	36
II.3.6	Performances thermiques d'un concentrateur cylindro parabolique .....	36
II.3.6.1	Coefficient des pertes thermiques UL (tube couvert).....	36
II.3.7	Puissance utile <b>Qu</b> .....	37
II.3.8	Température de sortie du fluide caloporteur Ts .....	37
II.3.9	Rendement du concentrateur solaire $\eta$ .....	37
II.4	Conclusion .....	37
III.	Les matériaux à changement de phase .....	39
III.1	Introduction .....	39
III.2	Stockage de l'énergie thermique .....	39
III.2.1	Stockage par chaleur sensible .....	40
III.2.2	Le stockage par chaleur latente .....	40
III.3	Stockage Thermochimique .....	43
III.4	Les matériaux à changement de phase .....	43
III.4.1	Définition .....	43
III.4.2	Types des matériaux à changement de phase (MCP).....	44
III.4.3	Classification des matériaux à changement de phase(MCP) .....	46
III.4.4	Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage.....	51
III.4.5	Le choix d'un MCP.....	52
III.4.5.1	Considérations thermiques .....	52
III.4.5.2	Propriétés physiques .....	52
III.4.5.3	Considérations cinétiques .....	52
III.4.5.4	Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux.....	52
III.4.5.5	Considérations chimiques.....	52
III.4.5.6	Considérations économiques .....	52
III.4.6	Applications des MCP.....	53
III.5	Conclusion.....	56
IV.	Etapes de réalisation :.....	57

IV.1	Fabrication du support en bois.....	57
IV.2	Fabrication du réflecteur.....	58
IV.3	Fabrication de l'absorbeur .....	60
IV.3.1	Fabrication de composite MCP .....	62
III.5.1	Assemblage de l'absorbeur .....	64
IV.4	Assemblage du concentrateur .....	64
IV.5	Fabrication du stockeur .....	66
IV.6	Système de circulation de fluide caloporteur .....	66
IV.6.1	Les Thermocouples .....	67
IV.7	Conclusion .....	69
	Introduction .....	70
V.	Testes et résultats .....	70
V.1	Test (1).....	70
V.2	Test (2).....	73
V.3	Rayonnement reçu par la surface étudiée .....	77
V.4	Calcul des rayonnements: .....	78
V.4.1	Rayonnement envoyé par les réflecteurs sur les canettes.....	78
V.4.2	Le rayonnement issu du réflecteur .....	78
V.4.3	Le rayonnement issu du soleil et reçu par les cannettes.....	79
V.4.4	Le rayonnement total reçu par la surface étudié.....	79
V.5	La quantité d'énergie reçue par l'eau .....	79
V.7	Conclusion .....	80
	Conclusion générale	
	References bibliographiques	

## **Introduction générale**

De nos jours, une importance particulière est accordée aux énergies nouvelles et renouvelables. Cet intérêt est dû d'une part à la croissance accrue de la demande mondiale en énergie conventionnelle et ses problèmes d'approvisionnement, et d'autre part, au coût élevé de cette dernière et la pollution qu'elle provoque.

De ce fait, apparaît l'énergie solaire comme étant l'énergie de l'avenir. Elle a un grand rôle dans la transition énergétique.

L'un des avantages de cette énergie est son aptitude à la transformation en chaleur par l'intermédiaire d'un fluide (eau, air, huile) circulant au contact d'une surface recevant le rayonnement solaire. Le capteur constitue l'effecteur dans le système technique assurant cette transformation. Pour la collecte de l'énergie solaire on distingue deux techniques, la première est le capteur plan utilisé pour la conversion de l'énergie solaire incidente en énergie thermique directement utilisable cependant, le domaine d'application et d'utilisation de ce type de capteurs est très restreint il présente en outre un certain nombre d'inconvénients et leurs constructeurs ont été amenés à concevoir d'autres modèles configurant plus rentables utilisant le principe de concentration.

Le concentrateur solaire cylindro-parabolique est l'un des concentrateurs les plus utilisés au monde vu les performances élevées qu'il propose, ce dernier se présente comme un module ayant un réflecteur de forme cylindro-parabolique, cette géométrie lui permet de focaliser l'énergie solaire incidente, sur une ligne focale réceptrice (tube absorbeur).

L'efficacité du capteur solaire cylindro-parabolique dépend directement des conditions météorologiques, ce dernier à un rendement élevé que durant les journées ensoleillées.

L'objectif de ce travail est de faire une étude expérimentale et une optimisation d'un concentrateur cylindro-parabolique à l'aide des matériaux à changement de phase.



**Chapitre**

**I**

**Gisement  
solaire**

## **I. Gisement solaire**

### **I.1 Introduction**

La nuit, l'œil humain voit plus d'un millier d'étoiles, mais de jour, nous n'en voyant qu'une, le soleil.

Pour les anciens, le soleil était un dieu, la science nous a appris autre chose. Il est l'étoile la plus proche de la terre, c'est la source d'énergie au centre du système solaire, un réacteur nucléaire qui chauffe et qui éclaire notre monde et dont toute autre chose et tout être vivant dépend.

Cette énergie nous arrive sous forme d'un rayonnement électromagnétique après avoir parcouru des millions de kilomètres. Notre Etoile, véritable boule de feu, nous envoie à travers l'espace, une énergie considérable, fait croître les plantes (photosynthèse des plantes), l'origine du cycle de l'eau, et des vents. Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) que nous utilisons abondamment ont également pour origine l'énergie de photosynthèse accumulée durant des millions d'années.

Toute forme de vie sur terre dépend directement ou indirectement du soleil. Il est évident que, dans ces conditions l'énergie solaire pourrait satisfaire pleinement les besoins en énergie de l'humanité, surtout si l'on tient compte du fait que cette forme d'énergie rayonnante peut se transformer sous deux autres formes couramment utilisées par l'Homme : l'énergie thermique et l'énergie électrique.

### **I.2 Le soleil**

#### **I.2.1 L'origine de l'énergie solaire**

L'astre solaire est une étoile de 1397 000 km de diamètre (110 fois celui de la terre) au sein duquel ce produit une réaction de fusion (fusion d'hydrogène en hélium) générant d'énormes quantités d'énergies. Une toute petite partie de cette énergie arrive sur terre, par rayonnement électromagnétique.

Globalement, l'énergie reçue est néanmoins considérable (1 million de TéraWatttheure). Elle est de l'ordre de 10000 fois la consommation énergétique annuelle de la population mondiale. La puissance maximale moyenne délivrée sur terre par mètre carré est d'environ 1000 Watts.

## I.2.2 Carte d'identité du soleil

- **Âge:** estimé à 4,7 milliards d'années
- **Durée de vie:** estimée à 10 milliards d'années
- **Diamètre:** 1 397 000 km (110 fois celui de la Terre, 12 700 km)
- **Circonférence:** 4 372 544 km.
- **Masse:**  $2 \times 10^{30}$  Kg (1 300 000 fois celle de la Terre)
- **Distance Terre-Soleil:** 149 598 000 km.
- **Temps de transfert de la lumière:** 8 mn 20 s.
- **Composition (éléments /pourcentages):** environ 73,46 % H<sub>2</sub>, 24,85 % He et traces d'autres éléments (O, C, Fe, Ne, N, Si, Mg, S etc.)
- **Température :** à la surface : environ 5 800 K; au Centre : 15 millions de degrés

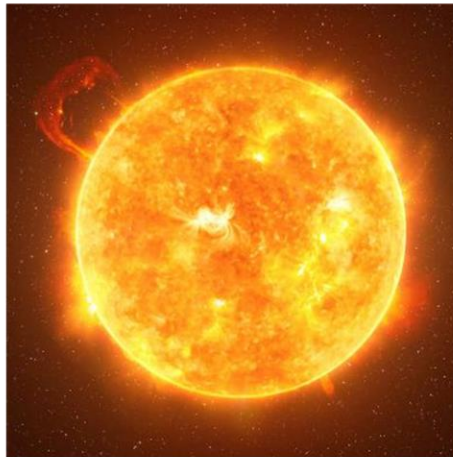


Fig.I.1. Carte d'identité du soleil.

**I.3 Constitution physique du soleil**

Le soleil est une sphère gazeuse composée d'Hydrogène (74 % de la masse ou 92,1 % du volume) et d'Hélium (24 % de la masse ou 7,8 % du volume). L'hydrogène se transforme en hélium par fusion nucléaire, chaque seconde 700 milliards de kilogrammes d'hydrogène se transforme en 695,7 milliards de kilogrammes d'hélium. La différence 4,3 milliards de kilogrammes se transforme en énergie  $38,7 \cdot 10^{25}$  joules, c'est équivalent à 26 mille milliards de fois la consommation énergétique mondiale dans le même temps. Avec un diamètre de 1391000 km, le Soleil se trouve à une distance moyenne de 149 000 km par rapport à la Terre. A cause de l'ellipticité de l'orbite terrestre, la distance minimale se situe vers le 15 janvier, et la maximal vers la fin juin [1].

Le Soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales [1] :

1- L'intérieur : où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint plusieurs millions et la pression un milliard d'atmosphère.

2- La photosphère : l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.

3- Chromosphère et couronne solaire : où la matière est très diluée, fait qui explique que bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés) le rayonnement émis est très faible.

**I.4 Structure et composition de l'atmosphère**

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, c'est:

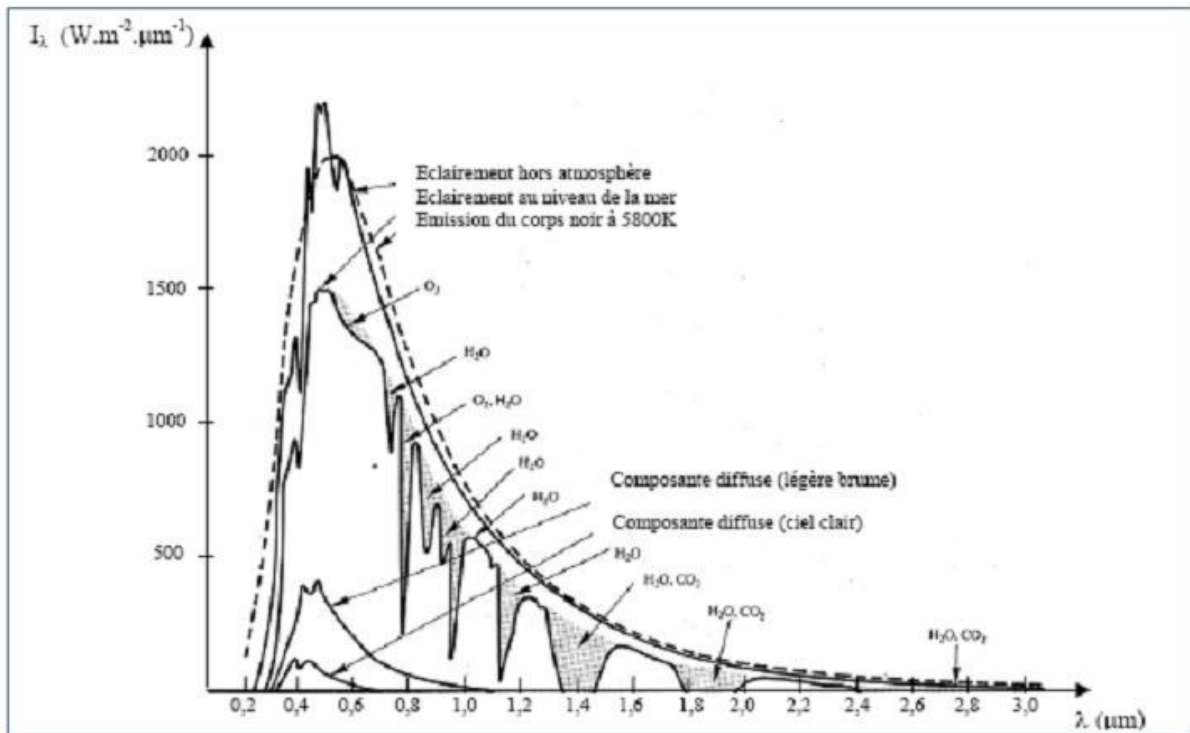
- la troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- la stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- l'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence :

- du CO<sub>2</sub> (0,03%)
- de la Vapeur d'eau: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

- de l'Ozone O<sub>3</sub> située entre 10 et 30 km d'altitude.
- des Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la Figure I.2 la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde.



**Fig.I.2.** Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre. [2]

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers 14,7 μm pour le CO<sub>2</sub>.
- Entre 5 et 7 μm et entre 14 et 20 μm pour la vapeur d'eau.
- Vers 9,6μm pour O<sub>3</sub>.

### I.5 Données géométriques du soleil

L'étude du gisement solaire fait appel à des données astronomiques et à des renseignements suffisants sur les conditions climatiques du site, pour estimer convenablement la puissance solaire incidente.

### I.5.1 Le mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit autour du soleil une orbite elliptique quasi circulaire avec une période de 365, 25 jours. Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 Décembre) que la terre est la plus proche du soleil 147 millions de km et au solstice d'été (22 Juin) qu'elle en est la plus éloignée 152 millions de km la moyenne étant de 149, 5 millions de km. La terre coupe le plan perpendiculaire au grand axe de son orbite et contenant le soleil aux équinoxes de printemps (21 Mars) et d'automne (21 Septembre).

Elle tourne sur elle-même avec une période de 24h. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace.

Il fait un angle  $\delta = 23^{\circ}27'$  (ou  $23,45^{\circ}$  en fraction décimale du degré) avec la normale au plan de l'écliptique.

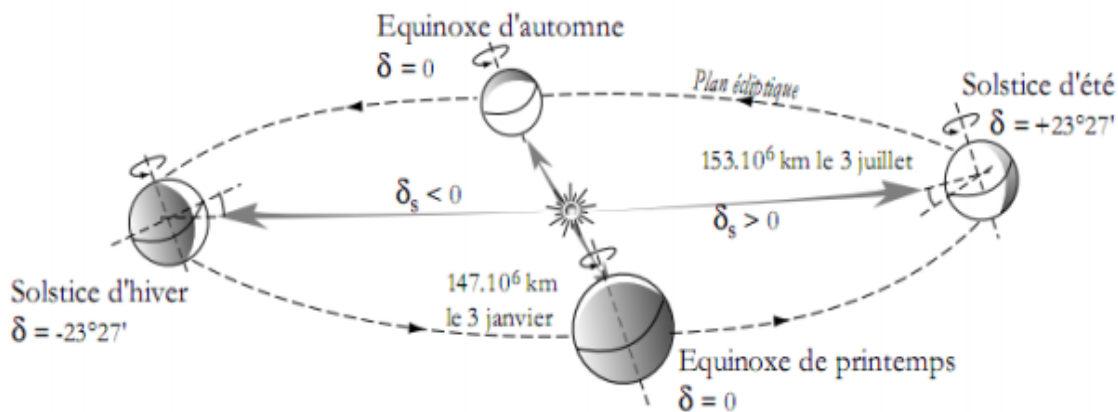


Fig.I.3. Mouvement de la terre autour du soleil. [3]

### I.5.2 Coordonnées géométriques du soleil

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques ; longitude et latitude, ainsi que par son altitude (figure I.4).

**La longitude** correspond à l'angle que fait le plan passant par le méridien du point en question avec le plan passant par le méridien d'origine, c'est-à-dire, le méridien de Greenwich  $0^{\circ}$  (Royaume-Uni). La longitude définit donc le positionnement est/ouest d'un point. Par convention, on affecte le signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et de signe (-) les méridiens situés à l'Ouest. La longitude sera désignée ici par la terre (l), elle peut être comprise entre  $-180^{\circ}$  et  $+180^{\circ}$ .

**La latitude** d'un lieu correspond à l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu avec le plan équatorial. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à  $0^{\circ}$ , le pôle nord par la latitude  $+90^{\circ}$  et le pôle sud par la latitude  $-90^{\circ}$ , cette convention de

signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par le signe ( $\varphi$ ). Elle peut ainsi être comprise entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ .

L'**altitude** d'un point correspond à la mesurée selon la verticale du lieu, qui sépare ce point d'une surface de référence appelée géoïde. Le géoïde est la surface moyenne des océans. On l'exprime généralement en mètre [4].

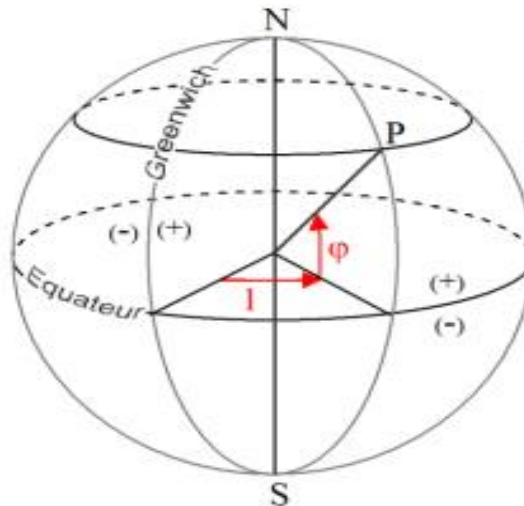


Fig.I.4.Coordonnées géométriques. [5]

### I.5.3 La constante solaire

Le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons et placé en dehors de l'atmosphère terrestre est appelé constante solaire désignée par ( $I$ ). La valeur moyenne actuellement retenue est  $1390 \text{ W/m}^2$ . La variation de la distance terre-soleil pendant l'année influence la valeur de la constante solaire. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire [6] :

$$I = 1367(1 + 0.033 \cos J) \quad (1.1)$$

### I.5.4 Déclinaison du soleil $\delta$

Le plan de l'écliptique est le plan de l'orbite terrestre autour du soleil. La terre tourne sur elle-même autour de l'axe polaire, qui est inclinée à  $23.5^\circ$  par rapport à la perpendiculaire avec le plan de l'écliptique tout au long de l'année. La rotation de la terre autour de son axe provoque les variations diurnes du rayonnement. La position de l'axe par rapport au soleil est la cause des variations saisonnières du rayonnement solaire. L'angle entre l'axe de rotation de la terre et la ligne qui relie le centre du soleil d'une part et celui de la terre de l'autre, change

constamment. Il est appelé déclinaison solaire. Pour le solstice d'hiver (21 décembre), il est de  $-23.5^\circ$  alors que pour le solstice d'été (21 juin) la déclinaison est de  $+23.5^\circ$ . [7]

$$\delta = 23.45 \left( 2\pi \frac{284+j}{365} \right) \tag{1.2}$$

Où : j étant le nombre du jour de l'année.

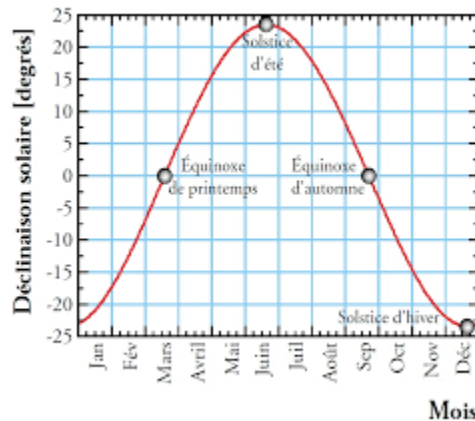


Fig.I.5. Déclinaison du soleil en fonction des mois. [8]

### I.5.5 Repérage du soleil à une instant donnée

Pour le repérage du soleil en un instant donné on utilise souvent les angles suivants :

- Hauteur du soleil en degré ( $h$ ) : c'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le sol, il varie de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  dans l'hémisphère sud (Nadir), s'annule au lever et au coucher du soleil et qui maximal au midi solaire, mesurée en degré.
- Azimut du soleil ( $a$ ) : angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, cet angle étant mesuré positivement vers l'ouest.
- L'angle horaire ( $\omega$ ) : défini comme étant  $15^\circ$  fois le nombre heures de différences avec le midi solaire, affecté de signe positif pour les heures de l'après-midi solaire, et négatif pour les heures avant midi solaire, exprimé par la relation :

$$\omega = \frac{360}{24(TSV-12)} \tag{1.3}$$

Avec  $TSV$  : le temps solaire vrai en heures.

L'azimut ( $a$ ) et la hauteur du soleil ( $h$ ) en un lieu et une date donnée et à une heure

quelconque sont en fonction de la latitude ( $\varphi$ ) du lieu et de la déclinaison ( $\delta$ ) et de l'angle horaire ( $\omega$ ) par les relations suivantes :

$$\sin h = \sin \varphi . \sin \delta + \cos \varphi . \cos \delta . \cos \omega \tag{1.4}$$

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (1.5)$$

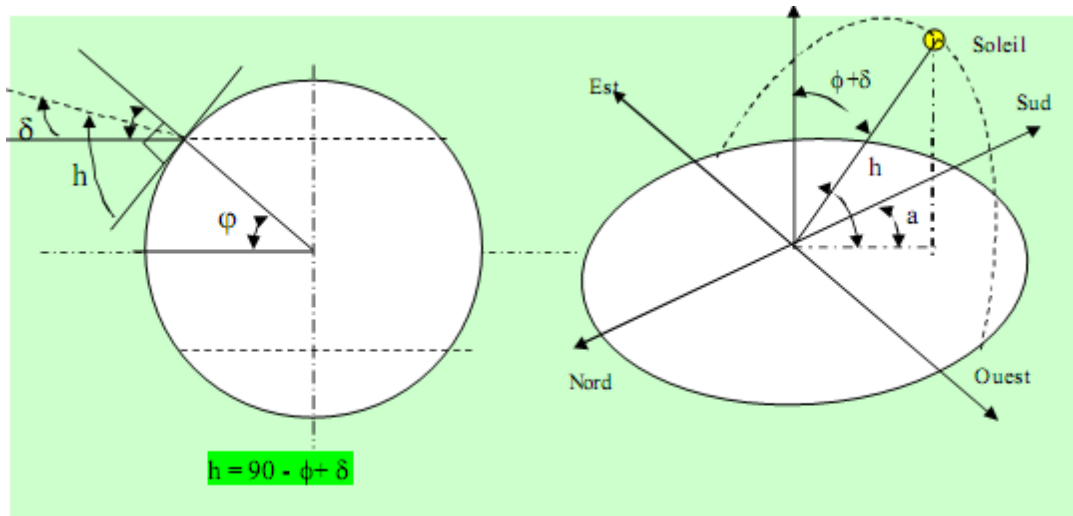


Fig.I.6. Repérage du soleil. [9]

## I.6 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire traverse l'atmosphère pour atteindre la surface de la terre, ce rayonnement est reçu par un corps, la nature de ce dernier est caractérisée par son taux d'absorption ou d'émission du rayonnement, on distingue :

**Corps noir** : c'est un corps qui absorbe toutes les radiations indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident, C'est-à-dire qui a un facteur d'absorption égal à 1 pour toutes les radiations  $\alpha_{T\lambda}=1$ .

C'est-à-dire qui a un facteur d'absorption égal à 1 pour toutes les radiations  $\alpha_{T\lambda}=1$ .

Les propriétés du corps noir sont :

- tous les corps noir rayonnent de la même manière.
- le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température.

**Corps gris** : c'est un corps dont le pouvoir d'absorption  $\alpha_{\lambda T}$  est indépendant de la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement qu'il reçoit. Il est défini :  $\alpha_{T\lambda}=\alpha_T$

Le rayonnement ou spectre solaire est comparable à celui d'un corps noir à une température de 5800 K, il est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$  et se décompose approximativement sur 3 bandes :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ( $< 0,4 \mu\text{m}$ )
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8  $\mu\text{m}$ )
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8 \mu\text{m}$ )

L'énergie solaire reçue sur terre en dehors de l'atmosphère est estimée à 1370 W/m<sup>2</sup>. Cependant elle s'atténue et perd de son intensité en traversant l'atmosphère qui ne dépasse pas les 1000 W/m<sup>2</sup> à la surface de la terre en raison de l'absorption dans ce dernier. Chiffre variera par la suite en fonction de la localisation géographique du site (latitude), la saison, l'heure, les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...), et l'altitude du lieu [10].

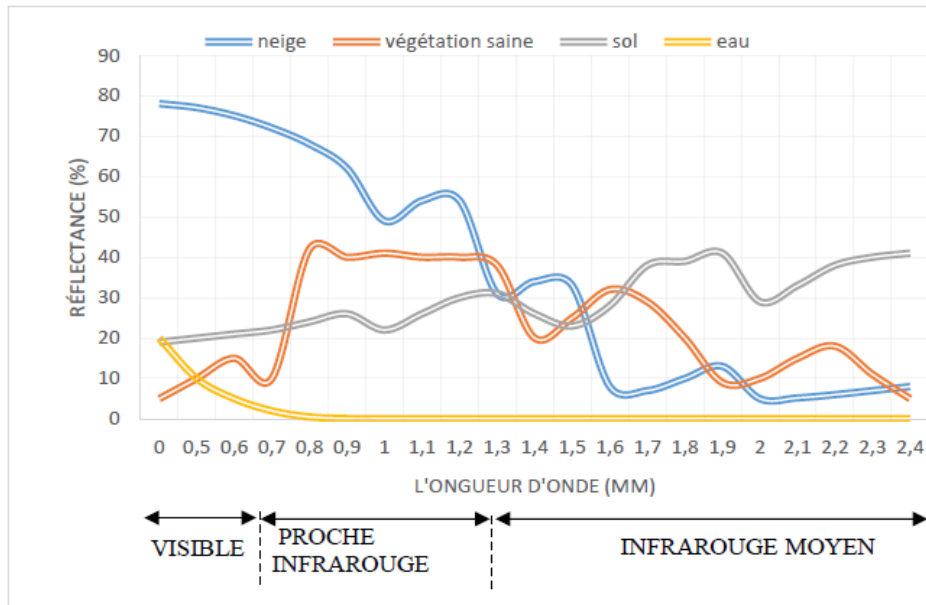


Fig.1.7. Analyse spectrale du rayonnement solaire. [11]

### I.6.1 Rayonnement solaire direct

On appelle rayonnement solaire direct celui qui arrive au sol sans avoir subi de diffusion.

Il se diffère de façon notable du rayonnement atteignant la limite supérieure de l'atmosphère, en particulier du fait de l'absorption par les constituants gazeux de l'atmosphère. Pour un plan de réception quelconque ( $\alpha, \gamma$ ), la puissance du rayonnement incident est exprimée par :

$$s = gne \cdot \cos i \cdot \exp \left[ \frac{-T}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z \cdot \sin h}} \right] \quad (1.6)$$

avec :  $gne = 1353 \left[ 1 + 0.0334 \cdot \cos \left( \frac{360}{365} \cdot J - 2 \right) \right]$

S : puissance du rayonnement incident

Ou sous la forme :  $gne = C(J) \cdot I$

C(J) est la correction de la distance

(i) est l'angle d'incidence sur un plan incliné donné par la relation:

$$\cos i = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos(\varphi - \beta) + \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) \quad (1.7)$$

Sur le plan horizontal  $\cos i = \sin h$ , d'où la relation qui devient :

$$s = gne \cdot \sin h \cdot \exp \left[ \frac{-T}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^2} \sin h} \right] \quad (1.8)$$

### I.6.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement reçu par toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère (déviations de la lumière par les nuages et les molécules diverses). Les couches atmosphériques, modifient la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi par exemple, la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil. Donc, ce rayonnement est nul que la nuit.

Le rayonnement diffus est composé de trois parties :

$$d = d_1 + d_2 + d_3$$

#### 1. Rayonnement diffus par le ciel ( $d_1$ )

$$d_1 = \delta_a \cdot \cos i + \delta_i \frac{1 + \sin \gamma}{2} + \delta_h \cos \gamma \quad (1.9)$$

Où :

$\delta_a$  : est la composante directe.

$\delta_i$  : est la composante isotrope.

$\delta_h$  : est la composante du cercle de l'horizon.

#### 2. le rayonnement diffus par le sol ( $d_2$ ) :

Il est exprimé par la relation :

$$d_2 = \delta_a \frac{1 - \sin \gamma}{2} \quad (1.10)$$

Où :  $\delta_a = \rho \cdot (s_h + d_h)$  est une composante due à l'albédo (le produit du coefficient de

Réflexion du sol par la valeur du rayonnement global incident sur le sol).

#### 3. le rayonnement diffus rétro diffuse ( $d_3$ ):

Il est donné par la relation :

$$d_3 = \delta_R \frac{1 - \sin \gamma}{2} \quad (1.11)$$

Où :  $\delta_R = 0.9(\rho - 0.2) \cdot (\delta_h + d_h) \cdot \exp\left(\frac{-4}{\sqrt{T'}}\right)$

$T' = T_1 + T_2 + T_3$  Est le facteur de trouble diffusif.

### I.6.3 Rayonnement réfléchi (Albédo)

C'est la partie réfléchi par le sol, elle dépend de l'environnement du site. Cet albédo peut être important lorsque le sol est plutôt réfléchissant. Il dépend de la longueur d'onde et de la direction du rayonnement incident ainsi que de la température.

$$albedo = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

On représente quelque valeur de L'albédo selon la surface du sol :

**Tableau I.1** : albédo solaire de différentes surfaces.

Surface	Albédo solaire
Mer chaude	0,05
Lune	0,07
Forêt tropicale	0,12
Mer froide	0,15
Pierre, ciment, sol cultivé	0,15 à 0,25
Herbe verte	0,25
Sable clair	0,37
Neige tassée	0,60
Venus	0,64
Nuage	0,80
Neige fraîche	0,85

### I.6.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus (direct + diffus albédo) comme le montre la figure ci-dessous :

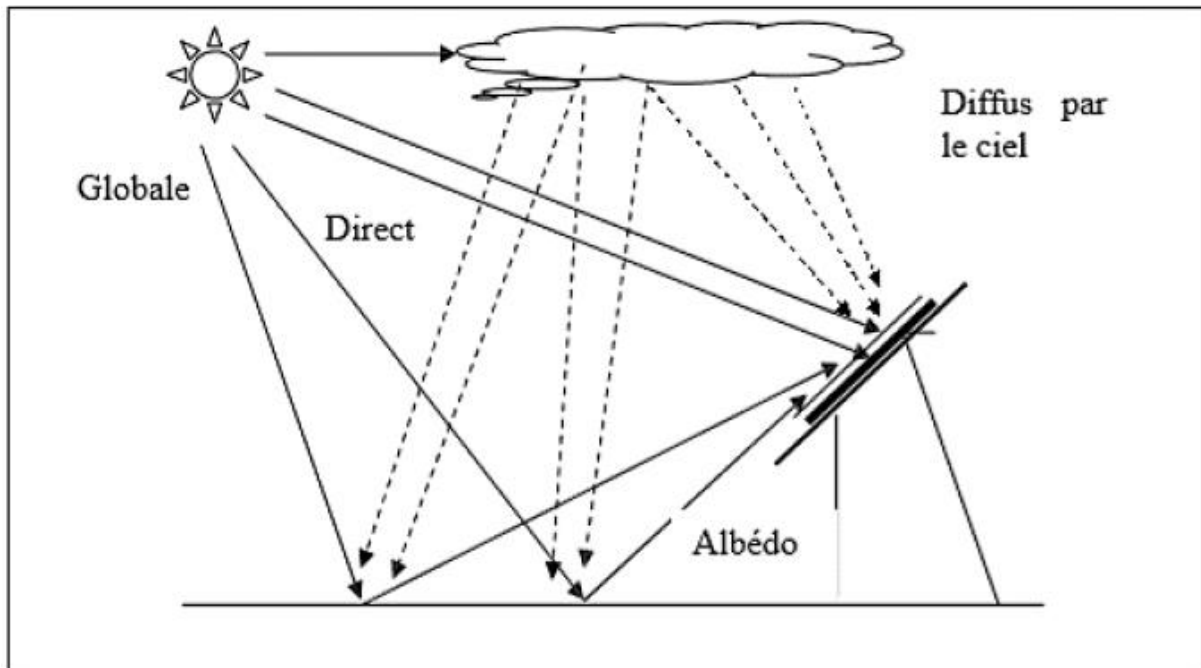


Fig.1.8. Différents composants du rayonnement [12].

## I.7 Modes de transfert thermique

Avec contact ou à distance, tout corps échange de l'énergie sous forme thermique (de la température la plus élevée à la plus basse), le transfert se fait entre deux zones de températures différentes. Il existe trois modes de transfert thermique :

### I.7.1 Conduction

Ce mode de transfert d'énergie se fait à l'échelle microscopique, dans les solides non métalliques, le transfert se fait par échange d'énergie de vibration entre les atomes du réseau cristallin. Dans les métaux, l'énergie thermique est aussi transportée par les électrons de conduction, ce qui rend le transfert plus efficace.

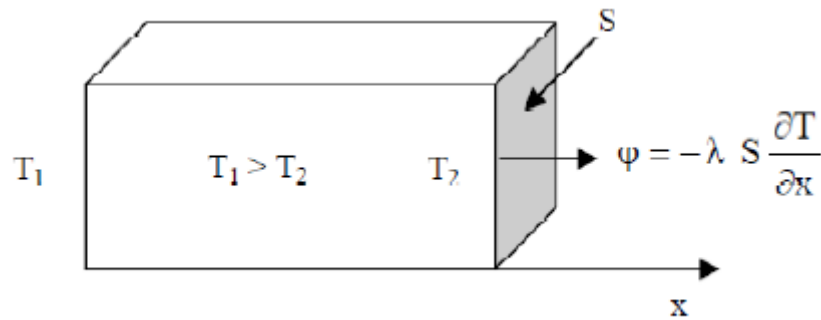
Ce phénomène obéit à la loi de Fourier établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822.

La densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température [13].

$$Q_{cd} = -\lambda \text{ grad } T \quad (1.12)$$

Ou sous forme algébrique :

$$Q_{cd} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.13)$$



**Fig.1.9.** Transfert par conduction. [14]

### Diffusivité Thermique

La diffusivité thermique (a avec l'unité  $m^2/s$ ) est une propriété spécifique des matériaux caractérisant la conduction de chaleur non constante. Cette valeur décrit comment un matériau réagit rapidement à un changement en température.

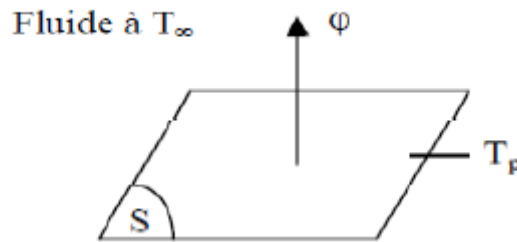
Afin de prédire des processus de refroidissement ou de simuler des champs de température, la diffusivité thermique doit être connue; c'est un prérequis pour résoudre l'équation différentielle de Fourier pour la conduction de chaleur non constante. Un aperçu des valeurs de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique de différents matériaux est présenté dans le tableau ci-dessous [15]:

**Tableau I.2 :** Valeurs de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique de différents matériaux.

Matériaux	Conductivité Thermique W/ (m.K)	Diffusivité thermique $mm^2/s$
Aluminium	237	98.8
Acier	81	22.8
Cuivre	399	117
Silice fondue	1.40	0.87
Gypse	0.51	0.47
Polyéthylène	0.35	0.15
Marbre	2.8	1.35

### I.7.2 Convection

C'est le mode de transmission de la chaleur qui nécessite le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. On la trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide. En réalité, il s'agit d'une combinaison du phénomène de conduction avec celui de transfert de matière.



**Fig.I.10.** Transfert par convection. [16]

Deux types de convection sont distingués:

- **Convection forcée:** le mouvement du fluide est dû à l'action d'une pompe.
- **Convection naturelle** (ou libre): le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, elles-mêmes dues à des différences de température existante dans le fluide [17].

On peut expliquer le phénomène global de la convection par la loi qui suit:

$$\dot{Q} = h A (T_s - T_\infty) \quad (1.14)$$

$h$  : Le coefficient d'échange convectif ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ).

$T_s$  : La température de la surface du fluide.

$T_\infty$  : La température du fluide au large.

$h$  dépend de l'état de surface, de la vitesse du fluide et d'autres facteurs, mais on le traitera souvent comme une grandeur invariable.

**Tableau I.3 :** variation de  $h$  selon le type de convection et du matériau.

-	Air/gaz ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	Eau ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	Huile ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )	Métaux liquide ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ )
Convection naturelle	5 à 50	-	-	-
Convection forcée	10 à 500	100 à 15000	50 à 1500	5000 à 250000

### I.7.3 Rayonnement

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Inversement, soumis à un rayonnement, ils en absorbent une partie qui se transforme en chaleur [18].

Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le corps chaud émet un flux  $\Phi_1$  et absorbe une partie du flux  $\Phi_2$  émis par le corps froid. Comme  $\Phi_1 > \Phi_2$ , le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

On définit:

Le coefficient d'absorption : 
$$\alpha = \frac{\text{flux absorbé}}{\text{flux incident}} \quad (1.15)$$

Le coefficient d'émission : 
$$\varepsilon = \frac{\text{flux émis}}{\text{flux incident}} \quad (1.16)$$

Coefficient de réflexion : 
$$\rho = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}} \quad (1.17)$$

La conservation de l'énergie implique:

$$\alpha + \varepsilon + \rho = 1 \quad (1.18)$$

### Puissance échangée entre deux corps

Entre deux corps noirs, l'un chaud (température  $T_1$ ), l'autre froid (température  $T_2$ ), en vis-à-vis total (c'est à dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre), le flux net échangé s'écrit:

$$\Phi = \text{flux émis} - \text{flux absorbé} = S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.19)$$

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann :  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} (W \cdot m^{-2} K^{-4})$

Si les deux corps ne sont pas en vis-à-vis total, le flux net échangé entre deux corps s'écrit :

$$\Phi = S F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.20)$$

T : température de la surface (K).

$F_{12}$ : Facteur de forme entre les surfaces S1 et S2.

S : aire de la surface ( $m^2$ ).

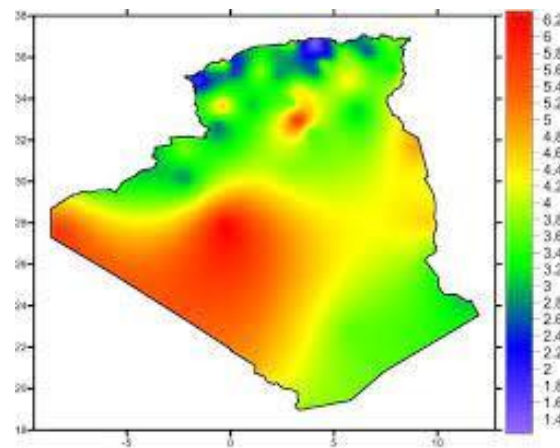
$\Phi$  : Flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces  $S_1$  et  $S_2$  (W).

Où  $F_{12}$  : est un nombre appelé facteur de forme qui fait intervenir la géométrie considérée et les émissivités des deux corps.

### I.8 Gisement solaire en Algérie

Ce gisement est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire satisfaire un dimensionnement solaire le plus exact.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la (figure I.11).



**Fig.I.11.** Carte de l'ensoleillement moyen en Algérie. [19]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel.

### I.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les bases indispensables pour la compréhension du sujet d'étude. On peut constater que l'énergie solaire est une énergie propre et disponible, mais malheureusement nous ne bénéficions pas assez de cette énergie gratuite. La connaissance des mouvements et des positions du soleil pour un observateur terrestre, permet de mettre à jour les principales spécificités d'ensoleillement et de ressources solaires d'un site.

L'évaluation du rayonnement solaire reçu sur la terre nécessite des informations précises sur les paramètres météorologiques dans un lieu donné. Ces paramètres sont mesurés par des stations radiométriques.



# **Chapitre II**

## **Concentrateurs solaires**



## II. Les concentrateurs solaires

### II.1 Introduction

Les énergies fossiles sont les pires ennemies de la planète, avec l'épuisement de ces dernières, il est primordial de trouver de nouvelles sources d'énergies propres et renouvelables. En effet, le soleil est la meilleure alternative et doit être exploité vu sa propreté, sa gratuité, sa présence sur tous le globe terrestre et le fait qu'il est inépuisable.

Le développement des énergies renouvelables montre un engouement particulier pour le solaire thermique à concentration (Concentrating Solar Thermal Power ou encore CSP), la technologie la plus avancée du solaire thermique [20]. L'utilisation de l'énergie solaire pour la production de la chaleur a connu un développement considérable au cours du temps, un renouvellement important sur le plan théorique et expérimental.

Ses applications sont nombreuses, on peut citer, à titre d'exemple, le chauffage de l'eau, le séchage et les centrales thermodynamiques pour la production d'électricité [21].

Cependant, il existe deux types de captation du rayonnement solaire :

- Les capteurs photo thermiques qui captent et transforment directement le rayonnement solaire en chaleur
- Les capteurs photovoltaïques qui captent et transforment directement le rayonnement solaire en électricité.

Nous nous intéressons dans notre étude qu'à la première technique de conversion (la photo thermie).

### II.2 Capteurs solaires thermiques

La conversion du rayonnement solaire en énergie thermique (chaleur) se fait à l'aide des capteurs solaires. Le rayonnement solaire capté dit incident est transmis sous forme de chaleur à un fluide caloporteur (eau, gaz,...), c'est un processus de conversion d'énergie direct.

L'énergie ainsi obtenue est utilisée dans divers domaines (domestiques, industries,...). De revêtements sélectifs sont appliqués sur les surfaces absorbantes dans de nombreux capteurs afin d'augmenter l'efficacité de celles-ci.

Il existe deux techniques de captation thermique : captation sans concentration et captation avec concentration.

### II.2.1 Capteur sans concentration (Capteur plan)

Ce sont des collecteurs solaires thermiques qui transforment l'énergie solaire en chaleur à basse température grâce à un absorbeur. Sans concentration du rayonnement solaire, le flux solaire tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1 kW/m<sup>2</sup>. Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C. Par contre, ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent la composante directe et diffuse du rayonnement incident [22]. C'est-à-dire que même par temps couvert, le fluide caloporteur parvient à s'échauffer.

#### Principe de conversion

Un fluide caloporteur absorbe les calories emmagasinées sur la surface absorbante issues du rayonnement solaire incident. Une vitre en verre transparent pour le rayonnement solaire mais opaque au rayonnement infrarouge est utilisée pour créer un effet de serre. La face arrière du capteur est isolée par des isolants conventionnels pour éviter des pertes par conduction afin d'optimiser les performances du capteur [23]. Ces capteurs sont utilisés dans le domaine domestique.

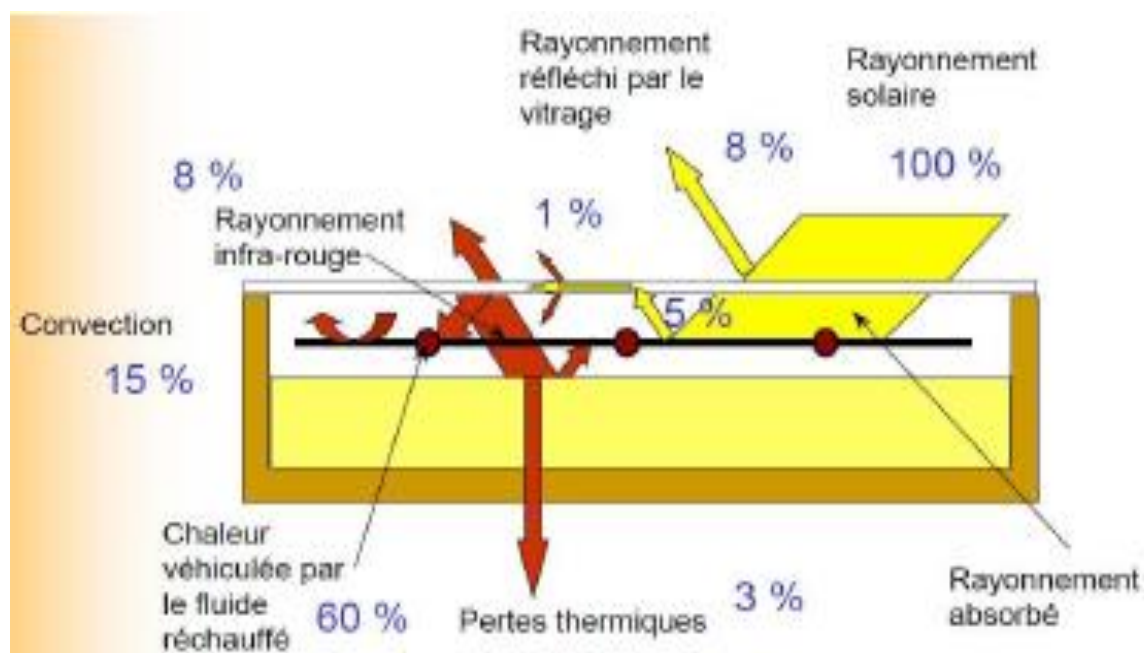


Fig.II.1. Schéma de principe des capteurs plans. [24]

## II.2.2 Capteur avec concentration

### a) Nécessité de la concentration

Les capteurs plans ne permettent pas, en général, de dépasser 130°C au niveau de la surface absorbante. Cette température peu élevée constitue une limite au rendement thermodynamique des systèmes qui les utilisent. Il faut une surface de 50 m<sup>2</sup> par kW, et ces capteurs ne sont pas adaptés à la production de fortes puissances. Et d'après le cycle théorique de Carnot, pour augmenter le rendement, il faut élever la température de la source chaude et, par conséquent, concentrer le rayonnement solaire [25].

### b) Principe

Les rayons incidents atteignent la surface réceptrice du concentrateur qui est réfléchissante, qui sont ensuite réfléchis vers une surface réceptrice plus petite qui se trouve en son point focal, cette concentration permet d'accroître l'intensité du flux solaire. L'énergie ainsi concentrée est transmise à un fluide caloporteur pour augmenter sa température et qui sera ensuite utilisé dans les différents procédés.

Les concentrateurs solaires permettent de diminuer la surface de réception, par conséquent, réduire les pertes thermiques, ce qui implique une température élevée. En pratique l'énergie rayonnée de façon diffuse ne peut pas être concentrée. Une orientation permanente et précise de ces capteurs s'avère nécessaire pour obtenir un bon rendement. Un système de captation de l'énergie solaire avec concentration sera donc le plus souvent un système dynamique contrairement aux capteurs plans d'où nécessité d'un mécanisme d'orientation.

Cependant, plusieurs technologies sont utilisées pour la concentration du rayonnement solaire.

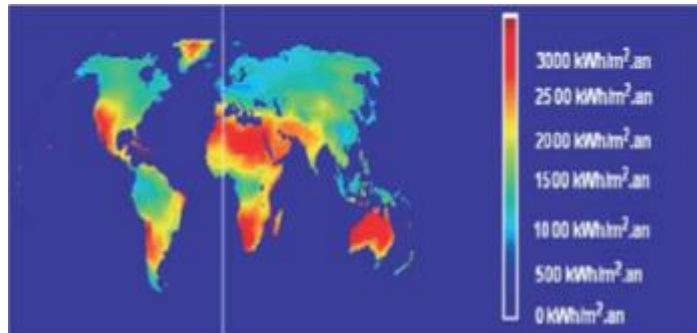
### c) Le potentiel solaire à concentration dans le monde

Le solaire à concentration nécessite un ensoleillement direct élevé et un faible taux d'humidité, il est particulièrement adapté au sud-ouest américain, au Moyen-Orient, au pourtour méditerranéen, aux déserts d'Australie ou du Chili. Les Etats-Unis et l'Espagne sont actuellement les deux marchés les plus importants et les plus attractifs [21]. Avec 2.381.741km<sup>2</sup> de surface, l'Algérie est le pays le plus vaste du pourtour méditerranéen. Selon une étude de l'agence aérospatiale allemande, l'Algérie offre de plus grandes possibilités intéressantes, à long terme, pour investir dans les centrales thermiques solaires.

En effet l'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays

enseillés dans le monde avec un ensoleillement direct moyen annuel de plus de 2000 kWh/m<sup>2</sup>.an.

Le potentiel des ressources solaires du pays est optimal pour l'exécution des projets des concentrateurs solaires, le Sahara notamment. [26]



**Fig.II.2.** Distribution du gisement solaire à concentration dans le monde. [27]

Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 GWh d'électricité par an, grâce à la technologie des centrales solaires. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est un processus direct. L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. [28]

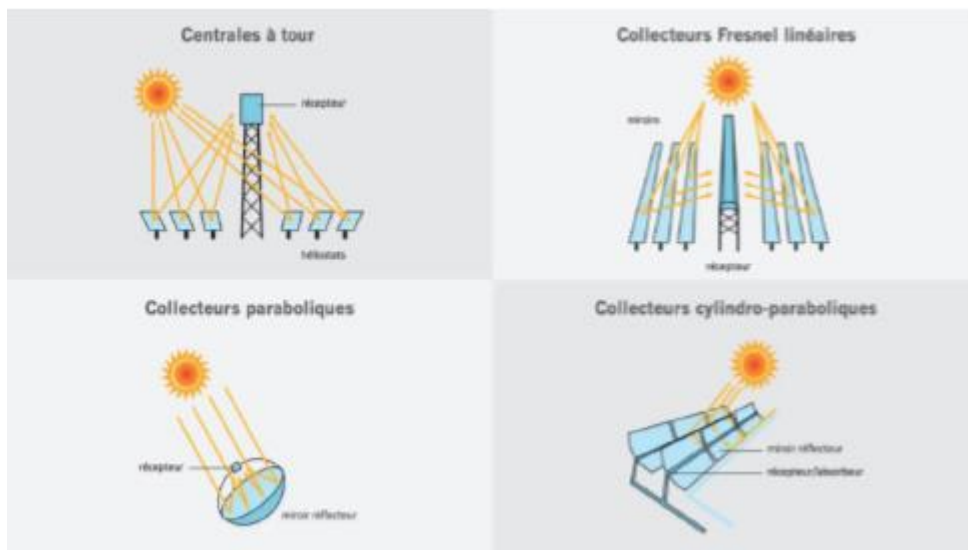
#### **d) Différentes technologies de concentration**

Les conceptions solaires à haute température nécessitent des systèmes de concentration, tels que les systèmes paraboliques réflecteurs, les centrales thermiques solaires dotées de technologies de concentration importants. Ce sont d'importants candidats pour fournir de l'énergie solaire en quantité nécessaire au cours des prochaines décennies.

Il s'agit de concentrer le rayonnement solaire et une grande variété de configuration est possible. Quatre technologies d'énergie solaire à concentration ont été développées et peuvent être classées en deux catégories :

- Les systèmes de concentration linéaire : cylindro-parabolique, miroir de Fresnel,
- Les systèmes de concentration ponctuelle : récepteur central (tour), parabole-Stirling.

Ces technologies, ne valorisent que la composante directe du rayonnement solaire, et sont équipées de dispositifs de suivi de la trajectoire du soleil et de miroirs pour concentrer ces rayons.



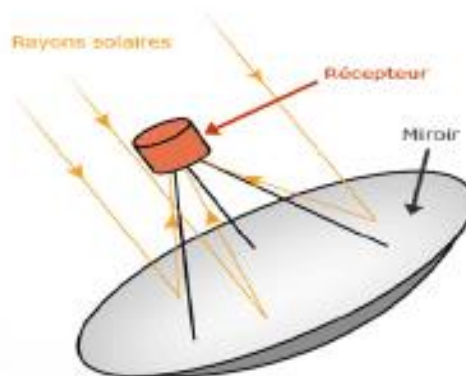
**Fig. II.3.** Capteurs solaires à concentration. [29]

- **Filière parabolique**

Les capteurs paraboliques fonctionnent de manière autonome. Ils suivent le soleil sur deux axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température pouvant atteindre 750°C.

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité, qui est d'ordre de (29.4%).

Un de leurs principaux avantages est qu'ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Ils possèdent donc également un important potentiel de développement, particulièrement dans des régions peu peuplées de certains pays du sud. En outre cette technologie reste tout de même la plus coûteuse de toutes.

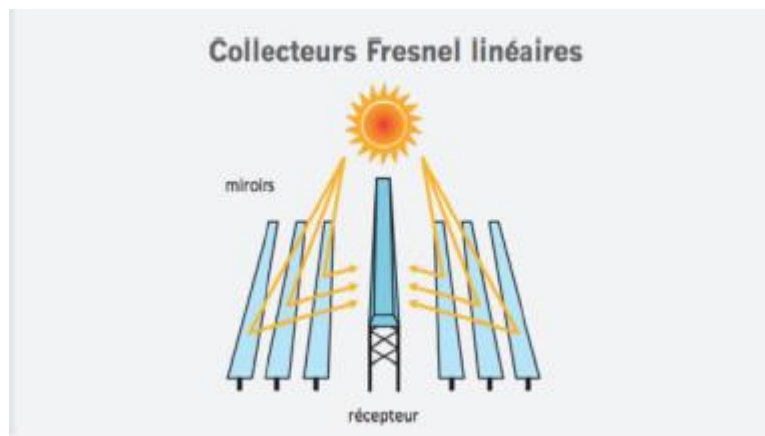


**Fig.II.4.** Concentrateur parabolique

- **Filière Fresnel**

Cette filière est simple et peu coûteuse. Les collecteurs sont des miroirs en bandes parallèles disposés à plat et près du sol concentrant les rayons sur des tubes récepteurs fixes. L'eau, portée à 100 bars et à 500°C, est utilisée comme fluide caloporteur et comme fluide de travail qui fait fonctionner une turbine/générateur électrique. Son principe est similaire à celui de la filière cylindro-parabolique mais elle utilise des miroirs plans ou légèrement incurvés moins chers que les réflecteurs paraboliques.

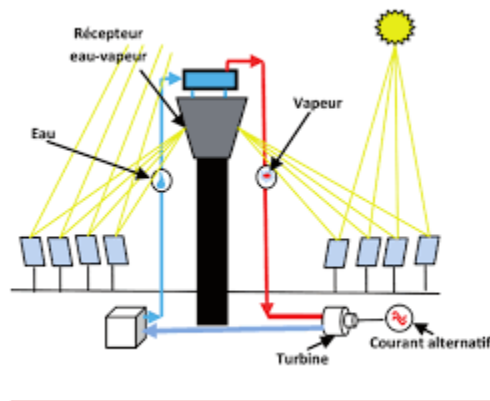
Cette filière possède les plus faibles performances optiques et le plus faible rendement solaire-électrique annuel net (10%) mais son empreinte au sol est de 1,5 ha/MW, soit moins de 60% par rapport aux centrales à collecteurs cylindro-paraboliques.



**Fig.II.5.** Schéma du principe des miroirs de Fresnel. [30]

- **Tours solaires**

La tour n'est en fait qu'une cheminée. L'air, sous une serre gigantesque, le "collecteur", placée tout autour de la cheminée centrale, est chauffé par le Soleil et dirigé vers le haut par convection, le déplacement de l'air permettant à des turbines situées à l'embouchure de la cheminée de produire de l'électricité. Son fonctionnement se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève.



**Fig.II.6.** Schéma d'une centrale à tour. [31]

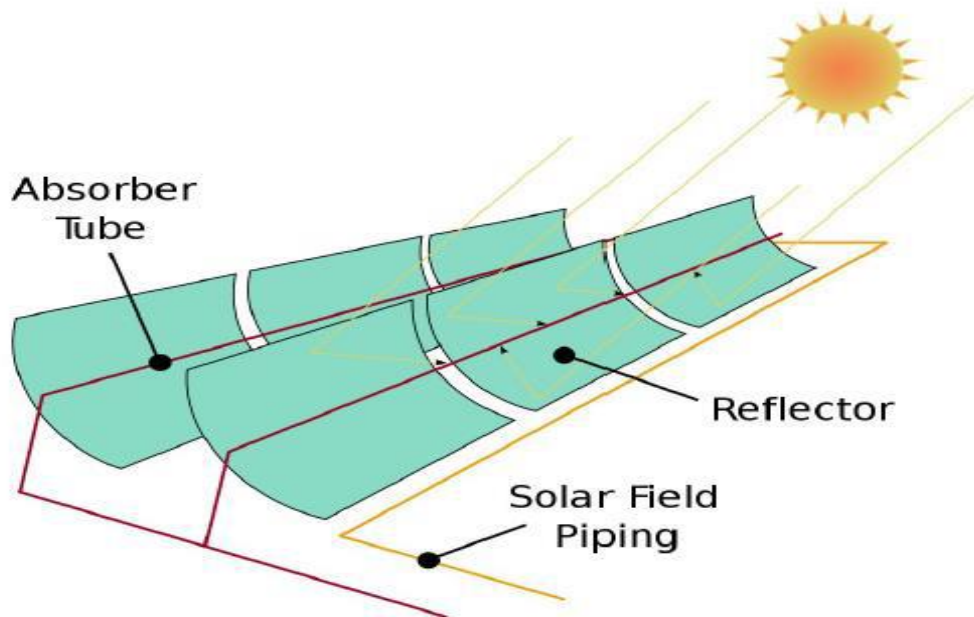
Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un récepteur situé au sommet de la tour solaire.

Le facteur de concentration varie de 600 à plusieurs milliers, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 800 °C à 1000°C [28]. Le rendement maximal des centrales à tour à cycle de Rankine est de l'ordre de 22% pour un rendement annuel net d'environ 16%.

L'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée. L'empreinte au sol sans stockage est de 4 ha/MW. Les héliostats acceptent un terrain pentu.

- **Filière cylindro-parabolique**

C'est la filière de loin la plus mature. Ces systèmes utilisent une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur [26]. Le concentrateur suit la course du soleil en tournant sur un axe. Le fluide caloporteur, généralement une huile de synthèse, chauffé lors de son passage dans les tubes, circule à travers une série d'échangeurs de chaleur pour produire de la vapeur surchauffée avec des températures pouvant atteindre 400 °C, faisant fonctionner une turbine/générateur électrique.



**Fig.II.7.** Schéma d'un collecteur cylindro-parabolique. [32]

## II.3 Etude du concentrateur solaire cylindro-parabolique

### II.3.1 Les composants d'un concentrateur cylindro parabolique

Afin d'augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, nécessite des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite, les différentes parties du CCP sont les suivantes :

- Structure support
- Moteurs
- Contrôleurs (boucles ouvertes ou fermées)
- Miroir (verre épais, mince)
- Tube absorbant (sélectif, sous vide, connectique)
- Suivi solaire

Les composants principaux qui caractérisent le fonctionnement d'un cylindro parabolique sont comme suit [33] :

- **Le réflecteur parabolique**

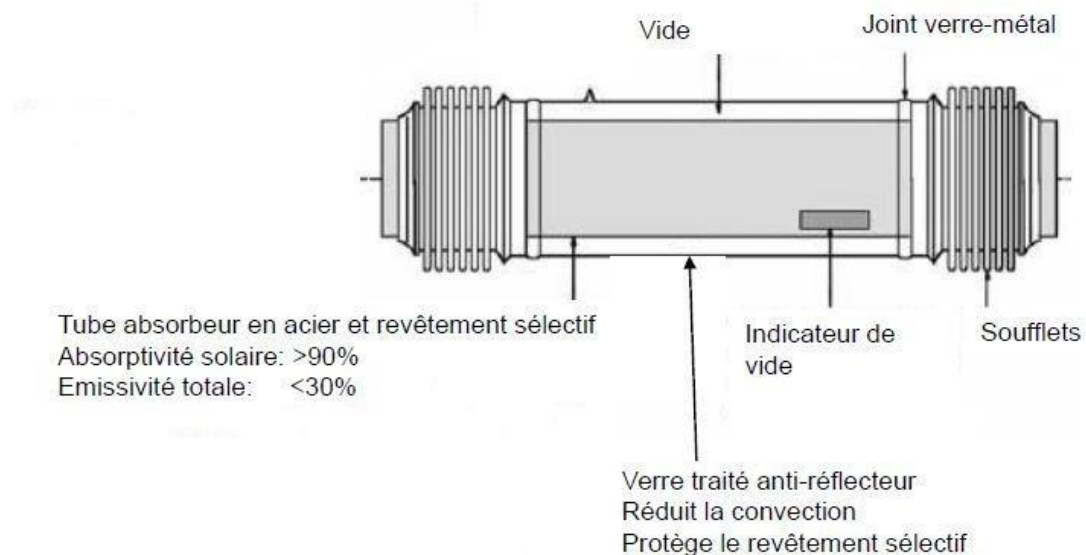
Les miroirs sont composés de verre pauvre en fer, dont la transmissivité atteinte 98%. Ce verre est recouvert d'une pellicule d'argent en sa partie inférieure, et d'un enduit spécial de protection. Un réflecteur de bonne qualité peut réfléchir 97% du rayonnement incident.

Le facteur de concentration pour un capteur cylindro-parabolique est d'approximativement 80%.

- **Le tube absorbeur**

Souvent en cuivre, le tube absorbeur est entouré d'une enveloppe transparente en verre, il est placé le long de la ligne focale du concentrateur et doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Bonne absorption du rayonnement : son coefficient d'absorption doit être plus élevé possible afin d'éviter toute perte de rayonnement à cette étape.
- Pertes thermiques limitées : vu que la température du tube dépasse généralement 400°C et afin de limiter les pertes par échanges convectifs et radiatif, le tube est entouré d'une enveloppe de verre sous vide.



**Fig.II.8.**Structure du tube absorbeur. [34]

- **Les fluides caloporteurs**

Le fluide caloporteur a pour rôle d'accumuler l'énergie thermique dans les collecteurs et de la transporter au réservoir d'alimentation, les critères de sélection du fluide doivent répondre à certaines exigences :

- Température de solidification faible et température d'évaporation élevée.
- Stabilité thermique, faible explosivité et inflammabilité, non polluant.
- Capacité calorifique importante, forte conductivité et faible viscosité.

Les types de fluides caloporteurs utilisés dans cette technologie sont :

- Huile thermique

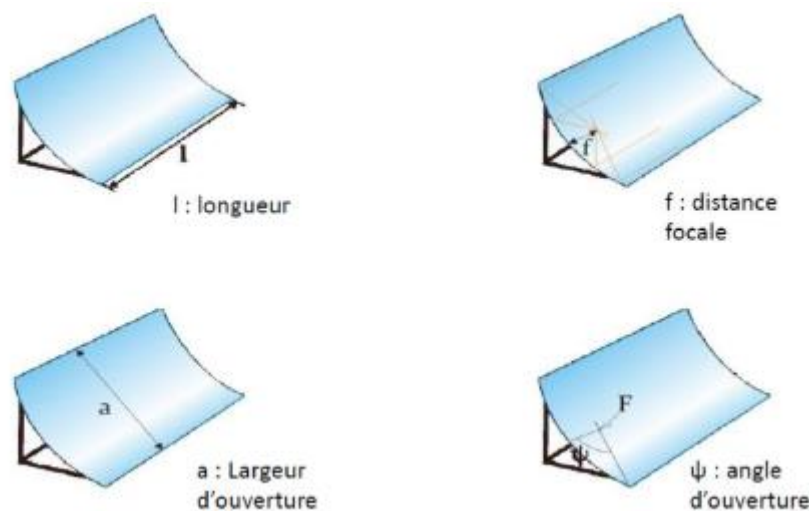
- Eau/Vapeur
  - Eau chaude pressurisée
  - Génération directe de vapeur (à 500°C)
- Sels fondus
- Gaz pressurisé

### II.3.2 La géométrie et l'optique des concentrateurs cylindro-parabolique

Le concentrateur cylindro-parabolique est caractérisé par deux paramètres principaux, les paramètres géométriques et les paramètres optiques.

#### II.3.2.1 Les paramètres géométriques [35]

Les quatre paramètres suivants sont utilisés pour caractériser la forme et la taille d'un cylindro parabolique : la longueur de cylindro-parabolique, la distance focale, la largeur de l'ouverture et l'angle d'ouverture (Figure II.5).



**Figure. II.9.** Les paramètres géométriques d'un cylindro parabolique. [36]

#### a) La longueur du cylindro-parabolique

C'est la longueur du miroir, elle peut atteindre les 4.06 m.

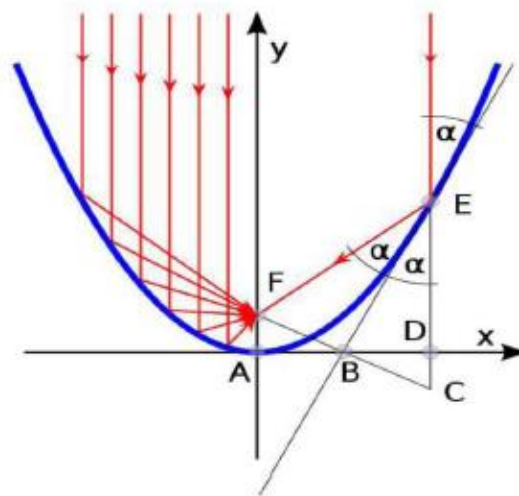
#### b) La distance focale

C'est la distance entre le point focale et la courbe de la parabole. La focale de la parabole (f ou F) est le paramètre qui décrit la forme de la parabole. Figure (II.6). L'équation de parabole est :

$$y = a \cdot x^2 \quad \text{Avec : } a = \frac{1}{4 \cdot F} \quad y = \frac{1}{4 \cdot F} x^2$$

L'équation devient donc :

$$y = \frac{d}{(0,5 \times w)^2} \times x^2 \quad (2.1)$$



**Fig.II.10.**Trajectoire des rayons parallèles dans un miroir parabolique. [37]

### c) L'angle d'ouverture ( $\psi$ )

C'est l'angle au point focal entre l'axe optique (Y) et le segment reliant le point focal au bord du miroir.

Deux des trois paramètres de l'angle d'ouverture, de la largeur d'ouverture et de la distance focale sont suffisants pour déterminer la forme et la tailles d'un cylindro-parabolique, cela signifie également que deux des trois sont suffisants pour calculer le troisième.  $\Psi$  peut être exprimée en fonction du rapport entre la largeur d'ouverture et la distance focale.

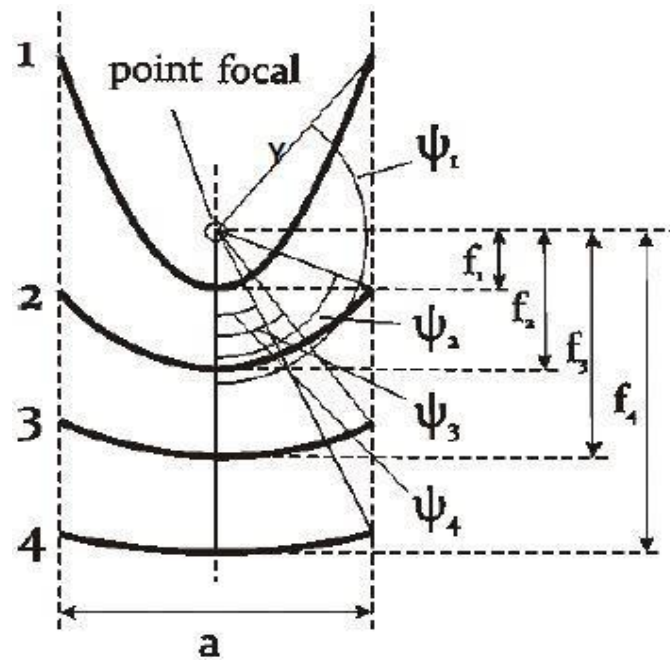
$$\tan \psi = \frac{\frac{a}{f}}{2 - \frac{1}{8} \left(\frac{a}{f}\right)^2} \quad (2.2)$$

De même, le rapport de la largeur de l'ouverture à la focale peut être exprimé en fonction de l'angle d'ouverture :

$$\frac{a}{f} = -\frac{4}{\tan \psi} + J \frac{16}{\tan^2 \psi} + 16 \quad (2.3)$$

L'angle d'ouverture est lié à la distance entre les différentes parties des miroirs et la ligne focale.

Il existe un angle d'ouverture optimal qui prend en compte aussi le prix du miroir proportionnel à sa surface. L'angle d'ouverture des cylindro paraboliques réels est d'environ 80°.



**FigII.11.** Relation entre la focale et l'angle d'ouverture pour une ouverture constante. [38]

#### d) La largeur de l'ouverture $a$

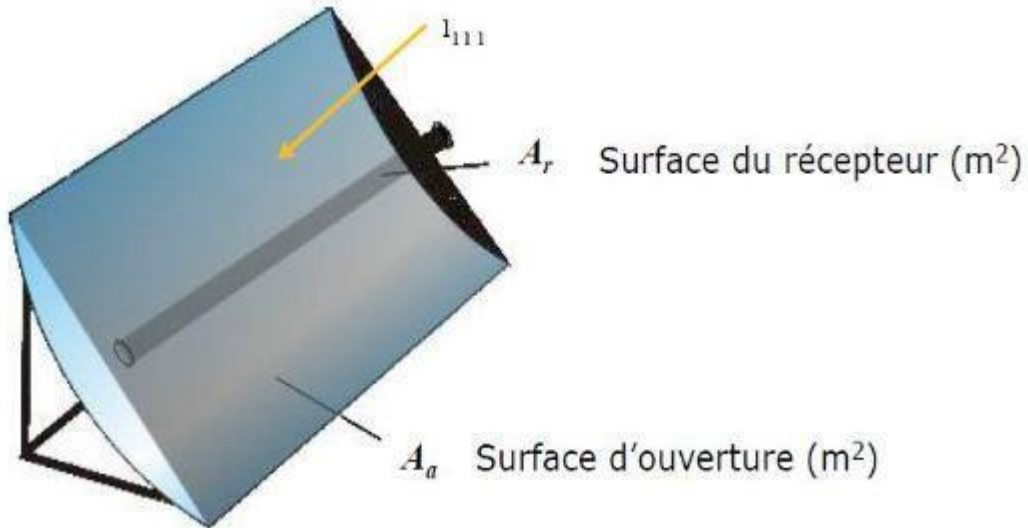
La plupart des collecteurs réels sont d'une largeur d'ouverture d'environ 6 m, la distance focale est (approximativement à l'angle d'ouverture et à la largeur d'ouverture) d'environ 1,75 m et la longueur du module est comprise entre 12 et 14 m. Il existe des collecteurs qui ont des largeurs d'ouverture plus petites (Solarlite) ou plus grandes (Skyfuel, Heliotric) avec différentes longueurs focales correspondantes.

### II.3.2.2 Performances optiques d'un concentrateur cylindro parabolique

- La surface du miroir et la surface d'ouverture

Pour un (rayonnement normal direct) et une position solaire donnée; la surface d'ouverture du miroir est calculée comme le produit de la largeur de l'ouverture  $a$  et de la longueur du collecteur  $l$ .

$$A_a = a \cdot l \quad (2.4)$$



**Fig.II.12.**Surface d'ouverture du collecteur et du récepteur. [39]

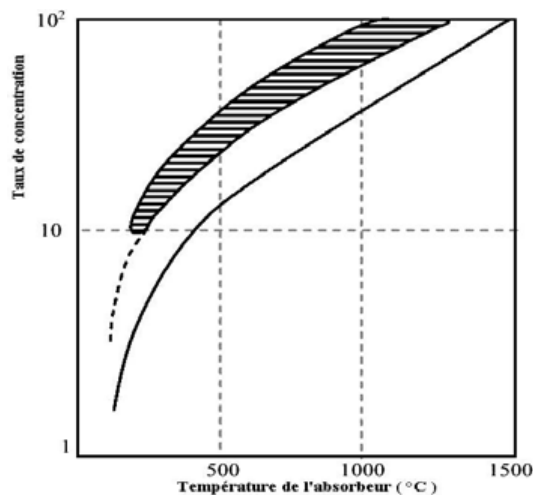
La surface d'un cylindro-parabolique peut être importante pour déterminer le besoin de matière pour la fabrication. La surface est calculée comme suit :

$$A = \left( \frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} + 2 \cdot f \cdot \ln \left( \frac{a}{4f} \sqrt{1 + \frac{a^2}{16f^2}} \right) \right) \cdot l \quad (2.5)$$

• **Taux de concentration**

La définition la plus commune du taux de concentration est basée sur la notion de surface. Elle est donnée comme étant le rapport de la surface de l'ouverture à la surface du récepteur, [40].

$$C = A_0 / A_r \quad (2.6)$$



**Fig.II.13.** Relation entre le taux de concentration et la température du récepteur. [41]

- Les faibles concentrations :  $(1 < C < 10 \Rightarrow T_c \approx 150^\circ C ;$

- Les moyennes concentrations : ( $10 < C < 100 \Rightarrow T_c \approx 150^\circ C$  ;
- Les fortes concentrations : ( $C \geq 500 \Rightarrow T_c \geq 500^\circ C$ ).

- **Rayonnement absorbé**

Le rayonnement absorbé par unité de surface d'ouverture, peut être écrit comme suit : [40]

$$E = E_b \cdot \rho(\gamma \cdot \tau) C \quad (2.7)$$

### II.3.3 Les différents modes de transfert thermique dans un capteur cylindro-parabolique

#### a) Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur [42]

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube absorbeur, est calculée par l'équation de Dittus-Boelter pour l'écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent, le nombre de Nusselt local est donné par :

$$Nu_1 = 0.023 Re_1^{4/5} \times Pr_1^4 \quad (2.8)$$

$Pr$  : est le nombre de Prandtl et  $Re_1$  le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds  $Re_1$  pour un flux dans un tube circulaire est donné par :

$$Re_1 = \frac{4\rho_f}{\pi D_{absi} \mu_f} \quad (2.9)$$

$\mu_f$  : Viscosité du fluide caloporteur.

Le nombre de Prandtl est donné par la relation suivante :

$$Pr_1 = \frac{\mu_f C_f}{K_f} \quad (2.10)$$

Le flux de chaleur gagné entre le fluide caloporteur et l'absorbeur  $Pr_1$  est donné par l'équation suivante :

$$q_{gagné} = h_1 \pi D (T_{abs} - T_f) \quad (2.11)$$

Les propriétés du fluide caloporteur  $K_f$ ,  $C_f$ ,  $\mu_f$  et  $\rho_f$  sont en fonction de la température  $T_{abs}$ .

#### b) Entre l'absorbeur et l'environnement du verre

Dans ce cas, nous avons deux modes de transfert de chaleur. La convection et le rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre.  $q_{intérieure}$  Est calculée comme suit :

$$q_{intérieure} = q_{intérieure} \text{ convection} + q_{intérieure} \text{ rayonnement}$$

La convection dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre est estimée par des relations de la convection naturelle entre deux cylindres horizontaux et concentriques, cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froid que le tube absorbeur ( $T_{abs} > T_v$ ) :

$$q_{interieur\ convection} = \frac{2\pi k_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{iv}}{D_{e\ abs}}\right)} (T_{abs} - T_v) \quad (2.12)$$

$D_{e\ abs}$  : Diamètre extérieur du tube absorbeur.

$D_{iv}$  : Diamètre intérieur de l'enveloppe du verre.

$k_{eff}$  : La conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par :

$$\frac{k_{eff}}{k_{air}} = 0.386 \left[ \frac{Pr_{air}}{0.861 + Pr_{air}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.13)$$

$Pr_{air}$  : Représente le nombre de Prandtl de l'air dans l'espace annulaire entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre.

$k_{air}$  : La conductivité thermique de l'air.

Le transfert thermique par rayonnement  $q_{int-ray}$  entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante :

$$q_{interieure,rayonnement} = \frac{\sigma \pi D_{abs} (T_{abs}^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g} \left(\frac{D_{abs}}{D_{vi}}\right)} \quad (2.14)$$

$\epsilon_{abs}$  : L'émissivité de l'absorbeur et elle dépend de la température de l'absorbeur.

$\epsilon_g$  : L'émissivité de l'enveloppe du verre dans ce model  $\epsilon_g$  prend la valeur 0 ; 9

$\sigma$  : La constante de Stefan Boltzmann.

### c) Entre l'enveloppe du verre et l'environnement

On suppose que le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement est dû à la convection et au rayonnement.

$$q_{exterieur} = q_{exterieure,convection} + q_{exterieur,rayonnement}$$

Le nombre de Nusselt dû à la convection est donné par la formule suivante :

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} + \left[1 + \left[\frac{Re}{282}\right]^{5/8}\right]^{4/5} \quad (2.15)$$

Pour l'enveloppe de verre, le nombre de Reynolds (Re) est défini par :

$$R_e = \frac{\rho_{air,amb} \times V_{vent} \times D_{ve}}{\mu_{air,amb}} \quad (2.16)$$

$V_{vent}$  : Vitesse du vent.

$\rho_{air,amb}$  et  $\mu_{air,amb}$  : sont respectivement la densité et la viscosité de l'air.

$D_{ve}$  : Diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Le nombre de Prandtl (Pr) est toute les propriétés de l'air sont fonction de la température moyenne de l'air :

$$T_{amb} = 0,5(T_{abs} + T_{amb}) \quad (2.17)$$

La densité de l'air dans ce cas est une fonction de la pression atmosphérique. Le transfert thermique à l'environnement dû à la convection est :

$$q_{ext,conve} = h \times \pi \times D_{ve}(T_v - T_{amb}) \quad (2.18)$$

Avec :

$$h = \frac{N_u \times K_{air,amb}}{D_{ve}}$$

Le transfert thermique à l'environnement dû au rayonnement peut s'exprimer par :

$$q_{ext,ray} = \varepsilon \times \pi \times D_{ve}(T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (2.19)$$

### II.3.4 Bilan énergétique

#### a) Facteurs Optiques [42]

Le facteur d'interception  $\gamma$  est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes. Il traduit le fait que certains rayons solaire peuvent être renvoyés vers l'extérieur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal. Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le facteur d'interception  $\gamma$  est donné par l'équation générale suivante (2.20) :

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi}{2 \cos \varphi} \int_0^\varphi \operatorname{erf} \left[ \frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_1)(1 - 2d'x \sin \varphi_1) - \pi \beta'(1 + \cos \varphi_1)}{\sqrt{2\pi\sigma'(1 + \cos \varphi)}} \right] \\ - \operatorname{erf} \left[ \frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_1)(1 - 2d'x \sin \varphi_1) + \pi \beta'(1 + \cos \varphi_1)}{\sqrt{2\pi\sigma'(1 + \cos \varphi)}} \right] \frac{d\varphi_1}{(1 + \cos \varphi_1)}$$

La fonction d'erreur erf est définie comme suit :

$$(\operatorname{y erf}) = \frac{2}{\pi} x \int_0^y e^{-z^2} x dz \quad (2.21)$$

$\varphi$  : L'angle d'ouverture

### II.3.5 Bilan thermique [42]

En pratique, Le flux solaire ainsi que toutes les variables climatiques sont en évolution permanente, aussi l'étude (qui n'est pas la nôtre) sera menée en régime transitoire. Avant de dresser le bilan thermique au niveau de tous les composants du concentrateur cylindro-parabolique nous rappellerons que l'inertie thermique est le stockage d'énergie dans un volume. Elle correspond à l'augmentation de son énergie interne et a pour expression :

$$\mathbf{m}_i \times \mathbf{Cp}_i \times \frac{dT_i}{dt} \quad (2.22)$$

Cette énergie stockée est donnée par la relation :

$$\mathbf{m}_i \times \mathbf{Cp}_i \times \frac{dT_i}{dt} = \sum \mathbf{q}_i + \mathbf{p}_i \quad (2.23)$$

Avec  $\mathbf{q}_i$  et  $\mathbf{p}_i$  respectivement les différents échanges thermiques et le terme de source.

Le bilan thermique d'un collecteur a généralement pour expression :

$$\mathbf{q}^* = \mathbf{q}_u + \mathbf{q}_a + \mathbf{q}_t \quad (2.24)$$

Où :

$\mathbf{q}^*$  : Energie absorbée par le capteur.

$\mathbf{q}_u$  : Puissance utile qui permet de réchauffer le fluide caloporteur.

$\mathbf{q}_a$  : Énergie perdue vers l'environnement.

$\mathbf{q}_t$  : Énergie qui dépend de l'inertie thermique de l'installation

- En régime permanent

$$\mathbf{q}_t = 0$$

- En régime transitoire

$$\mathbf{q}_t = \sum \mathbf{m}_i \times \mathbf{Cp}_i \times \frac{dT_i}{dt} \quad (2.25)$$

Avec :

$\mathbf{q}_t$  : Puissance provenant du réchauffement du capteur.

#### II.3.5.1 Bilan thermique (vitre paroi extérieure)

La paroi extérieure de la vitre échange de la chaleur avec :

- La paroi intérieure par conduction

- L'environnement par convection
- Le ciel par rayonnement

Ces échanges ont pour expression :

$$M_v \times c_{p_v} \times \frac{dT_{ve}}{(2 \times dt)} = q_{cond.v} - q_{conv.v} - q_{ray.v-c} + \frac{P_v}{2} \quad (2.26)$$

### II.3.5.2 Bilan thermique (vitre paroi intérieure)

La paroi intérieure de la vitre échange de la chaleur avec :

- La paroi extérieure par conduction
- L'absorbeur par convection et rayonnement

Ces échanges sont exprimés par :

$$M_v \times C_{p_v} \times \frac{dT_{vi}}{(2 \times dt)} = -q_{cond.v} + q_{conv.v-ab} + q_{ray.v-ab} + \frac{P_v}{2} \quad (2.27)$$

### II.3.5.3 Bilan thermique (tube absorbeur)

L'absorbeur échange de la chaleur avec :

- La vitre paroi intérieure par convection et par rayonnement
- Le fluide caloporteur par convection

Ces échanges sont donnés par la relation :

$$M_{ab} \times C_{p_{ab}} \times \frac{dT_{ab}}{dt} = -q_{conv.ab-v} - q_{conv-ab_f} - q_{ray.ab-v} + P_{ab} \quad (2.28)$$

### II.3.5.4 Bilan thermique (fluide caloporteur)

Le fluide caloporteur échange de la chaleur avec l'absorbeur par convection [43] :

$$m_f \times C_{p_f} \times (T_{fs} - T_{fe}) = q_{convab-f} \quad (2.29)$$

## II.3.6 Performances thermiques d'un concentrateur cylindro parabolique

On pourra calculer la puissance gagnée au collecteur ( $Q_u$ ), en connaissant les valeurs des grandeurs ( $F_R$ ) et ( $U_L$ ) [44].

### II.3.6.1 Coefficient des pertes thermiques UL (tube couvert)

Dans le cas où l'absorbeur est couvert d'un tube de verre de surface ( $A_c$ ), le coefficient d'irradiation entre le couvert et l'absorbeur est différent du coefficient entre l'absorbeur et le couvert, qui est généralement négligeable [6]. Le coefficient des pertes thermiques s'écrit comme suit :

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_v + h_{r,c-a})A_c} + \frac{1}{h_{r,a-c}} \right]^{-1} \quad (2.30)$$

Avec :

$$h_{r,a-c} = \frac{\sigma \cdot (T_r^2 - T_e^2) \cdot (T_r - T_c)}{\frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r} + \frac{1}{F_{re}} + \frac{(1 - \varepsilon_c) \cdot A_r}{\varepsilon_c \cdot A_c}}$$

Et :

$$h_{r,c-a} = 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^3$$

On peut écrire le Coefficient global de transfert fluide-absorbeur en fonction de  $U_L$  comme suit :

$$F_R = \frac{m \cdot c_p}{A_r \cdot U_L} \left[ 1 - e^{-\left( \frac{A_r \cdot U_L \cdot F'}{m \cdot c_p} \right)} \right] \quad (2.31)$$

Ou :

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_e}{h_{fi} \cdot D_i} + \left( \frac{D_e}{2k} \cdot \ln \left( \frac{D_e}{D_i} \right) \right)}$$

### II.3.7 Puissance utile $Q_u$

La puissance utile, représentée par la puissance récupérée par le collecteur au niveau du foyer, peut être déterminée par l'expression suivante.

$$Q_u = F_R \times [\rho \cdot \tau \cdot \gamma \cdot A_0 - U_1 \cdot A_r \times (T_e - T_a)] \quad (2.32)$$

### II.3.8 Température de sortie du fluide caloporteur $T_s$

Pour calculer la température de sortie, l'équation suivante a été utilisée ; [45] :

$$T_s = T_e + \frac{Q_u}{m \times c_p} \quad (2.33)$$

### II.3.9 Rendement global du concentrateur solaire $\eta$

Pour la détermination du rendement global du concentrateur, l'expression suivante a été utilisée. [45]

$$\eta = \frac{Q_u}{E \times A_0 \times \gamma} \quad (2.34)$$

## II.4 Conclusion

A partir de ce chapitre, nous avons pris connaissance des différents types de capteurs solaires, présenté des notions et leurs principes, leurs compositions et les paramètres qui influent sur leur mise en place. Des études et des expériences ont montré que le rendement du

concentrateur solaire dépend de plusieurs paramètres internes liés au dispositif lui-même et externe liés à l'environnement du fonctionnement : intensité du rayonnement et de la température.



**Chapitre**  
**III**  
**Les MCP**

### III. Les matériaux à changement de phase

#### III.1 Introduction

Le Stockage de l'énergie thermique (TES: Thermal Energie Storage) en général, et les matériaux à changement de phase en particulier, ont été un sujet principal dans la recherche au cours des 20 dernières années, mais bien que l'information est quantitativement énorme, il est également largement répandu dans la littérature, et difficile à trouver.

L'intérêt pour le stockage l'énergie thermique est international car il traite de l'économie d'énergie, l'utilisation efficace et rationnelle des ressources disponibles et l'utilisation optimale des énergies renouvelables. Dans ce cadre, le TES fournit des solutions dans des domaines très spécifiques:

Le temps de retard et la puissance disponible entre la production ou la disponibilité de l'énergie et sa consommation dans les systèmes de réception (de l'énergie solaire, cogénération, etc.), la sécurité de l'approvisionnement énergétique (hôpitaux, centres informatiques..., etc.) [46]

#### III.2 Stockage de l'énergie thermique

L'énergie thermique peut être stockée sous la forme d'un changement de l'énergie interne d'un matériau sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente et thermochimique ou d'une combinaison de celle-ci. Un aperçu majeur de la technique du stockage de l'énergie solaire thermique est représenté sur la figure ci-dessous. [47]

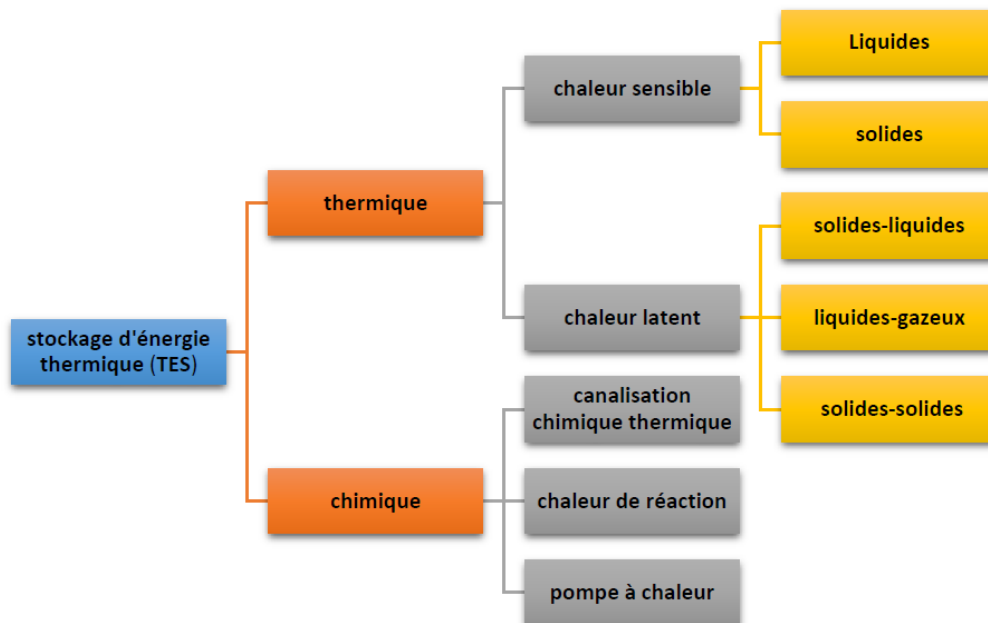


Fig.III.1 : Différents types de stockage thermique de l'énergie thermique. [48]

III.2.1 Stockage par chaleur sensible

Dans une unité de stockage de chaleur sensible, de l'énergie thermique est stocké par modification de la température du support de stockage, qui peut être un liquide ou un solide. La quantité d'énergie stockée dans l'unité dépend de la capacité calorifique du fluide, des changements de température et de la quantité du matériau de stockage. Ainsi, il est souhaitable que le support de stockage ait une grande capacité thermique spécifique, stabilité à long terme sous le cycle thermique, la compatibilité avec son enceinte de confinement et, surtout, à faible coût. Le stockage de chaleur sensible peut être classé sur la base du support de stockage de chaleur que le stockage de milieux liquides tels que l'eau, les fluides à base d'huile, sel fondu, etc., ou solide et le stockage des supports comme des pierres, des métaux et d'autres. [49]

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_p(T_f - T_i) \tag{3.1}$$

Où :

$T_f$  : Est la température initiale [K].

$T_i$  : Est la température finale [K].

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

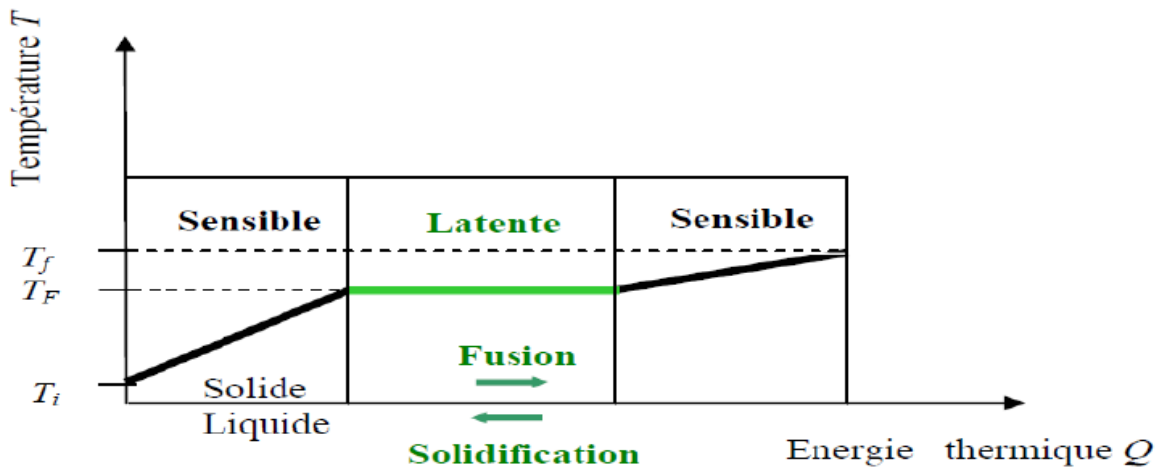


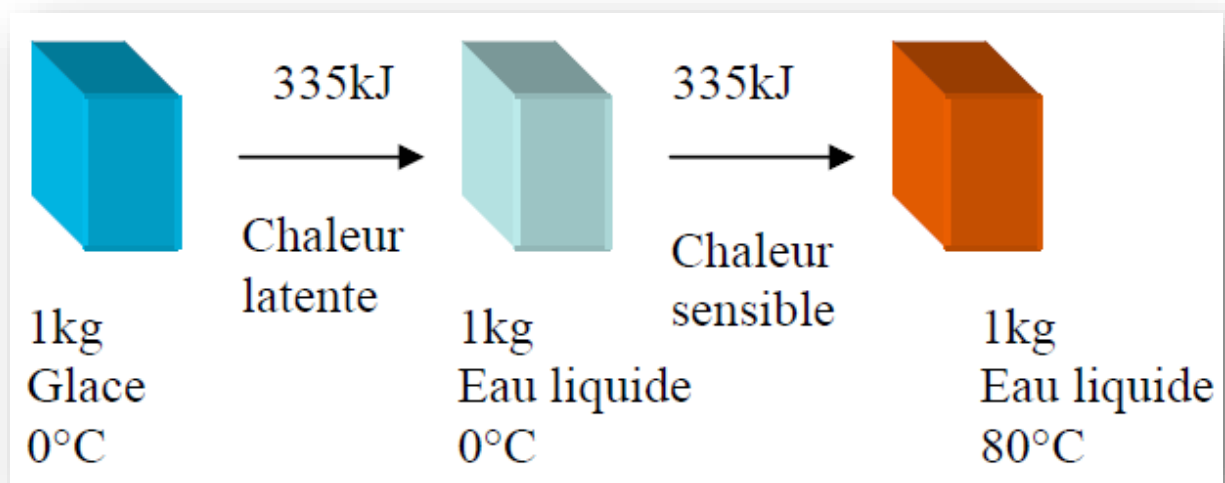
Fig.III.2: Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état.

III.2.2 Le stockage par chaleur latente

Comme le stockage par chaleur latente permet de stocker une grande quantité d'énergie, ce type de stockage est une technique attractive. De plus, il permet de stocker la chaleur sous

la forme de chaleur latente de fusion à une température constante, cette température correspondant à la température de la transition de phase.

Pour donner des ordres de grandeur, l'énergie demandée pour fondre 1 kg de glace est 80 fois l'énergie demandée pour augmenter la température de 1 kg d'eau de 1°C, autrement dit et pour chiffrer l'énergie nécessaire, alors que l'on a besoin d'une énergie de 4,2 kJ pour diminuer la température de 1 kg d'eau d'une température de 1 °C à 0°C, il faut 335 kJ pour compléter sa solidification en glace à  $T = 0^{\circ}\text{C}$ .



**Fig.III.3.** Equivalence entre la chaleur latente et chaleur sensible. [50]

On remarque donc que:

- La chaleur latente est beaucoup plus importante que la chaleur sensible (pour un écart de Température pas trop important). Les points de fusion dépendent des corps utilisés; ce critère permet d'utiliser des matériaux différents en fonction des températures souhaitées. Ces matériaux sont les matériaux à Changement de Phase (MCP).

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

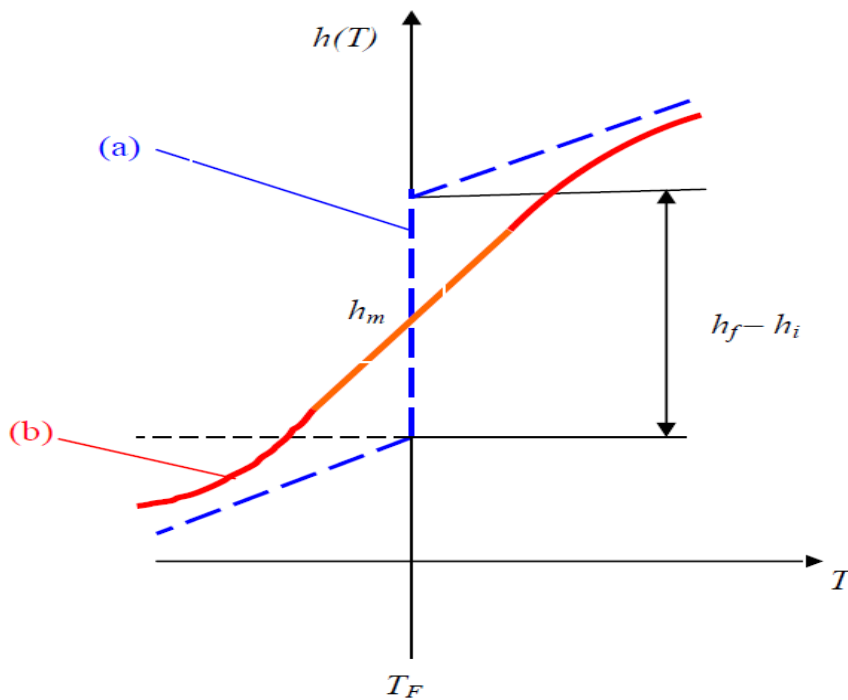
$$Q = m(h_f - h_i) = m\Delta h_f \quad (3.2)$$

Où  $\Delta h_f$  est l'enthalpie spécifique de fusion. Généralement, il faut porter le matériau initialement à  $T_i$  à sa température de fusion  $T_f$  et l'on écrit :

$$Q = m(h_f - h_i) = mC_p(T_f - T_i) + m\Delta h_f \quad (3.3)$$

Dans le cas d'un corps pur on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la (courbe (a) de la figure (III.4). On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température). Dans le cas d'un mélange (alliage,...), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) figure (III.4) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente.



**Fig.III.4 :** Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température. [51]

En résumé, les avantages de la chaleur latente sont donc:

- des densités importantes de stockage,
- une température de changement de phase (solidification et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.

#### a) Les contraintes technologiques du stockage par chaleur latente

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

- Que le système de stockage supporte le changement de phase dans les limites des températures demandées pour ce changement.
- Que le système de stockage supporte le changement de phase avec le changement de volume qui lui est lié.

- Un conteneur capable de stocker les matériaux suivant leur nature.
- Une surface d'échange pour transférer l'énergie thermique entre la source de chaleur et le matériau à changement de phase.

**b) Les avantages du stockage par chaleur latente**

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

Les matériaux utilisés, dans la gamme des températures de confort en thermique du bâtiment (20 à 30°C), peuvent stocker de 5 à 14 fois plus de chaleur que les matériaux de stockage par chaleur sensible. Quand la décharge d'énergie thermique a lieu, la température de la surface de MCP reste proche de la valeur de la température de changement d'état. On a donc un contrôle passif de la température de la surface. La quantité d'énergie de la décharge ne dépend donc que de la température de l'environnement.

Le stockage par chaleur latente ne pose pas de problème de surchauffe saisonnière grâce à sa faible masse.

**III.3 Stockage Thermochimique**

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles.

Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente.

Pour ce système, la réaction chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs. [49]

**III.4 Les matériaux à changement de phase****III.4.1 Définition**

On appelle matériau à changement de phase, ou MCP, tout matériau capable de changer d'état physique dans une plage de température restreinte. Les matériaux à être utilisés pour le changement de phase pour un stockage d'énergie thermique doivent avoir une grande chaleur

latente et une conductivité thermique élevée. Ils doivent avoir une température de fusion comprise entre 10 °C et 80 °C environ, Dans cet intervalle de température, le changement de phase prépondérant reste la fusion/solidification. Ces températures sont accessibles naturellement et sont omniprésentes dans la vie quotidienne (température d'ambiance d'une maison, température d'un corps humain, de l'eau chaude sanitaire, etc. Ils doivent être chimiquement stables, de faible coût, non toxique et non corrosif. Les matériaux qui ont été étudiés au cours des 40 dernières années sont des sels hydratés, des cires de paraffine, les acides gras et les eutectiques de composés organiques et non organiques. [52]

### **III.4.2 Types des matériaux à changement de phase (MCP)**

Il existe de nombreux types de matériaux à changement de phase, de nature physico-chimique très différente les uns des autres. Ce sont leurs caractéristiques de fusion-cristallisation qui les

Rendent intéressants pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces matériaux, on distingue les trois grandes familles suivantes :

- les composés minéraux (ou inorganiques) : Parmi ces composés, seuls les sels hydratés présentent un intérêt pour leur utilisation en tant que MCP. Ils sont issus d'un alliage de sels organiques et d'eau. Ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas. En revanche, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion ;
- les composés organiques : Des propriétés thermiques (chaleur latente et conductivité thermique en particulier) moindres que les sels hydratés, ceux-ci présentent l'avantage de n'être pas ou très peu concernés par la surfusion. On utilise en particulier, pour le stockage de chaleur latente, les paraffines et les acides gras qui appartiennent à cette famille ;
- les eutectiques : un eutectique est un mélange de corps purs possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Il peut être inorganique et/ou organique.

#### **a) Les MCP inorganiques**

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une température ou une plage de températures de fusion comprise entre -100 °C et +1000°C. Les plus utilisés sont : l'eau (température de fusion 0°C), les solutions aqueuses de sels (température de fusion inférieure à 0°C), des sels hydratés (température de fusion comprise entre 5°C et 130°C), des mélanges de

sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieur à 150°C). Ils ont plusieurs avantages : ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles.

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

#### **b) Les MCP Organiques**

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

#### **c) Les MCP eutectiques**

Les MCPs eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCPs purs. En général, ce sont des mélanges de MCPs organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique). Ils ont deux principaux avantages ; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leurs chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs.

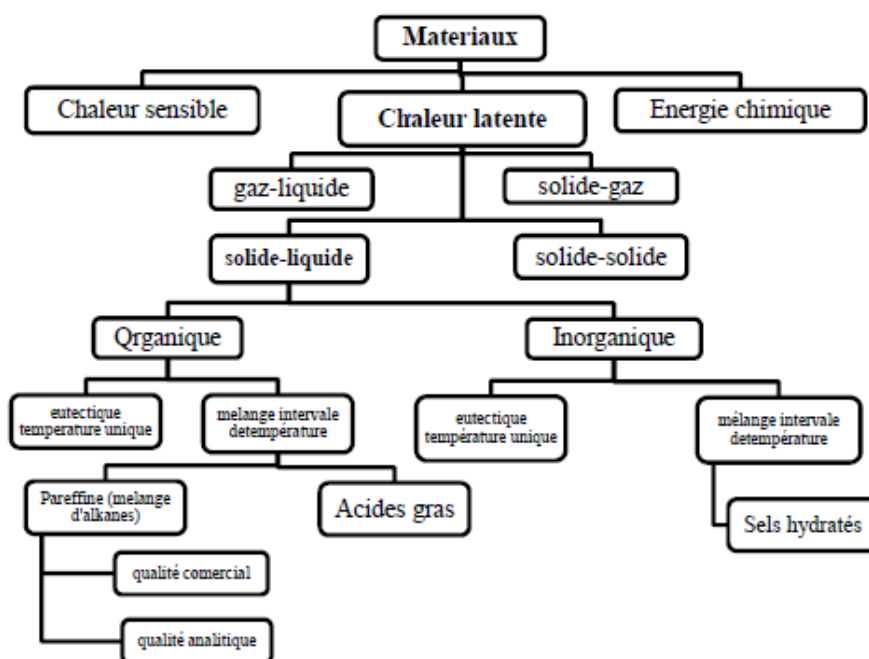
Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.

**Tableau III.1.** Propriétés thermo-physiques de certains MCP. [53]

Matériaux		Température de fusion (C°)	Enthalpie de fusion (Kj/Kg)
PCMs Organiques	Eau	0	333,6
	Stéarate de butyle	19	140
	L'acide caprique_laurique	21	143
PCMs Inorganiques	KF.4H <sub>2</sub> O	18,5	231
	Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25,8	125,9
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O	32	251
PCMs Eutectiques	66,6%CaCL <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O+33,3%Mgcl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	25	127
	48%CaCL <sub>2</sub> +4,3%NaCL+47,3%H <sub>2</sub> O	26,8	188
	47%Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O+53%Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	30	136

**III.4.3 Classification des matériaux à changement de phase(MCP)**

Il y a un grand nombre de substances chimiques qui peuvent être identifiées comme MCP d'un 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 thermiques idéal.



**Fig.III.5 :** classification des MCP.

Aussi ces matériaux sont employés tout en recherchant les voies et moyens qui permettent d'éviter ou de compenser les inconvénients qu'ils présentent par des techniques appropriés adaptées à chaque application. Par exemple, des ailettes métalliques ont été employées pour augmenter la conductivité thermique des MCP, la surfusion peut être évitée par addition d'un agent de nucléation dans le matériel de stockage, et la fusion non congruente est empêchée en ajoutant dans le MCP un agent épaississant ou un gélifiant approprié. On peut classer les MCP couramment utilisés selon deux catégories :

- Les composés organiques: paraffines, corps non-paraffiniques, polyalcools.
- Les composés inorganiques: hydrates salins, sels, métaux, alliages.

**a) 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 (Procédé Fischer-Tropsch).

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 caractérisés 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 et sont modérément inflammables.

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

Il existe quelques méthodes développées pour augmenter la conductivité thermique. Une de ces méthodes est l'utilisation de graphite expansé (Sari, 2004 [54] ; Marin et al. 2005 [55] ;

Zhang et Fang, 2006) [56]. Mehling et coll. (2000) [57] 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 avec leur point de fusion et leur chaleur latente de fusion.

➤ **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 3 cm d'épaisseur de paraffine est l'équivalent thermique d'une paroi en béton de 40 cm.
- La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850 kg/m<sup>3</sup>, et celle de la phase solide est de 800 à 900 kg/m<sup>3</sup>. La dilatation volumique est donc environ 15 % pendant le processus de changement de phase. On peut éviter ou au moins réduire ce problème par un conditionnement adapté.

- Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix 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.

#### ➤ Les composés organiques non-paraffiniques

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

Les matières organiques non-paraffiniques sont divisées en deux groupes : les acides gras et les autres matières organiques (Öztürk, 1997) [58].

La formule chimique générale des acides gras est  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$  et ils ont relativement une haute enthalpie de changement de phase. Les acides gras ont une haute stabilité thermique et ne subissent pas le phénomène de sous-refroidissement. Cependant, selon (Abhat, 1983) . Ils sont plus chers que les paraffines et sont corrosifs.

Certaines des caractéristiques de ces matériaux organiques sont les suivantes :

- forte chaleur de fusion.
- inflammabilité.
- faible conductivité thermique.
- faible point d'éclair.

- niveau variable de toxicité.
- instabilité à haute température.

#### b) les sels hydratés

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

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

En dépit de ces propriétés les hydrates de sels ont certains inconvénients importants tels que la fusion accompagnée de la séparation de phase, du sous-refroidissement et d'être corrosifs. Les méthodes élaborées pour empêcher la séparation de phase dans l'utilisation des hydrates de sels comme PCM sont l'épaississement et la gélification. Dans la première méthode, un agent épaississant est ajouté pour augmenter la viscosité de l'hydrate de sel et dans le second, l'hydrate de sel est stabilisé dans les pores d'un gel polymère. (Lane, 1983). [57]

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

Les problèmes principaux concernant la plupart des hydrates salins sont selon Jotshietal. [59]

- La surfusion (ou sous –refroidissement) :

On traite ce problème en ajoutant un agent de nucléation.

- La ségrégation de phase :

Lorsque la fusion n'est pas congruente, on observe une ségrégation de phase. Pour prévenir ce problème plusieurs techniques ont été testées comme l'utilisation d'agents épaississants. Comme agents épaississants on utilise de la cellulose, de la fécule, de la sciure, du gel de silice, de la silice..., etc. Ces types d'agents épaississants fonctionnent bien, mais ils sont finalement soit hydratés par le sel ou décomposés par les bactéries, et ils deviennent inefficaces [60].

- La perte d'eau d'hydratation en répétant le cycle thermique. Ce problème peut être évité en rajoutant une quantité d'eau supplémentaire dans l'hydrate et/ou en utilisant un stockage parfaitement étanche.

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

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

#### **III.4.4 Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage**

##### **1) La surfusion**

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état. Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement.

##### **2) La surchauffe**

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (Réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système.

Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible.

##### **3) La dilatation**

Pendant le changement de phase de solide à liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression.

**III.4.5 Le choix d'un MCP**

Des critères vont donc être définis pour faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée [61]:

**III.4.5.1 Considérations thermiques**

Le niveau de la température de changement de phase qui dépend de l'application.  
La valeur de la chaleur latente de fusion ( $>130$  kJ / kg pour être compétitif).  
Une grande conductivité thermique pour des cinétiques de charge et de décharge rapides.  
Une faible pression de vapeur pour minimiser les problèmes de tenue en pression des systèmes de stockage.

**III.4.5.2 Propriétés physiques**

Un faible changement de volume lors du changement d'état pour le dimensionnement du stockage et sa tenue à la pression.  
Une grande masse volumique pour que le MCP puisse réaliser un stockage suffisant dans le volume le plus faible possible.  
Une fusion congruente lors de l'utilisation d'un corps composé.

**III.4.5.3 Considérations cinétiques**

Des cinétiques de charge et de décharge rapides.  
Pas de surfusion qui détruit la cinétique et altère la possibilité de déstockage.

**III.4.5.4 Considérations de stabilité et de compatibilité avec les autres matériaux**

Stabilité du corps lors des cycles thermiques.  
Compatibilité avec les matériaux du réservoir de stockage pour chaque phase pour éviter tous les problèmes de corrosion, de réactivité chimique ou électrochimique.

**III.4.5.5 Considérations chimiques**

Stabilité chimique des corps avec le temps et avec les niveaux de température.  
Un bon taux de cristallisation et ininflammabilité et non-toxicité.

**III.4.5.6 Considérations économiques**

Un coût raisonnable et une bonne disponibilité.

### III.4.6 Applications des MCP

#### 1) Le transport de produits alimentaires

Les MCP sont utilisés dans l'industrie agroalimentaire, pharmaceutique et médicale pour limiter au maximum les variations de température que subissent les aliments, les médicaments ou les composants sensibles par exemple le cas du transport du sang. Ils se présentent principalement sous la forme de « petits sacs » plastiques contenant le matériau choisi disposé au plus près du produit à conserver. [44]

#### 2) Climatisation passive

L'utilisation de tels matériaux présente un double intérêt :

- du fait de leur grande compacité, les MCP permettent au bâtiment d'acquérir une grande inertie thermique et donc d'être moins sensible aux variations quotidiennes de température. Selon les études, il serait possible de réduire de 7 à 8 °C maximum les pics de température dans un bâtiment en utilisant de tels isolants ;
- le phénomène de changement de phase permet, quant à lui, d'absorber une partie de la chaleur de la pièce dès que la température ambiante dépasse la température de fusion du matériau. Cet écart de température entre le matériau et la pièce (réserve énergétique) va être réduit et la température de la pièce va tendre vers celle du matériau : dans la mesure où l'échange énergétique qui a lieu entre les deux systèmes se fait de manière quasi isotherme pour le MCP, c'est l'environnement qui va voir baisser sa température afin de permettre la fusion du MCP.

#### 3) Intégration aux textiles

Les matériaux utilisés pour ce genre d'applications sont généralement des paraffines, un matériau organique à chaîne carbonée linéaire. Ces différents composés possèdent tous des températures de changement de phase différentes mais, une fois mélangés et encapsulés, ils se maintiennent à une température moyenne de 30 à 34 °C, ce qui devient très confortable pour le corps humain.

L'utilisation de ces textiles peut se faire dans des domaines tels que :

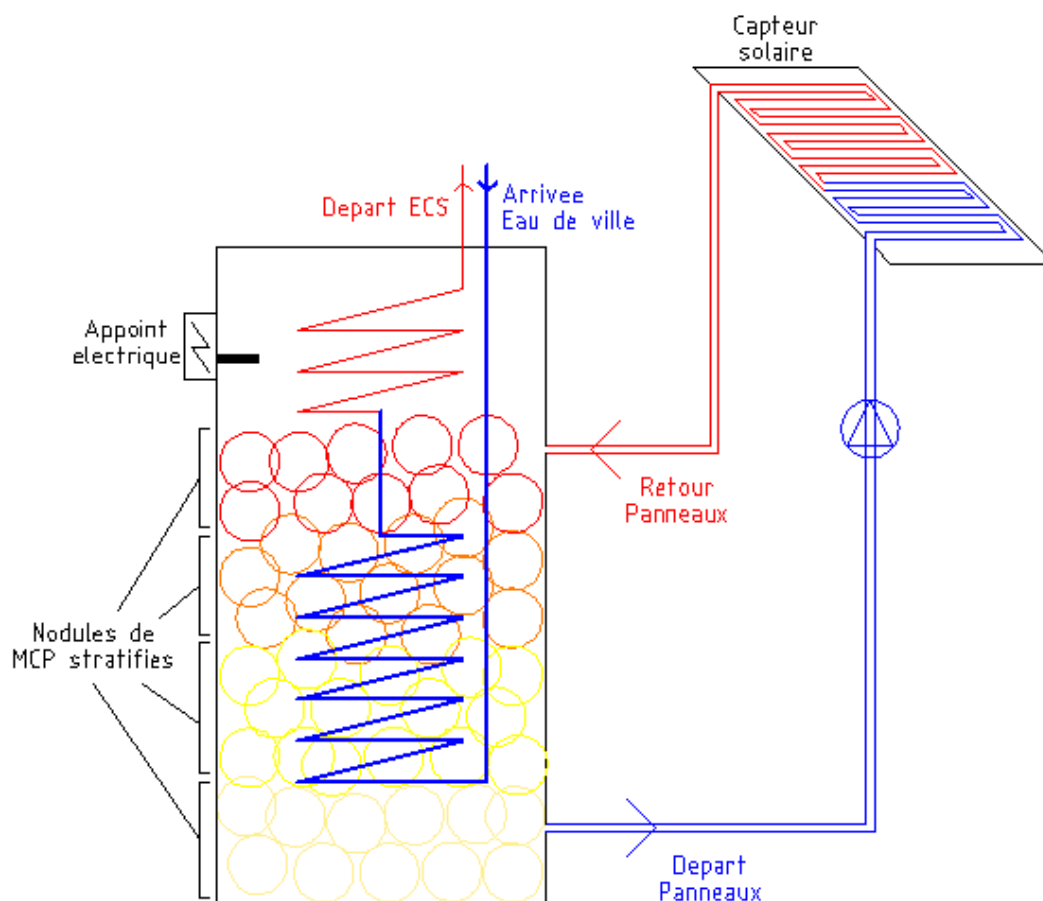
- l'industrie automobile, dans laquelle le problème de la climatisation reste majeur.
- les vêtements techniques : ceux-ci ne permettent généralement pas d'atteindre un équilibre entre la chaleur produite par le corps et celle transmise à l'environnement lors de la pratique d'un sport.

- l'aérospatial : certains produits aujourd'hui dans le commerce ont été à l'origine développés pour la création de combinaisons d'astronautes. Ils avaient pour but de les protéger des variations extrêmes de température présentes à l'extérieur des navettes lors des sorties.

#### 4) Le stockage de l'énergie thermique

Le principal problème lié à l'utilisation de l'énergie solaire thermique concerne son stockage : la production d'eau chaude sanitaire via la circulation d'eau au-travers de panneaux solaires est directement dépendante de l'ensoleillement. Cet apport énergétique à lieu que l'on en ait besoin (bénéfique) ou non (perte énergétique par surabondance). L'utilisation de MCP pour le stockage de cette énergie par chaleur latente permettrait de résoudre en partie ce problème :

- d'une part, la quantité d'énergie stockée dans un ballon de même volume sera plus grande avec un MCP qu'avec de l'eau seule (cf. paragraphe Compacité ou Densité énergétique) : il sera donc possible d'accumuler une plus grande quantité de chaleur que celle nécessaire à une seule journée d'occupation ;
- par ailleurs, ne pouvant élever indéfiniment la température du volume de stockage (risque de vaporisation du fluide néfaste aux pompes de circulation), il est en revanche possible de stocker cette chaleur sous forme latente sans pour autant élever la température du matériau (en utilisant par exemple un MCP dont la température de fusion se situe aux environs de 60 °C ou 70 °C). Cette chaleur supplémentaire accumulée sera cédée par la suite au réseau d'eau chaude sanitaire



**Fig.III.6 :** Schéma de principe d'un chauffe-eau solaire. [62]

Le principal problème de stockage de l'énergie au sein d'un ballon solaire est l'absence de stratification (l'intégralité du volume d'eau chaude contenue dans le ballon n'est que rarement prélevée en une seule fois) : le volume d'eau à l'intérieur du ballon a tendance à homogénéiser sa température lors de son retour et de son départ vers les panneaux. Une fois une température trop basse atteinte (par exemple  $40\text{ °C}$ ), il n'est plus possible d'utiliser cette eau pour le circuit. Pourtant, il suffit que cette chaleur soit « mieux répartie » pour que l'on puisse encore puiser de l'eau à une température convenable (un ballon de  $100\text{ L}$  à  $40\text{ °C}$  contient la même quantité d'énergie que deux ballons de  $50\text{ L}$  aux températures respectives de  $30\text{ °C}$  et  $50\text{ °C}$ ).

L'utilisation de MCP permet alors la création de « couches stratifiées » dont les températures se situeront aux environs des températures de fusion des différents matériaux utilisés.

### 5) Applications médicales

Dans le secteur médical, une des applications principales est le transport de sang (figure.III.7) et d'organes ou comme récipients pour matériel. Les buts sont semblables à

ceux expliqués avant. D'autres applications médicales peuvent être des coussins et chauds ou froids pour traiter la douleur locale dans le corps.



**Fig.III.7.** Récipients contenant du sang et des organes qui contiennent des MCPs. [63]

### III.5 Conclusion

L'utilisation des matériaux de changement de phase (MCP) pour le stockage d'énergie thermique a été étudiée par beaucoup de chercheurs, donc, beaucoup de produits sont disponibles dans la littérature et dans le marché. Les problèmes techniques trouvés dans le passé dans l'utilisation de tels matériaux à changement de phase ont été étudiés et différentes solutions ont été présentées, donnant à l'utilisateur l'occasion d'être sûr que les systèmes conçus sont réussis.

Néanmoins, la recherche est nécessaire toujours pour trouver de nouveaux matériaux plus efficaces et meilleurs marché, et pour donner de meilleures solutions aux problèmes techniques tels que la surfusion, la ségrégation et la compatibilité de matériaux à changement de phase.



**Chapitre  
IV  
Matériels  
et  
méthodes**

## Introduction

Dans ce chapitre nous décrire les étapes de la réalisation et l'étude expérimentale d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique avec matériaux à changement (MCP) et un bac stockeur. Le capteur est dimensionné de façon à concentrer les rayons solaires vers sa ligne focale où l'absorbeur est placé. Le choix du réflecteur et du composite sont important car ils influent directement sur le rendement de ce dernier pour cela nous prélèveront a plusieurs endroits la température via des thermocouples afin d'évaluer son efficacité.

Le capteur solaire a été réalisé au niveau du département de Génie Mécanique à l'université

Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Caractéristiques du site de Tizi-Ouzou :

**Tableau IV.1.** Caractéristiques du site de Tizi-Ouzou.

Latitude	Longitude	Altitude
36.71°	4.05°	229 m

## IV. Etapes de réalisation :

### IV.1 Fabrication du support en bois

Pour ce faire nous avons commencé par fabriquer un cadre en bois de dimension (1.5m x 1.2m) avec parois et une base en contre plaquer avec support prédéfini de la forme cylindro-parabolique sur 4 longueurs (figure IV.1).



**Fig.IV.1.** support en bois

Pour éviter les pertes thermiques par le dessous du support en bois nous avons isolé thermiquement avec l'incorporation du polystyrène à forte densité (25) et 7 cm d'épaisseur et combler les joints des cotés avec du polyuréthane expansé (figure IV.2).

Des barrettes en bois ont été ajoutées en longueur pour rigidifier le panneau (figure IV.2).



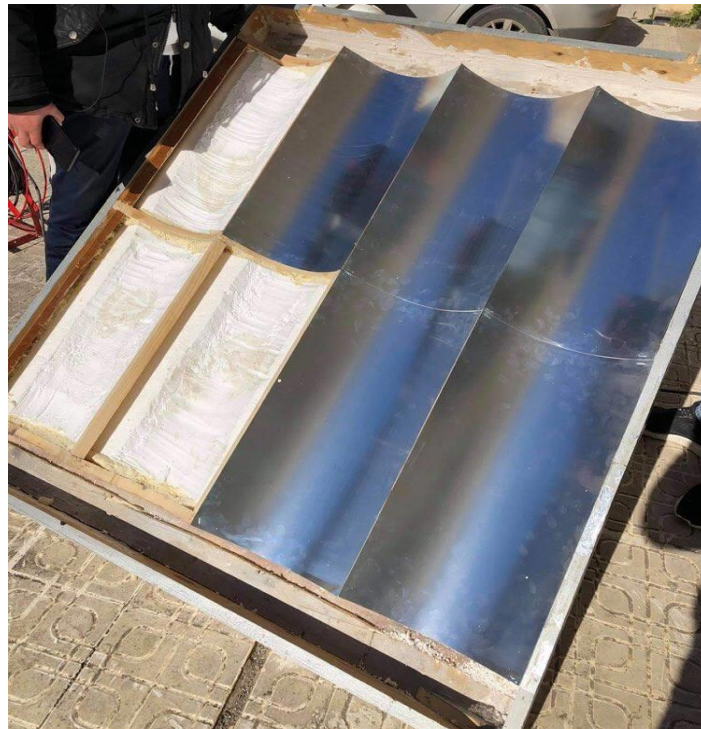
**Fig.IV.2.** Support en bois isolé.

#### **IV.2 Fabrication du réflecteur**

Pour maximiser le rendement du capteur solaire il faut que la réflectivité soit optimale c'est-à-dire efficace et à faible coût. C'est pour cela que nous avons choisi d'utiliser l'aluminium comme réflecteur. Son coefficient de réflexion est de (0.96).

A défaut de fournir des feuilles d'aluminium suffisamment grandes et malléables nous avons posé et agrafé une sous couche de feuilles de fer blanc pour épouser parfaitement la forme

cylindro-parabolique et de servir comme base (figureIV.3), puis recouvrir toute la surface avec du scotch aluminium adhésif (figure IV.4).



**Fig.IV.3.** Pose de la sous-couche type fer blanc.



**Fig.IV.4.** Application du scotch aluminium adhésif sur le fer blanc.

### IV.3 Fabrication de l'absorbeur

Notre capteur est constitué de quatre (4) tubes absorbeurs fabriqué à base de canette de soda de capacité 24cl et de diamètre 53mm et de 130mm de longueur assemblées de bout en bout. Pour notre usage nous avons besoin d'une longueur de 1.25 mètre pour un seul absorbeur, donc il nous faut un assemblage de 10 canettes.

Les canettes doivent d'abord subir une modification de leur forme initiale. Pour les canettes du milieu, on leur a enlevé les couvercles des deux côtés et celles des extrémités ont été juste percées afin de faire passer le serpentín en cuivre pour la circulation du fluide caloporteur (figure IV.5)



Fig.IV.5. Perçage des canettes.



Fig.IV.6. Assemblage des canettes.

Pour coller les canettes entre elles nous les avons d'abord collées avec de la colle rapide type (glue) puis on a rajouté par-dessus une pate a joint +300° pour étanchéifier et protéger la glue des haute températures (figure IV.6).



**Fig.IV.7.** Pate à joint haute température.

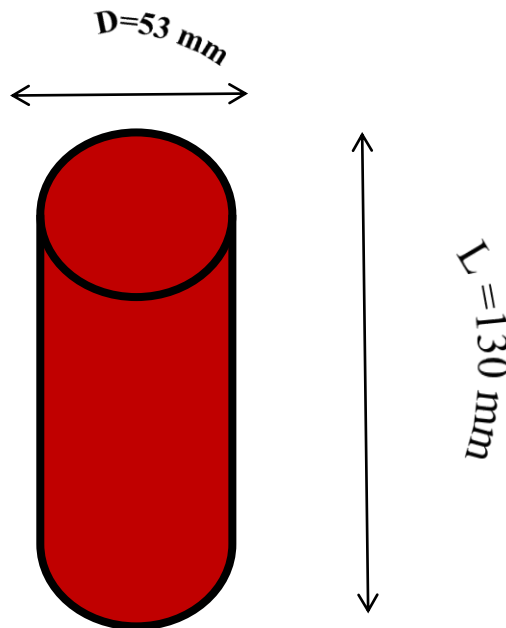
Le fluide caloporteur (dans notre cas l'eau du robinet) va circuler à travers un serpentin de cuivre à l'intérieur même des canettes. Nous avons récupéré 4 tubes en cuivre de diamètre 12mm et de longueur de 1.30 mètres composé d'ailettes en cuivre qui améliorent la conductivité entre le tube en cuivre et la canette.



**Fig.IV.8.** Tube cuivre avec ailettes.

### IV.3.1 Fabrication de composite MCP

La quantité du MCP utiliser dépend du volume de l'absorbant (canettes), pour notre cas :



**Fig.IV.9.** dimensions d'une seule canette.

Le volume d'une canette :  $V_c = \pi \times r^2 \times L$   
 $V_c = 2,866 \times 10^{-4}$

On a utilisé 10 canette donc le volume totale d'un seul absorbant est :  $10 \times V_c$  ça nous donne :  $28,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ . On enlève le volume du tube de cuivre et on néglige le volume des ailettes on trouve que la quantité du volume à remplir est de :

$$V_{\text{tube}} = 1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_u = V_t - V_{\text{tube}} = 28,66 \times 10^{-4} \text{ m}^3 - 1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 27,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Si on prend en considération les 4 absorbants :

$$V_u = 1,08 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

Les matériaux utilisés pour la confection du MCP sont :

L'acide gras végétal (CEVITAL) dont la température de fusion est situé entre 38-40°C.



**Fig.IV.10.** Acide gras.

Et du graphite qu'on a récupéré sous forme de poudre et qu'on tamiser avec un tamis de 0.08 mm pour obtenir une farine de graphite pour améliorer son incorporation au composite.



**Fig.IV.11.** tamisage du graphite.

Pour remplir nos canettes nous avons mélangé 90% d'acide gras avec 10% de graphite en poudre qu'on a fait fondre dans un bain marie.



**Fig.IV.12.** Préparation de l'MCP sur le bain marie.

### III.5.1 Assemblage de l'absorbeur

Une fois que tous les composants de l'absorbeur soient prêts, c'est-à-dire tubes en cuivre, enveloppe de canettes et le composite MPC on assemble le tout en fixant d'abord le tube en cuivre dans les canettes et puis on remplit les canettes de composite en veillant à laisser un espace pour l'expansion volumique du composite.



**Fig.IV.13.** absorbeurs assemblés.

### IV.4 Assemblage du concentrateur

On a disposé les quatre absorbeurs sur le support en bois prédisposé à cet effet et on a ajouté des cales en bois au milieu pour prévenir d'éventuelles fuites dues à la flexion de

l'absorbeur sous l'effet de son poids. On raccorde les tubes en cuivre avec des coudes pour former un serpentín avec une entrée et une sortie du fluide caloporteur.



**Fig.IV.14.** Concentrateur fini sans vitre.



**Fig.IV.15.** Concentrateur fini avec vitre.

#### IV.5 Fabrication du stockeur

Un réservoir de 40 litres en plastique est placé dans une boîte fabriquée à partir de chutes de bois isolé avec des panneaux sandwich pour stocker l'eau chaude récoltée du concentrateur avec un circuit entrée et sortie du fluide caloporteur.



**Fig.IV.16.** Etapes de réalisation du bac stockeur.

#### IV.6 Système de circulation de fluide caloporteur

Dans nos testes la circulation du fluide à l'intérieur du capteur doit être forcée à cause des pertes de charges dues aux coudes du circuit. Pour cela nous avons utilisé une pompe d'un

aquarium qui est immergée dans le bac stockeur qui débite à une hauteur de 1.5 mètre avec un débit de : 10 litres /mn.



**Fig.IV.17.** Pompe immergée.

#### Mesure des températures

Pour la mesure des différentes températures sur le dispositif (concentrateur + stockeur) nous placerons à différents endroits des thermocouples comme suit :

- Un thermocouple à l'entrée du fluide caloporteur dans le concentrateur.
- Un thermocouple la sortie du fluide caloporteur du concentrateur.
- Un thermocouple sur la vitre.
- Un thermocouple à l'intérieur de la canette (MCP).
- Un thermocouple sur la paroi supérieure de l'absorbeur.
- Un thermocouple sur la paroi inférieure de l'absorbeur.
- Un thermocouple pour la température ambiante.

#### IV.6.1 Les Thermocouples

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. Les alliages thermocouple sont généralement disponibles en fils.



**Fig.IV.18.** Thermocouple type K.

Pour collecter les données fournies par les thermocouples, on a utilisé un instrument d'enregistrement de données basé sur PC. «Pico Technology Enregistreur de données, Température ».



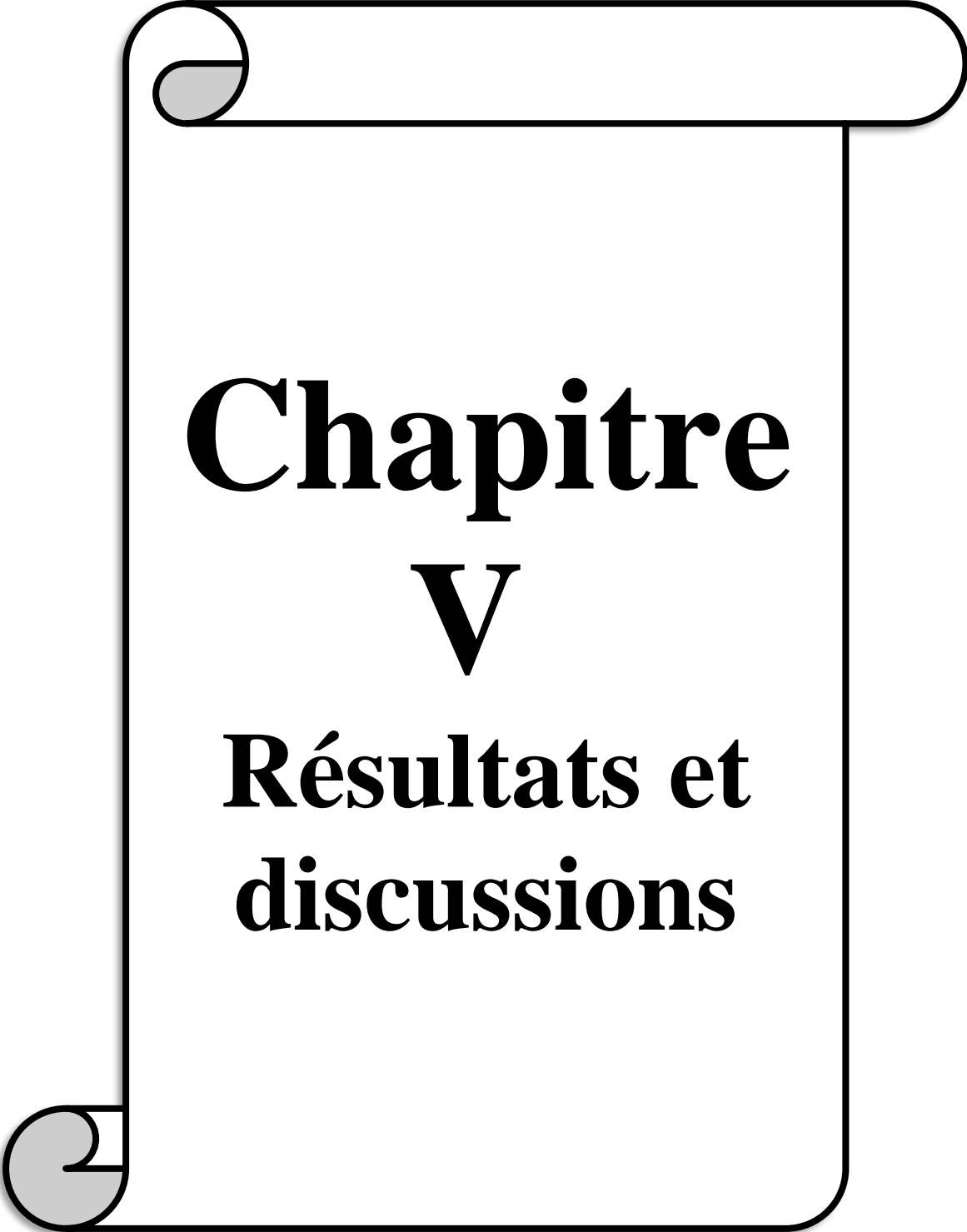
**Fig.IV.19.** Pico log USB.



**Fig.IV.20.**Emplacement des thermocouples

#### **IV.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a détaillé les différentes étapes de la conception, la fabrication et l'assemblage des éléments qui composent le capteur cylindro-parabolique et le stockeur, ainsi la méthode et l'outil nécessaire pour prélever les températures nécessaires à l'étude.



# **Chapitre**

## **V**

### **Résultats et discussions**

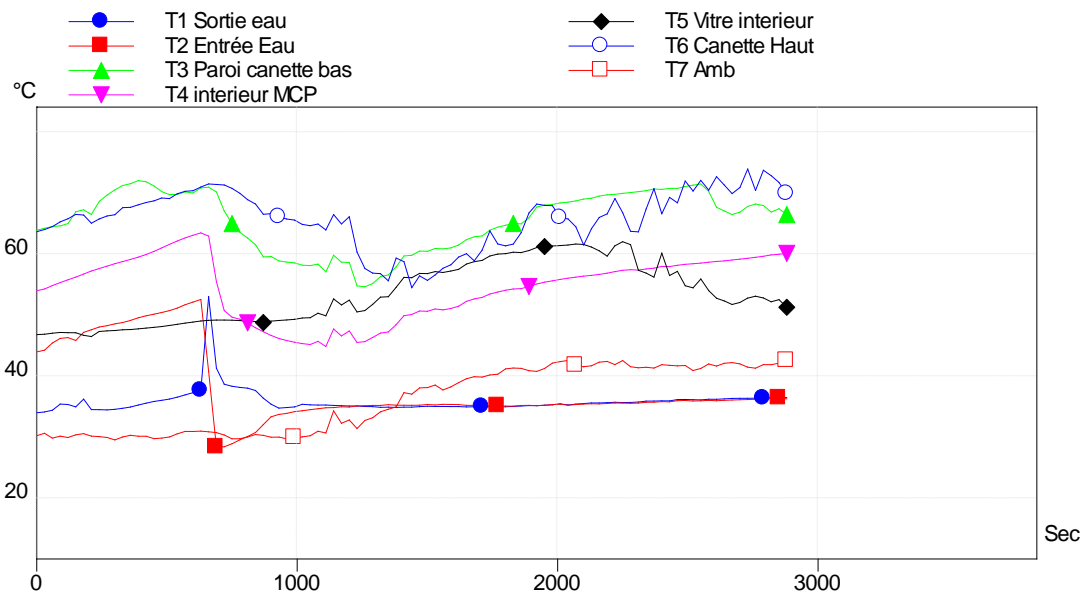
**Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats qui sont relatifs aux caractéristiques du capteur cylindro parabolique. Nous avons donc réalisé nos tests sur deux jours au niveau de l’université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et nous avons recueilli plusieurs valeurs via le logiciel Pico-Log.

**V. Testes et résultats**

**V.1 Test (1)**

Le test s’est déroulé la journée du 07 juin 2021 avec un ciel dégagé à 14h30 de l’après-midi. La courbe affichée pour les 7 températures recueillis sont :



**Fig.V.1** Courbes des températures du test 1.

Afin de mieux décrire les résultats recueillis pour le premier test on subdivise les résultats en deux tableaux selon l’axe du temps (0s-1500s) et (1500s-3000s).

**Tableau.V.1.**Températures relevées entre 0 et 1500 secondes lors du premier test.

Temps Secondes	T1 Sortie eau °C	T2 Entrée Eau °C	T3 Paroi canette bas °C	T4 intérieur MCP °C	T5 Vitre intérieur °C	T6 Canette Haut °C	T7 Ambiante °C
0	34.06	44.05	63.98	54.06	46.88	63.74	30.32
120	35.42	46.39	65.08	55.86	47.2	65.87	30.02
210	34.59	47.67	66.57	57.31	46.57	65.14	30.25
300	34.63	48.65	70.6	58.51	47.55	66.53	29.63

390	35.34	49.64	72.12	59.58	47.83	68.16	30.22
480	36.11	50.5	70.32	61.09	48.2	69.26	29.91
570	37	51.78	70.26	62.74	48.77	70.37	31.02
660	53.11	40.85	71.04	63.03	49.22	71.58	30.95
750	38.41	29	65.07	49.74	49.24	70.84	29.8
840	37.72	30.83	61.63	48.01	49.01	68.29	30.5
930	34.83	33.8	58.96	46.25	49.19	66.15	30.09
1020	35.46	34.4	58.26	45.4	49.6	64.95	30.12
1110	35.33	34.89	57.15	44.94	49.98	64.02	30.76
1200	35.19	35.01	58.71	47.48	52.52	66.19	32.89
1290	35.07	35.27	55.24	46.41	51.84	56.97	33.25
1320	34.96	35.27	56.4	47.13	53.02	56.87	34.24
1350	35	35.39	56.65	47.32	53.09	55.69	34.65
1380	34.94	35.32	57.98	48.52	54.63	59.43	35.04
1410	34.99	35.3	59.77	49.98	56.26	58.83	37.37
1440	35	35.29	59.88	50.18	56.21	54.57	37.12
1470	35.07	35.32	60.57	50.74	56.91	56.52	38.14
1500	35.14	35.43	60.53	50.7	56.87	55.77	38.2

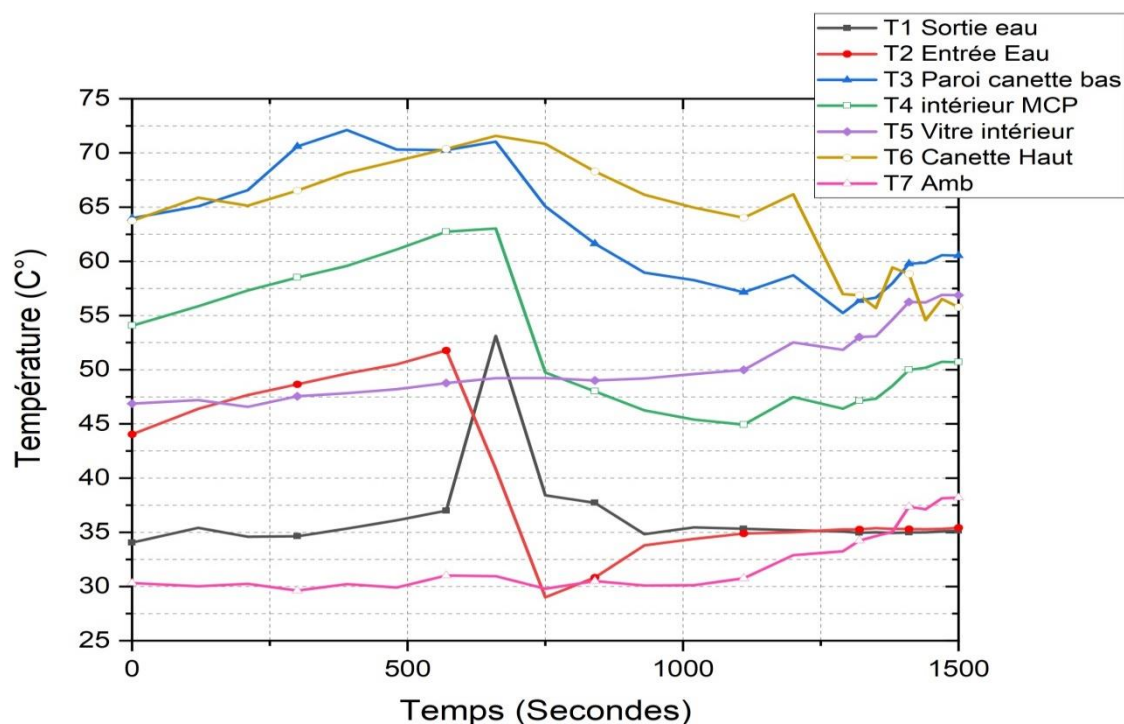


Fig.V.2 Courbes des températures du test 1 entre 0 et 1500 secondes

Cette courbe a été réalisée via le logiciel de traçage de courbe Origin.

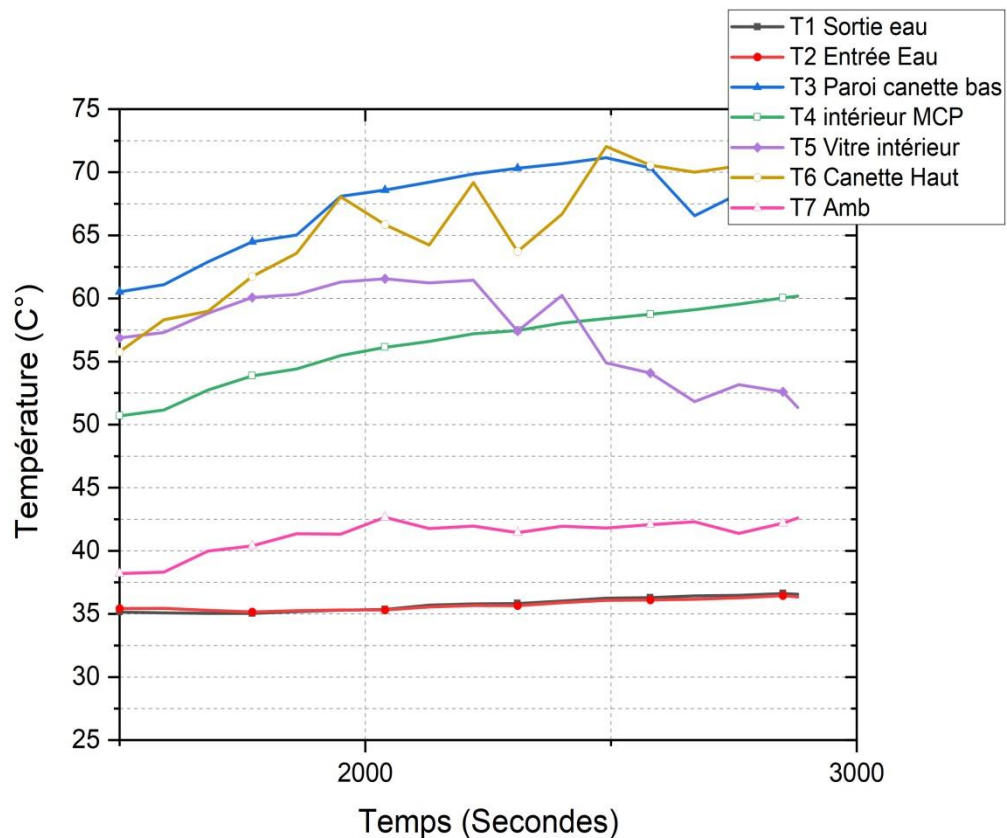
**Origin** est un **logiciel** de traitement et d'analyse de données scientifiques pour environnement Microsoft Windows développé par OriginLab. Il permet notamment de tracer des graphes 2D et 3D et possède des fonctions d'analyse de pics.

**Discussion 1**

La courbe de la figure V.2 qui représente la première partie obtenue lors du test N°1, c'est-à-dire entre l'instant 0 et 1500s. Au démarrage des tests, le dispositif est lancé sans circulation d'eau entre 0 et 600s, on note l'augmentation de toutes les températures du dispositif. A l'instant t=600s, on allume la pompe en créant une circulation du fluide caloporteur, une diminution de la température est constatée, expliquée par : la chaleur cumulée dans le concentrateur est cédée à l'eau froide qui arrive du stockeur. Le pic constaté de la température (sortie de l'eau) s'explique par la sortie brute de l'eau déjà présente dans le serpentin qui a emmagasiné de la chaleur. Après un certain temps, toutes les températures finissent par remonter, expliqué par le rayonnement reçu.

**Tableau.V.2.**Températures relevées entre 1500 et 3000 secondes lors du premier test.

Temps Secondes	T1 Sortie eau °C	T2 Entrée Eau °C	T3 Paroi canette bas °C	T4 intérieur MCP °C	T5 Vitre intérieur °C	T6 Canette Haut °C	T7 Ambiante °C
1500	35.14	35.43	60.53	50.7	56.87	55.77	38.2
1590	35.09	35.44	61.09	51.16	57.3	58.31	38.31
1680	35.05	35.29	62.91	52.74	58.83	58.98	39.98
1770	35.04	35.16	64.49	53.86	60.07	61.74	40.39
1860	35.18	35.26	65.03	54.41	60.32	63.58	41.36
1950	35.3	35.31	68.09	55.47	61.3	68.06	41.33
2040	35.35	35.31	68.59	56.13	61.56	65.85	42.65
2130	35.69	35.55	69.22	56.59	61.23	64.24	41.77
2220	35.79	35.67	69.87	57.2	61.44	69.18	41.97
2310	35.82	35.66	70.32	57.45	57.42	63.72	41.44
2400	36.02	35.89	70.68	58.05	60.24	66.68	41.95
2490	36.25	36.08	71.15	58.4	54.89	72.05	41.81
2580	36.29	36.11	70.34	58.75	54.09	70.56	42.07
2670	36.43	36.16	66.55	59.11	51.82	70	42.3
2760	36.47	36.28	68.29	59.55	53.17	70.5	41.38
2850	36.61	36.44	67.51	60.05	52.61	71.81	42.19
2880	36.56	36.35	66.55	60.19	51.36	69.95	42.6



**Fig.V.3** Courbes des températures du test 1 entre 1500 et 3000 secondes.

Cette courbe a été réalisée via le logiciel de traçage de courbe Origine.

### Discussion 2

La courbe de la figure V.3 représente la deuxième partie du test 1, c'est-à-dire entre l'instant  $t=1500s$  et  $t=3000s$ . On note :

- Augmentation des températures de l'absorbeur (coté bas, coté haut et foyer) du a la présence du rayonnement direct, diffus et de l'effet de serre.
- La température de la vitre est influencée par les vents qui la balaient.
- Température de sortie de l'eau légèrement supérieure à celle d'entrée (gain de chaleur).

### V.2 Test (2)

Le test s'est déroulé la journée du 08 juin 2021 avec un ciel partiellement couvert à 13h. Les courbes affichées pour les 7 températures recueillies :

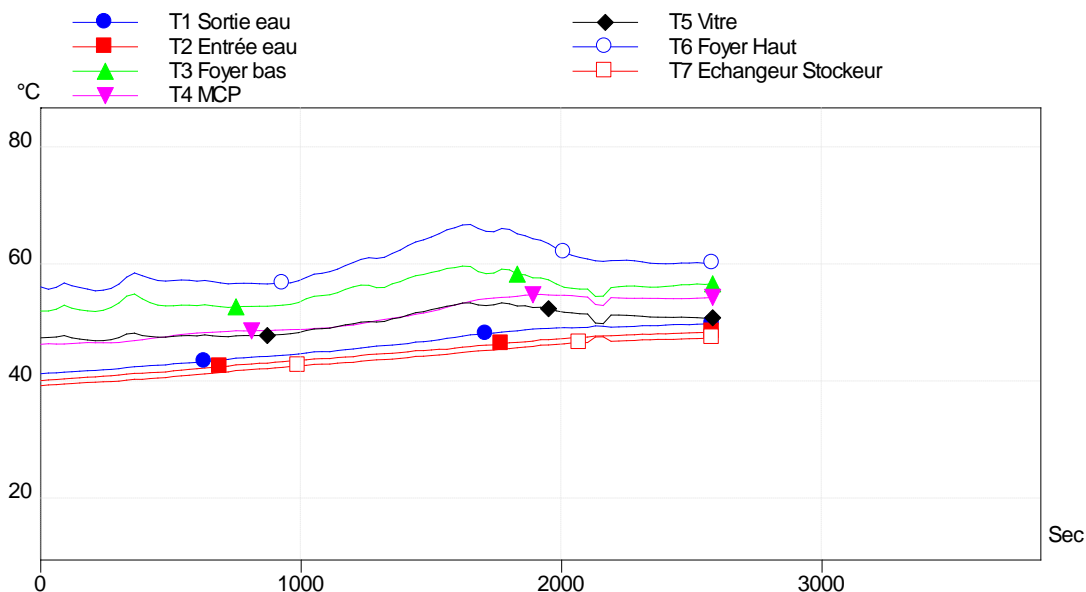
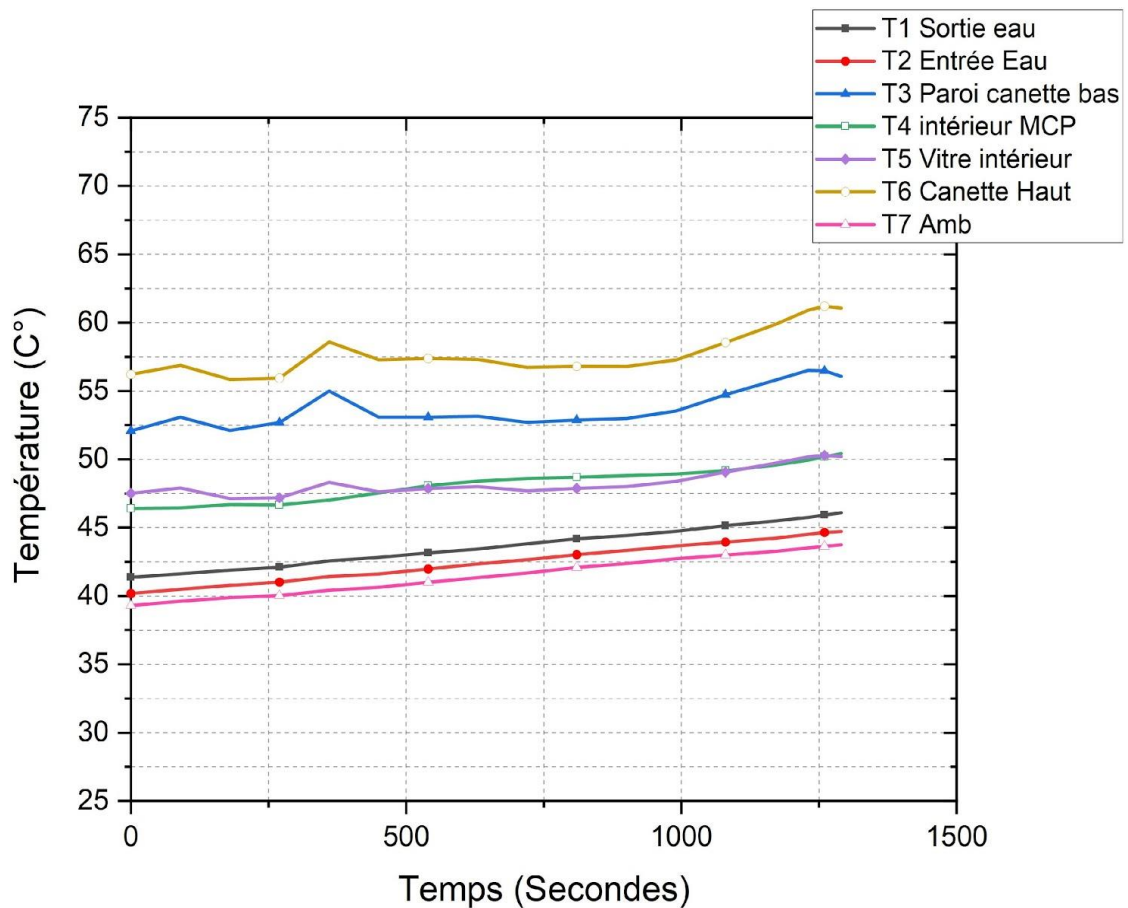


Fig.V.4 Courbes des températures du test 2.

Comme pour le test 1, pour mieux analyser les courbes, on subdivise le graphe fig.V.4 en deux.

**Tableau.V.3.**Températures relevées entre 0 et 1290 secondes lors du deuxième test.

Heure Secondes	T1 Sortie eau °C	T2 Entrée eau °C	T3 Foyer bas °C	T4 MCP °C	T5 Vitre °C	T6 Foyer Haut °C	T7 Echangeur Stockeur °C
0	41.37	40.18	52.08	46.41	47.51	56.21	39.31
90	41.63	40.49	53.08	46.45	47.9	56.87	39.62
180	41.89	40.78	52.11	46.69	47.13	55.84	39.88
270	42.1	41.02	52.69	46.66	47.19	55.94	40.03
360	42.57	41.43	54.99	47.02	48.31	58.59	40.42
450	42.82	41.61	53.09	47.54	47.62	57.29	40.63
540	43.15	41.98	53.09	48.08	47.86	57.38	41
630	43.44	42.35	53.16	48.4	48.01	57.31	41.34
720	43.82	42.66	52.7	48.6	47.69	56.72	41.68
810	44.19	43.02	52.87	48.69	47.88	56.81	42.09
900	44.43	43.33	52.99	48.81	48.01	56.79	42.38
990	44.74	43.66	53.54	48.93	48.39	57.27	42.73
1080	45.15	43.95	54.73	49.16	49.07	58.54	43
1170	45.48	44.23	55.79	49.57	49.72	59.86	43.27
1230	45.76	44.51	56.51	49.94	50.18	60.91	43.52
1260	45.93	44.65	56.48	50.18	50.28	61.2	43.64
1290	46.09	44.72	56.07	50.43	50.21	61.07	43.74



**Fig.V.5** Courbes des températures du test 1 entre 0 et 1290 secondes.

Cette courbe a été réalisée via le logiciel de traçage de courbe Origine.

### Discussion 3

Dans le deuxième jour d'essai les conditions météorologiques étaient moyennes (- ciel partiellement couvert). Le dispositif a été entreposé quelques instants au soleil avant le début de l'expérience c'est pourquoi nous avons démarré avec des températures relativement élevées. Le dispositif a été lancé avec circulation d'eau avec un débit de 10 l/min.

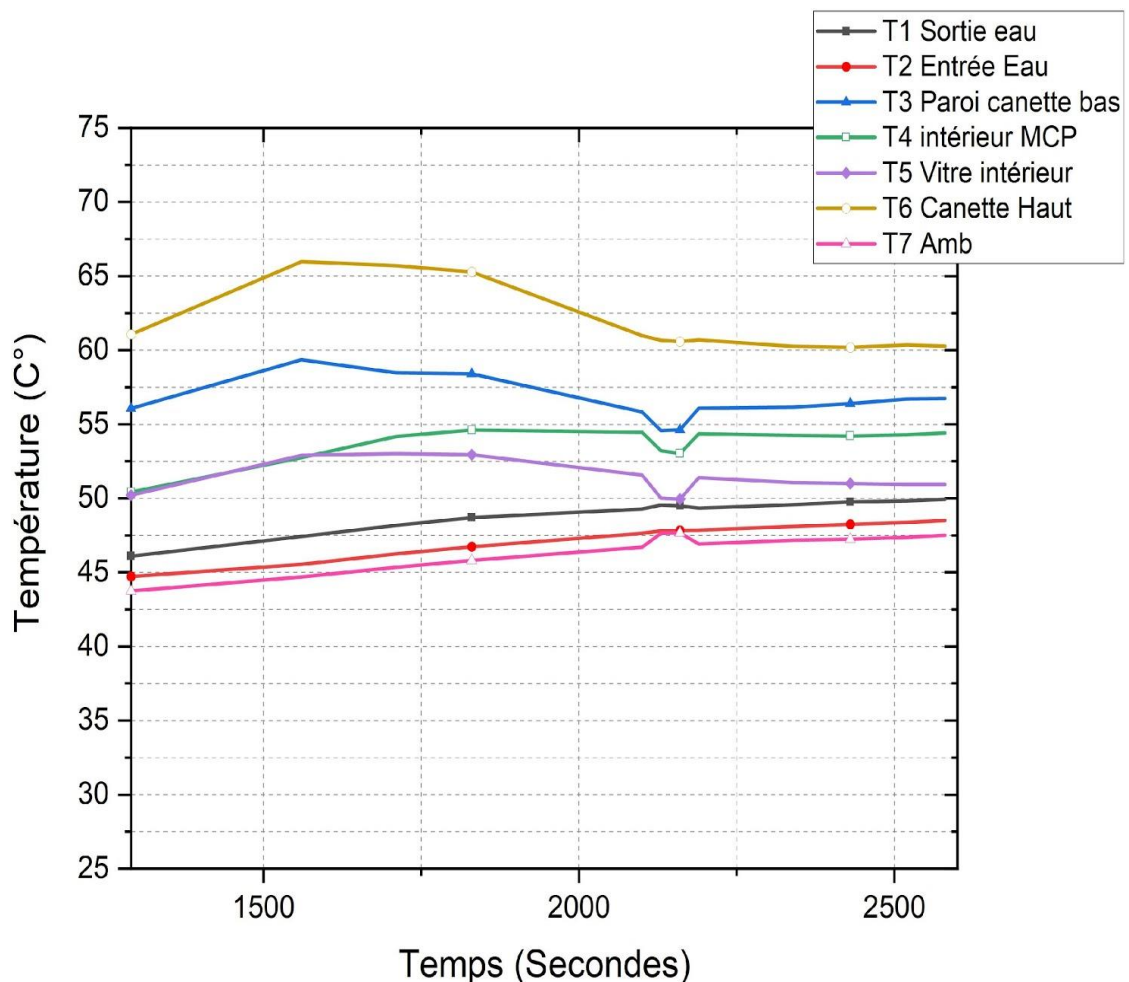
De l'instant  $t=0$  à  $t= 1200s$  :

Une augmentation de température de l'absorbeur dû à la réception du rayonnement diffus direct et réfléchis.

Compte à la température du fluide caloporteur elle augmente car elle est en phase de stockage.

**Tableau.V.4.**Températures relevées entre 1290 et 2580 secondes lors du deuxième test.

Heure Secondes	T1 Sortie eau °C	T2 Entrée eau °C	T3 Foyer bas °C	T4 MCP °C	T5 Vitre °C	T6 Foyer Haut °C	T7 Echangeur Stockeur °C
1290	46.09	44.72	56.07	50.43	50.21	61.07	43.74
1560	47.42	45.55	59.35	52.74	52.9	65.97	44.69
1710	48.17	46.25	58.48	54.18	53.02	65.7	45.35
1830	48.7	46.73	58.4	54.61	52.94	65.28	45.81
2100	49.28	47.64	55.83	54.46	51.57	60.98	46.7
2130	49.55	47.81	54.57	53.21	50.02	60.67	47.64
2160	49.49	47.83	54.62	53.03	49.94	60.58	47.67
2190	49.33	47.85	56.08	54.36	51.4	60.7	46.91
2340	49.57	48.1	56.15	54.25	51.06	60.26	47.17
2430	49.76	48.25	56.39	54.2	51	60.18	47.24
2520	49.83	48.38	56.7	54.28	50.94	60.36	47.37
2580	49.94	48.52	56.74	54.41	50.93	60.27	47.51



**Fig.V.6.**Courbes des températures du deuxième test entre 1290 et 2580 secondes.

Cette courbe a été réalisée via le logiciel de traçage de courbe Origine.

#### Discussion 4

Entre 1290 et 2190s : Une augmentation des températures du a un fort éclaircissement solaire

La température de la vitre intérieure et du foyer (coté haut et bas) diminuent après le passage d'un nuage.

Tandis que la température de l'MCP reste constante.

La température de sorti de l'eau augmente malgré l'absence du rayonnement solaire cela est dû au déstockage de l'MCP.

### V.3 Rayonnement reçu par la surface étudiée

- **Surface des réflecteurs**

$$S_{\text{cylin-parab}} = 2 \times \left[ \frac{D}{2} \sqrt{\left[ \frac{4P}{D} \right] + 1} + 2 \ln \left[ \frac{4P}{D} + \sqrt{\left[ \frac{4P}{D} \right]^2 + 1} \right] \right] \times 1200$$

$$S_{\text{cylin-parab}} = 2 \times 0.1707478011 \times 1200$$

$$S_{\text{cylin-parab}} = 409.79 \text{mm}^2 = 0.40979 \text{m}^2$$

**P** : la profondeur de l'arc = 8.5cm

**D** : le diamètre de l'arc = 29.5cm

$$S_{\text{T cylin-parab}} = S_{\text{cylin-parab}} \times 4$$

$$S_{\text{T cylin-parab}} = 409.79 \times 4$$

$$S_{\text{T cylin-parab}} = 1639.16 \text{mm}^2 = 1.639 \text{m}^2$$

- **La surface des cannettes**

La surface d'une cannette (cylindrique) s'écrit :

$$S = 2\pi rL$$

Avec

r : le rayon de la cannette qui est égale  $2.6 \times 10^{-2}$ m.

L : la longueur de la cannette qui est égale  $13.2 \times 10^{-2}$  m.

$$S_c = 2 \times 3.14 \times 2.6 \times 10^{-2} \times 13.2 \times 10^{-2}$$

$$S_c = 2.1552 \times 10^{-2} \text{m}^2$$

On conclue que la surface d'échange total des cannettes s'écrit :

$$S_{Tc} = 2.1552 \times 10^{-2} \times 40$$

$$S_{Tc} = S_c \times \text{le nombre des cannettes}$$

$$S_{Tc} = 0.862 \text{m}^2$$

#### V.4 Calcul des rayonnements:

Rayonnement global est prélevé directement d'un logiciel selon le lieu d'étude.

**Tableau V.5 :** Rayonnement global sur un plan fixe pour la journée du 08/06/2020 à TIZI-OUZOU.

année	mois	jour	heure	Rayonnement global (W/m <sup>2</sup> )
2020	6	8	12	872
2020	6	8	13	910
2020	6	8	14	890
2020	6	8	15	809

Ces valeurs représentent le rayonnement global reçu à TIZI-OUZOU durant la journée du 8 juin 2020 de 12h à 15 h.

Sachant que l'expérience s'est déroulé entre 13h00 et 14h donc nous ne prendrons que les valeurs qui sont dans l'intervalle de ce temps.

$$Ray_{soleil} = \Sigma(\text{intencités moyennes} \times 3600)$$

$$Ray_{soleil} = (910+890) \times 3600$$

$$Ray_{soleil} = 6480 \text{ kJ/m}^2$$

##### V.4.1 Rayonnement envoyé par les réflecteurs sur les cannettes

$$Ray_{ref-soleil} = \frac{E_{Ray-soleil} \times S_{ref}}{1 \text{m}^2} \times \text{Cof}_{reflexion}$$

$$Ray_{ref-soleil} = \frac{6480 \times 1.639}{1} \times 0.96$$

$$Ray_{ref-soleil} = 10196 \text{ kJ}$$

##### V.4.2 Le rayonnement issu du réflecteur

$$Ray_{can-ref} = \frac{S_{cannettes}}{2} \times Ray_{réf}$$

$$Ray_{can-ref} = \frac{0.862}{2} \times 10196$$

$$\mathbf{Ray_{can-ref} = 4395 \text{ kJ}}$$

#### V.4.3 Le rayonnement issu du soleil et reçu par les cannettes

$$\mathbf{Ray_{can-soleil} = \frac{S_{cannettes}}{2} \times Ray_{soleil}}$$

$$Ray_{can-soleil} = \frac{0.862}{2} \times 6480$$

$$\mathbf{Ray_{can-soleil} = 2793 \text{ kJ}}$$

#### V.4.4 Le rayonnement total reçu par la surface étudié

$$\mathbf{Ray_{total} = Ray_{can-soleil} + Ray_{can-ref}}$$

$$Ray_{total} = 4395 + 2793$$

$$\mathbf{Ray_{total} = 7189 \text{ kJ}}$$

#### V.5 La quantité d'énergie reçue par l'eau

$$E_{eau} = mC_p \Delta T$$

$$E_{eau} = mC_p(T_f - T_i)$$

$$E_{eau} = 20 \times 4180 \times (49.49 - 40)$$

$$\mathbf{E_{eau} = 793 \text{ kJ}}$$

Avec

$C_p$ : La capacité calorifique de l'eau.

$T_f$ : La température finale.

$T_i$ : La température initial.

L'efficacité de l'échangeur

$$\eta = \frac{E_{eau}}{A_0 \times Ray_{total} \times \gamma}$$

$$\eta = \frac{793}{0.49 \times 7189 \times 0.8}$$

$$\eta = 0.281$$

$$\eta = 28.1 \%$$

## V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appris suite aux résultats recueillis, que le capteur solaire thermique cylindro-parabolique est sensible aux conditions météorologiques et aux variations de débit, ce qui influe directement sur son efficacité.

## Conclusion générale

---

L'utilisation des énergies renouvelables et la protection de l'environnement est culture mondiale. L'exploitation des matériaux abandonnés ou recyclés est une nécessité économique et environnementale. Il existe de nombreuses méthodes qui doivent être prises pour l'exploitation de l'énergie solaire par des projets basés sur les concentrateurs solaires facile à réaliser.

Nous avons réalisé un travail composé de cinq parties :

- Une partie pour les généralités.
- Une étude théorique sur l'énergie solaire et les capteurs solaires
- Une partie parlant sur les matériaux a changement de phases.
- Une partie expérimentale contenant la réalisation d'un capteur solaire cylindro-parabolique
- Une partie discutant tout résultat obtenu.

Notre objectif été de non seulement capter l'énergie solaire à usage domestique mais aussi la capacité à la stocker par le biais des matériaux a changement de phases. On peut développer des simples concentrateurs pour arriver à des conceptions efficaces et modernes, au-dessus des maisons ou des bâtiments afin de chauffé l'eau d'usage quotidien avec des matériaux de récupérations peut coûteux et disponibles.

## Références bibliographiques

---

- [1] : **R. Bernard, G Merguy, M.Schwartz**, Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application .Technique et documentation ,deuxième édition, **1980**.
- [2] : Document PDF de Ives JANNOT sur la thermique solaire, publié en mars 2017.
- [3] : <http://www.hqe.guidenr.fr>
- [4] : **Mr BAILEK Nadiem**, Etude et modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat. These de doctorat **2017-2018**.
- [5] : <https://www.fondation-lamap.org/fr/>
- [6]: **Duffie, J. A. and Beckman W. A**, Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, **1991**.
- [7] : **J.E. Braun et JC. Mitchell**. Solar geometry for fixed and tracking surface, edition: solar energy laboratory, **1983**.
- [8] : <https://mecaspa.cannes-aero-patrimoine.net>
- [9] : change materials, in proc. 1992 ASES Annual Conf, USA, 1992.
- [10] : (Le pompage photovoltaïque par Jimmy Royer, **Thomas Djako, Eric Schiller, Bocar Sadasy**, IEPF/ université d'Ottawa/ EIER/ CREPA.
- [11] : <https://e-cours.univ-paris1.fr>
- [12] : **Abderraouf Meziani et Mohammed Temim**, Mémoire de fin d'étude, <<étude d'un capteur solaire a eau avec effet de concentrateur de type cylindro-parabolique >>, Université de Biskra, **2005**.
- [13] : <https://www.techno-science.net/definition/3360.html>
- [14] C.K. Jotshi, D.Y. Goswami and J.J. Tomlinson, Solar thermal energy storage in phase
- [15] : [www.chemie.de/lexikon](http://www.chemie.de/lexikon)
- [16] ÖZTÜRK, H.H., 1997. The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish)
- [17] : <http://ilm-perso.univ-lyon1.fr/~asmiguel/teaching/Thermodynamique/thermo11.pdf>
- [18] : **A. Bejan** , A. D. Kraus,Heat Transfer Handbook ,Department of Mechanical Engineering, Duke University, Durham,North Carolina,Publié par John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey,**2003**.
- [19] : <http://archives.univ-biskra.dz> boutalbi\_ayemen.pdf
- [20] : Sofiane BOUAICHAOU, L'électricité d'origine solaire : Les centrales solaires thermodynamiques.
- [21] : Rev. Energ. Ren. : Physique Energétique (1998) 13-18).

## Références bibliographiques

---

- [22] : Jacques BERNARD, Génie Energétique, Energie solaire : calculs et optimisation (ISBN 978-2-7298-6492-7), Ellipses Edition Marketing S.A., 2011
- [23] : Michel Tissot, « Energie solaire thermique et photovoltaïque ».
- [24] : <https://slideplayer.fr/slide/4069127/>
- [25] : (R.BERNARD G.MENGUY M. SCHWARTZ : Rayonnement solaire, conversion thermique et applications 1980, p 17)
- [26] : (International Congress on the Environment and Renewable Energies, 6-8 November, 2006, Mahdia ,Tunisie).
- [27] : [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_018\\_06.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_018_06.pdf)
- [28] : Quoilin Sylvain : Centrales solaires à concentration, Université de Liège
- [29] : <http://fr.solarpedia.net>
- [30] : [https://www.pinterest.fr/Gaelle\\_Face/teknik-energie-centrale-solaire-thermodynamique/](https://www.pinterest.fr/Gaelle_Face/teknik-energie-centrale-solaire-thermodynamique/)
- [31] : <https://docplayer.fr/142460348-Etude-de-la-centrale-hybride-solaire-gaz-a-cycle-combine-de-hassi-r-mel.html>
- [32] : [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/BUS\\_M\\_2013\\_MARTIN\\_DAVID.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/BUS_M_2013_MARTIN_DAVID.pdf)
- [33] : Axel Augéard et al. ‘‘**Concentrateurs solaires et production électrique**’’. Proj J.M. Chasseriau, ‘*Conversion Thermique du Rayonnement Solaire*’, Ed. Dunod, France, pp. 99 - 113 et pp. 217 - 240, 1984. et de Physique. INSA Rouen. 2014
- [34] : <https://www.memoireonline.com/12/13/8187/Simulation-d-une-centrale-solaire--concentrateur-cylindro-parabolique-sous-TRNSYS.html>
- [35] : Matthias Günther, Michael Joemann, Simon Csambor. ‘‘**Advanced CSP Teaching Materials**’’. DLR Centre allemand pour l’aéronautique et l’astronautique.
- [36] : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00409692/document>
- [37] : <https://www.physagreg.fr/optique-12-generalites-systemes-miroirs>
- [38] : <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2440&chapterid=1508>
- [39] : <https://www.researchgate.net/publication/242083993>
- [40] : J.M. Chasseriau, ‘*Conversion Thermique du Rayonnement Solaire*’, Ed. Dunod, France, pp. 99 - 113 et pp. 217 - 240, 1984.
- [41] : [https://www.researchgate.net/figure/Relation-entre-le-taux-de-concentration-et-la-temperature-du-recepteur-74\\_fig14\\_334657455](https://www.researchgate.net/figure/Relation-entre-le-taux-de-concentration-et-la-temperature-du-recepteur-74_fig14_334657455)
- [42] : W. Chekirou, N. Boukheit et T. Kerbache, ‘*Analyse Thermique pour l’Absorbeur d’un*

## Références bibliographiques

---

*Concentrateur Solaire Cylindro Parabolique*, 12ème Journées Internationales de Thermique, pp. 61 – 64, Maroc, 2005.

[43] : M. Li and L.L. Wang, ‘*Investigation of Evacuated Tube Heated by Solar Trough Concentrating System*’, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, N°20, pp. 3591 – 3601, 2006.

[44] : A. Valan Arasu et Arun S. Mujumdar, Numerical study on melting of paraffin wax with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a square enclosure. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 8–16 (2012)

[45] : Bel en Zalba et al, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and Applications, *Applied Thermal Engineering*, 23, 2003, pp. 251–283.

[46] : Atul Sharma et al, Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009, pp.318-345.

[47] : Souad BABAY et al, REVIEW ON THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS, *Annales de la Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur*, Vol. 1 N° 4/2009

[48] : Amina Akrouche, Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase, mémoire du magister, Université M'Hamed BOUGARA – Boumerdes-, 2011,108.

[49] : Mohammed M. Farid et al, A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45, 2004, pp 1597–1615.

[50] : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/13018/1/Ms.GM.Missoum.pdf>

[51] : <http://docplayer.fr/137397433-Memoire-de-fin-d-etudes.html>

[52] : Serge Blaise EKOMY ANGO « Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase »

[53] : Abhat (1983). Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials. *Solar Energy*, Vol. 30, No. 4, pp. 313-332.

[54] : Sari, A. (2004). Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid–liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties. *Energy Conversion and Management* 45: 2033-2042.

[55] : Zhang et fang 2006

[56] : MEHLING, H., HIEBLER, S., ZIEGLER, F., 2000. Latent Heat Storage Using a PCM Graphite Composite Material. Proceedings of TERRASTOCK-2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, 28th August – 1st September, 2000, Stuttgart, Germany, 1: 375-380.

## Références bibliographiques

---

- [57] : MARIN, J.M., ZALBA, B., CABEZA, L.F., MEHLING, H., 2005. Improvement of a Thermal Energy Storage Using Plates with Paraffin-Graphite Composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48: 2561-2570
- [58] : X. Py, R. Olives, S. Maurin, Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 44, pp.27272737, 2001
- [59] : Lane, 1983. *Solar Heat Storage: Latent Heat Material, Volume 1: Background and Scientific Principles*. USA: CRC
- [60] : A. GONTARD, K. GRYSKA, L. LALLEMAND « Amélioration de la conductivité thermique de matériau à changement de phase », Université de Pau des pays de l'Adour 2012.
- [61] : Eduard Oró Prim « Thermal energy storage (TES) using phase change materials (PCM) for cold applications », Universitat de Lleida, 2013.
- [62] : <http://www.joelsornette.fr/ressources/textes/cours505-1c.pdf>  
<https://fr.wikipedia.org/wiki>
- [63] : <http://docplayer.fr/137397433-Memoire-de-fin-d-etudes.html>

## Résumé

La demande énergétique croit du jour au jour, avec l'industrialisation, la mondialisation du commerce et surtout avec la multiplication des équipements domestiques. Cette augmentation a été majoritairement couverte par surexploitation des sources d'énergies fossiles (non renouvelable).

Et face aux exigences environnementales et devant la menace d'épuisement des combustibles fossiles, le défi présenté est de trouver des sources d'énergie propres et renouvelables, comme l'énergie solaire.

Ce mémoire présente une étude expérimentale d'un capteur cylindro parabolique. Dans ce travail on a introduit un nouveau type d'absorbeur dans lequel nous avons intégré les matériaux à changement de phases pour stocker l'énergie sous forme de chaleur latente, afin d'améliorer le rendement de ce dernier.

## Abstract

Energy demand is growing day by day, with industrialization, the globalization of trade and especially with the proliferation of domestic equipment. This increase was mainly covered by overexploitation of fossil energy sources (non-renewable).

And in the face of environmental demands and the threat of depletion of fossil fuels, the challenge presented is to find clean and renewable sources of energy, such as solar power.

This thesis presents an experimental study of a parabolic cylindrical sensor. In this work we have introduced a new type of absorber in which we have integrated phase change materials to store energy in the form of latent heat, in order to improve the efficiency of the latter. In addition to this, you need to know more about it.

## ملخص

يتزايد الطلب على الطاقة يوماً بعد يوم ، مع التصنيع وعولمة التجارة وخاصة مع انتشار المعدات المحلية. تمت تغطية هذه الزيادة بشكل أساسي من خلال الاستغلال المفرط لمصادر الطاقة الأحفورية (غير المتجددة).

وفي مواجهة المتطلبات البيئية وخطر استنفاد الوقود الأحفوري ، يتمثل التحدي المطروح في إيجاد مصادر طاقة نظيفة ومتجددة ، مثل الطاقة الشمسية.

تقدم هذه الأطروحة دراسة تجريبية لجهاز استشعار أسطوانى مكافئ. في هذا العمل ، قدمنا نوعاً جديداً من الممتص حيث قمنا بدمج مواد متغيرة الطور لتخزين الطاقة على شكل حرارة كامنة ، من أجل تحسين كفاءة الأخير. بالإضافة إلى ذلك ، تحتاج إلى معرفة المزيد عنها .