

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : DES SCIENCES  
DEPARTEMENT : PHYSIQUE



DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIARE  
FILIERE : PHYSIQUE  
OPTION : ENERGIE SOLAIRE

N° : .....

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: Bentoumi Hadjer**

**Intitulé**

**Etude numérique et expérimentale d'un capteur  
solaire thermique en Boussaâda**

**Soutenu le 24 /05 /2017 devant le jury composé de:**

Mohamed Salmi	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Président
Mayouf Si Abdallah	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Rapporteur
Mourad Silem	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016/2017**

*Je dédie ce mémoire:*

*À ma très chère mère qui a été la lumière de ma vie*

*Et Mon père*

*A mes chères sœurs*

*A mon cher frère*

*A toute ma famille et ma grande famille, pour tous les efforts et les sacrifices qu'ils me présentent.*

*Et Mon encadreur Mr.Si Abdallah Mayouf*

*A tous mes amis sans exception.*

*Pour conclure, je le dédie à:*

*A mon classe 2<sup>em</sup> année master physique option énergétique et à*

*tous*

*ce qui m'ont aimé et m'ont respecté*

***Bentoumi Hadjer***

## ***Remerciement***

*Je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience qui m'a permis d'accomplir ce modeste travail.*

*Je tiens en premier à exprimer ma grande gratitude envers mon encadreur Mr.Si Abdallah Maayouf qui m'a apporté son aide et ses valeureux conseils pour l'accomplissement et le suivit de ce travail.*

*Je remercie également le membre de jury pour avoir examiner ce travail*

*Et je présente mes sincères remerciements à tout le personnel*

*Et je présente mes sincères remerciements à tout le personnel qui m'a aidé à la Réalisation de ce travail.*

## Sommaire

Nomenclature.....	I
Liste des figures .....	III
Liste des tableaux.....	V
Introduction générale .....	VI

### Chapitre I : Gisement solaire

I.1.Le soleil.....	1
I.2. La constante solaire .....	1
I.3. Le mouvement de la terre.....	1
I.4. La sphère céleste.....	2
I.5. Les coordonnées célestes .....	2
I.5.1.Les coordonnées géographiques .....	2
I.5.2.Les coordonnées horaires .....	3
I.5.3.Les coordonnées horizontales .....	4
I.6.Angle d'incidence sur un plan quelconque.....	5
I.7.Les temps solaires.....	5
I.7.1.Le temps solaire vrai .....	5
I.7.2.Le temps solaire moyen.....	5
I.7.3.Le temps universel .....	6
I.7.4.Le temps légal .....	6
I.8.Le rayonnement solaire.....	6
I.9.Les composants de rayonnement solaire.....	6
I.9.1. Le rayonnement direct sur un plan horizontal.....	7
I.9.2. le rayonnement diffus sur un plan horizontal .....	7
I.9.3. Rayonnement solaire direct sur un plan incliné .....	8

I.9.4. Rayonnement solaire diffus sur un plan incliné .....	8
I.9.5. Rayonnement global.....	8
I.10. Le gisement solaire en Algérie .....	8

## **Chapitre II : Étude bibliographique**

II.1. Introduction .....	10
II.2. L'énergie solaire thermique .....	10
II.3. Les type des capteurs solaires .....	10
II.4. Composants des systèmes solaires thermiques .....	10
II.4.1. Le ballon de stockage.....	11
II.4.2. Définition et le principe de fonctionnement d'un capteur.....	11
II.5. Les différents types des capteurs solaires thermiques .....	12
II.5.1. Les capteurs solaires thermiques plans .....	12
II.5.1.1. Les capteurs plans vitrés .....	12
II.5.1.2. Les capteurs non vitré .....	12
II.5.2. Les capteurs à tube sous vide.....	13
II.5.3. Les capteurs à concentration.....	14
II.5.3.1. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques.....	14
II.5.3.2. Les capteurs à concentration du type dishes .....	15
II.5.3.3. Les centrales à tour .....	16
II.6. Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré .....	16
II.6.1. L'absorbeur.....	17
II.6.2. La couverture transparente (vitrage) .....	17
II.6.3. L'isolation thermique .....	18
II.6.4. Le cadre du capteur .....	19
II.6.5. Le fluide caloporteur .....	19
II.7. L'utilisation des capteurs .....	19
II.8. L'orientation des capteurs.....	20

II.8.1.Des capteurs fixes .....	20
II.8.2. Des capteurs à poursuite.....	20
II.9. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires .....	20
II.9.1. Paramètres externes.....	20
II.9.2. Paramètres interne.....	20
II.9.3. Paramètres de fonctionnements .....	20
II.10. Quelques résultats obtenus par les chercheurs .....	21
II.11. conclusion .....	22

### **CHAPITRE III: Etude théorique et numérique d'un capteur solaire plan**

III.1.Introduction.....	23
III.2. Transfert de chaleur par conduction.....	23
III.2.1 Conduction .....	23
III.2.2. Convection.....	24
III.2.2.1. La convection libre ou naturelle.....	24
III.2.2.2. La convection forcée .....	24
III.2.3.Le rayonnement .....	25
III.3. Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire .....	26
III.3.1. Échanges thermiques au niveau de la vitre .....	26
III.3.2. Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur .....	27
III.4. Perte globale d'énergie.....	30
III.4.1 Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur.....	30
III.4.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur .....	30
III.4.3 Coefficient de pertes thermiques latérales .....	31
III.5 Rendement instantané du capteur solaire .....	31
III.6.Etude numérique .....	32

## CHAPITRE IV: Résultats et discussion

IV.1. Introduction .....	36
IV.2. Caractéristiques du capteur plan étudié.....	36
IV.3. Les instruments de mesures utilisés .....	37
IV.3.1. Mesure des différentes températures .....	37
IV.3.2. Mesure du débit du fluide de travail.....	37
IV.4. Les coordonnées géographiques de Bou Saâda .....	38
IV.5. Trouver l'angle d'inclinaison optimale.....	38
IV.6. Variation temporelles des puissances solaire globale .....	40
IV.7. Variation temporelles de la température des différents composants du capteur (orientation vers le soleil).....	41
IV.8. Variation temporelles de la température des différents composants du capteur (orientation vers le sud).....	46
IV.9. comparaison de température de sortie de l'eau à l'état au le capteur est dirigée vers le soleil et vers le sud .....	50
IV.10. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques .....	51
IV.11. variation des températures pendant le mois de Mai (Nj=125).....	55
IV.12. Effet de débit sur la température de sortie .....	56
IV.13. Le rendement thermique horaire .....	57
Conclusion Generale.....	58

### Annexes

### Bibliographie

# Nomenclature

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
$C_p$	Chaleur spécifique de l'eau	$J/kg^{\circ}C$
$G$	Rayonnement global incident	$W/m^2$
$a$	Azimut du soleil	Degré
$h$	Hauteur angulaire du soleil	Degré
$I_0$	La constante solaire	$W/m^2$
$C_{pi}$	Chaleur spécifique d'un corps d'indice $i$	$J/kg.K$
$e_i$	Epaisseur d'un corps d'indice $i$	m
$h_{c,i-j}$	Coefficient d'échange thermique par convection entre deux systèmes d'indice $i$ et $j$	$W/m^2.K$
$h_{r,i-j}$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux systèmes d'indice $i$ et $j$	$W/m^2.K$
$Q_{cv,i-j}$	Flux de chaleur échangé par convection entre deux systèmes d'indice $i$ et $j$	W
$Q_{r,i-j}$	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux systèmes d'indice $i$ et $j$	W
$Q_{cd,i-j}$	Flux de chaleur échangé par conduction entre deux systèmes d'indice $i$ et $j$	W
$G$	Rayonnement solaire global	$W/m^2$
$m_i$	Masse d'un corps d'indice $i$	kg
$P_i$	Puissance solaire absorbée par un corps d'indice $i$	W
$T_i$	Température d'un corps d'indice $i$	$^{\circ}K$

## Indices

Indice	Désignation
a	Air
ab	absorbeur
am	ambient
f	Fluide caloporteur
fe	Fluide à l'entrée du capteur
fs	Fluide à la sortie du capteur
vint	Vitre intérieur
vext	Vitre extérieur



## *Nomenclature*

---

### Lettres Grecques

Lettre grecque	Désignation	Unité
$\alpha$	Facteur d'absorption	-
$\beta$	Inclinaison du capteur	°
$\varepsilon$	Emissivité d'un corps	-
$\eta$	Rendement instantané	-
$\lambda$	Conductivité thermique	W/m <sup>2</sup> .K
$\mu$	Viscosité dynamique	Kg/m.s
$\rho$	Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>
$\tau$	Facteur de transmission	-
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann	W/ m <sup>2</sup> . K <sup>-4</sup>

## *Liste des Figures*

### *Liste des figures*

<b>Désignation</b>	<b>Page</b>
<b>Chapitre I</b>	
Figure (I.1) : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	02
Figure(I.2) : La sphère céleste	02
Figure (I.3) : Les coordonnées géographiques	03
Figure (I.4) : Les coordonnées horaires	04
Figure (I.5) : Coordonnées horizontales.	04
Figure (I.6) : Les composants du rayonnement solaire.	06
Figure (I.7) : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu.	08
<b>Chapitre II</b>	
Figure (II.1) : capteur solaire thermique	10
Figure(II.2) : capteur plan vitré	11
Figure (II.3) : capteur plan non vitré	11
Figure (II.4) : capteur à tube sous vide	12
Figure (II.5) : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.	13
Figure (II.6) : Schéma représentant les parties mobiles d'un capteur cylindro-parabolique	13
Figure (II.7) : Schéma d'un capteur à concentration type dishes.	14
Figure (II.8) : Centrale solaire à tour	14
Figure (II.6) : Composants d'un capteur solaire plan	15
<b>Chapitre III</b>	
Figure (III.1) : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré	24
Figure (III.2) : Organigramme de calcul	31
<b>Chapitre IV</b>	
Figures (IV.1) : le banc d'essais expérimentale que nous étudiée	33
Figure (IV.2) : thermomètre digitale	33
Figure (IV.3) : Méthode artisanale de mesure de débit.	34
Figure (IV.4) : Evolution temporelle de puissance globale à angle d'inclinaison différent	35
Figure (IV.5) : Evolution des températures de sortie de l'eau en fonction d'angle d'inclinaison.	36
Figure (IV.6) : Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison ( $\beta=0$ )	36
Figure (IV.7) : Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison $35^\circ$	37
Figure (IV.8) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur à débit=30l/h.	39
Figure (IV.9) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur à débit=40l/h.	40
Figure (IV.10) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur à débit=60l/h. (passage de nuage à 11h30 et à 14h30)	41
Figure (IV.11) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (Orientation vers le sud) à débit30l/h	43
Figure (IV.12) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (Orientation vers le sud) à débit 40l/h	44
Figure (IV.13) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (Orientation vers le sud) à débit 60l/h.	45

## *Liste des Figures*

---

Figure (IV.14) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (orientation vers le sud)	46
Figure (IV.15) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de sortie de fluide caloporteur à orientation vers le soleil	47
Figure (IV.16) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de sortie de fluide caloporteur à orientation vers le sud	48
Figure (IV.17) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de l'absorbeur à orientation vers le soleil.	48
Figure (IV.18) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de l'absorbeur à orientation vers le sud.	49
Figure (IV.19) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de vitre intérieure à orientation vers le soleil.	49
Figure (IV.20) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de vitre intérieure à orientation vers le sud	50
Figure (IV.21) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de vitre intérieure à orientation vers le sud.	50
Figure (IV.22) : Evolution des températures de sortie de l'eau en fonction de débit	51
Figure (IV.23) : la variation temporelle de rendement thermique horaire	52

## *Liste des Tableaux*

---

Désignation	Page
Tableau (IV.1) : résultat expérimentale pour trouver l'angle d'inclinaison optimale de capteur à débit 20l/h.	35
Tableau (IV.2) : résultat expérimentale pour orientation vers le soleil et débit 30l/h	39
Tableau (IV.3) : résultat expérimentale pour orientation vers le soleil et débit 40l/h.	40
Tableau (IV.4) : résultat expérimentale pour orientation suivant le soleil et débit 60L/h.	41
Tableau (IV.5) : résultat expérimentale pour orientation vers le sud et débit 30L/h.	43
Tableau (IV.6) : résultat expérimentale pour orientation vers le sud et débit 40L/h.	44

# **INTRODUCTION**

*Compte tenue de l'épuisement des énergies usuelles conventionnelles et leur impact négatif sur l'homme et la nature il devient impératif d'utiliser des énergies propres non polluantes et gratuites comme l'énergie solaire. L'objectif de ce projet est utiliser cette énergie pour obtenir de l'eau chaude sanitaire, cette est la plus dominante et aussi la plus facilement exploitable. De part la diversité de son utilisation et l'intérêt qu'elle porte à travers le monde, cette forme d'énergie a connu un grand essor ces dernières années.*

*Toutefois, le prix élevé de cette énergie par rapport au prix des énergies non renouvelables représente un handicap face à l'expansion de son utilisation.*

*L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde.*

*L'utilisation de l'énergie solaire la plus simple et la plus directe, est la production d'eau chaude sanitaire. Les trois parties de fonctionnement d'un système de chauffage solaire sont : la captation, le stockage et la distribution. La captation est la partie essentielle pour la conversion de l'énergie solaire. Elle est représentée par le capteur solaire. C'est ce dernier qui transforme l'énergie solaire en quantité de chaleur qu'il transmet au fluide caloporteur circulant dans son absorbeur. Vu le rôle important que joue le capteur solaire dans la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, plusieurs recherches ont été menées sur l'étude du capteur solaire plan avec le but d'améliorer son rendement instantané qui représente la performance la plus caractéristique.*

*Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan pour la production de l'eau chaude .Une étude expérimentale et numérique est menée au la ville de Boussaâda, une série des mesures nous a permis d'obtenir des résultats sont comparés avec des résultats numérique représentés graphiquement avec une discussion.*

*Le présent travail comporte quatre chapitres et un annexe :*

- Introduction générale.*
- Le premier chapitre consiste à l'étude du gisement solaire avec une présentation de quelques notions et définitions astronomiques, souvent utilisées dans tous les domaines relatifs à l'énergie solaire.*

- Des généralités sur les chauffe-eau-solaire, les classifications, les différents composants, le fonctionnement feront le sujet du deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre, l'intérêt est porté sur les différents échanges thermiques mis en jeu au sein de notre chauffe-eau-solaire afin de définir les équations régissant le comportement thermique de ce dernier en régime permanent.
- Les résultats des mesures et numériques sont présentés dans le quatrième chapitre, nous avons présenté la variation des puissances et la température des différents composants du capteur en fonction de temps en quelque jour et à différents orientation suivants le soleil puis vers le sud .
- Conclusion Générale.



**Chapitre I :**  
**Gisement solaire**

### I.1. Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes.

Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW . [1]

### I .2 La constante solaire

La valeur du rayonnement solaire " $I_c$ ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " $I_0$ " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m-2. [1]

La constante solaire donnée par la relation suivant :

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times nj)] \quad (I.1)$$

$nj$  : numéro du jour de l'année

### I.3 .Le mouvement de la terre

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [1].

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour où la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [1].

En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur.

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à 23°27'. [1]

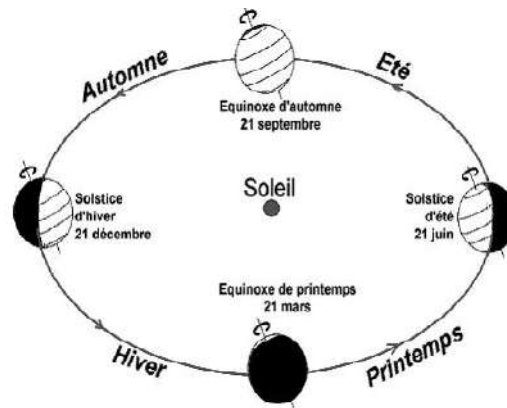


Figure (I.1) : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil

## I.4 La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On ne considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la Figure (I.2). [2]

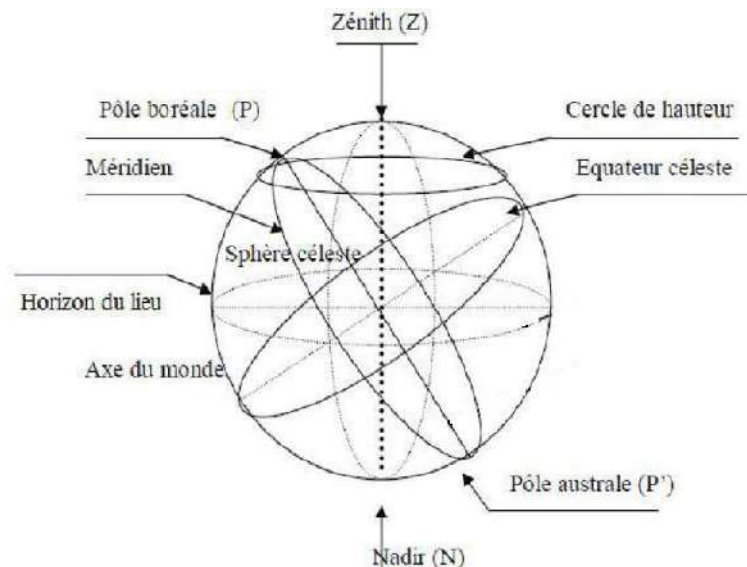


Figure (I.2) : La sphère céleste

## I.5- Les coordonnées célestes

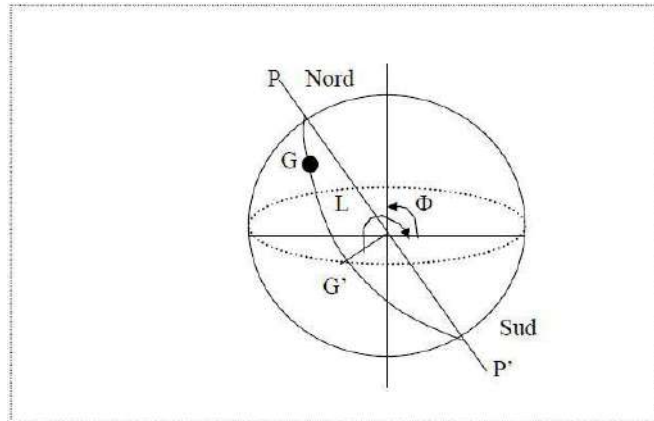
### I.5.1. Les coordonnées géographiques : [3]

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre. Figure(I.3)

- **La longitude (L)** : représente l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu et le plan méridien origine (Green winch).

- **La latitude ( $\phi$ )** : correspond à l'angle entre le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu et le plan équatorial. Elle varie de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ , elle est positive vers le nord.

- **L'altitude ( $Z$ )** L'altitude est la distance verticale entre ce point et une surface théorique de référence (surface de la mer).



**Figure(I.3) : Les coordonnées géographiques**

#### I.5.2. Les coordonnées horaires [4]

- **La déclinaison ( $\delta$ )** : C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie de  $(+23^\circ 27')$  à  $(-23^\circ 27')$  et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante :

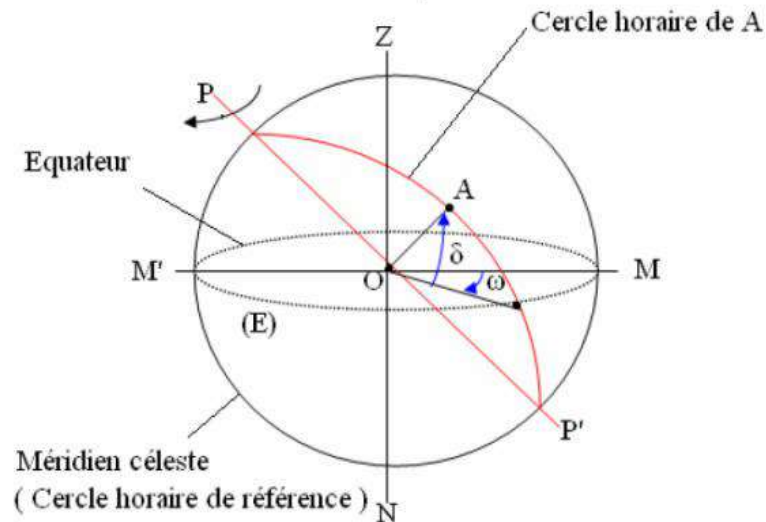
$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (nj + 284) \right] \quad [\text{dégré}] \quad (I.2)$$

$nj$  : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier.

- **L'angle horaire ( $\omega$ )** : C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15 \times (\text{TSV} - 12) \quad (I.3)$$

TSV : temps solaire vrai.



Figure(I.4) : Les coordonnées horaires

### I.5.3. Les coordonnées horizontales : [1]

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu.

Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

**-La hauteur du soleil (h) :** C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal.

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(h) = \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \quad (I.4)$$

$\phi$ : Latitude du lieu.

$\delta$  : La déclinaison du soleil.

$\omega$ : L'angle horaire.

**-L'azimut solaire (a) :** C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est.

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = (\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)) / \cos(h) \quad (I.5)$$

## I.6. Angle d'incidence sur un plan quelconque

L'angle d'incidence  $i$  est l'angle que fait la direction des rayons solaires incidents avec la normal au plan de la surface réceptrice. Il est donné par la relation suivante :

$$\cos(i) = \cos(\alpha - a) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(h) + \sin(\gamma) \cdot \sin(h) \quad (I.6)$$

$\gamma$  : orientation de plan

$a$  : L'azimut solaire

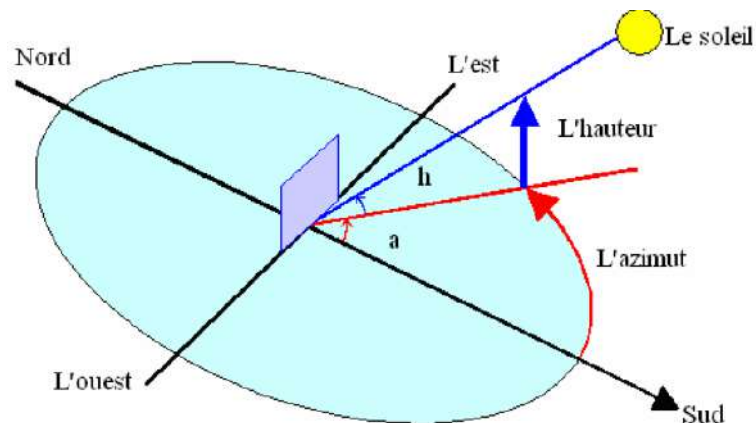


Figure (I.5) : Coordonnées horizontales.

## I.7. Les temps solaire [5]

### I.7.1. Le Temps Solaire vrai (TSV)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $w$ . Il est donné sous la forme suivant :

$$\text{TSV} = 12 + \omega/15 \quad (I.7)$$

### I.7.2. Le Temps Solaire Moyen (TM)

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation :

$$Et = \text{TSV} - \text{TSM} \quad (I.8)$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (I.9)$$

$$N' = (n_j - 81) \cdot 360/365 \quad (I.10)$$

### I.7.3. Le Temps Universel (TU) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) [26]:

$$TU = TSM - (L/15) \quad (I.11)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$  ; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$  ; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$  ; pour le méridien de Greenwich.

### I.7.4. Le Temps Légal (TL) :

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [5] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.12)$$

$\Delta H$  : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie.

### I.7.5. Le Temps Civil :

Représente le temps qui a pour origine minuit [5].

## I.8. Le rayonnement solaire

L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude de l'orientation de la surface considérée. Figure(I.6)

## I.9. Les composants de rayonnement solaire [6]

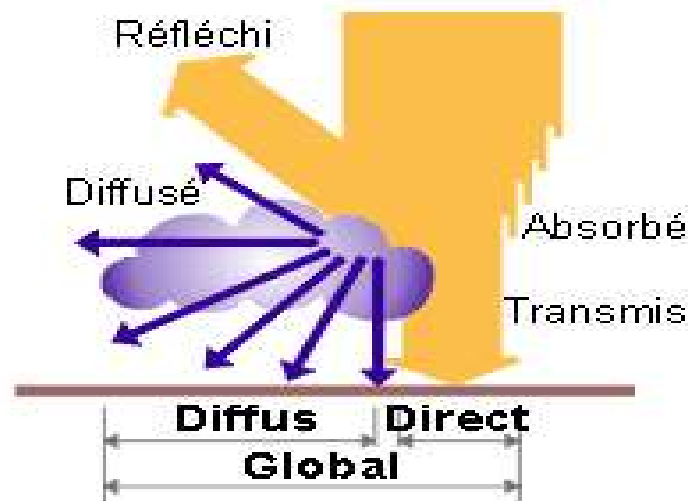


Figure (I.6) : Les composants du rayonnement solaire

### I. 9. 1. Le rayonnement direct sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal peut être déterminé par:

$$S = F \times \sin(h) \quad (I-13)$$

F est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires et peut être évalué par :

$$F = I_0 \cdot \text{Exp} (TL / (0.9 + 9.4\sin(h))) \text{ [w/m}^2 \text{]} \quad (I-14)$$

Avec  $I_0 = 1370 \text{ w/m}^2$  et TL le facteur de trouble de Linke défini comme suit :

$$TL = 2.4 + 14.6B + 0.4 (1+2B) \ln(PV) \quad (I-15)$$

Où B est le coefficient de trouble atmosphérique

Pv : C'est la pression partielle de vapeur d'eau.

$$Pv = 2.165 \left( 1.098 + \frac{T}{100} \right)^{8.02} \quad (I - 16)$$

T : est la température de l'air en °C.

### I.9.2. le rayonnement diffus sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire diffus sur un plan horizontal peut être déterminé par :

$$D = 54.8 \sqrt{\sin(h)} \times (T - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}) \quad (I-17)$$

**I.9.3. Rayonnement solaire direct sur un plan incliné**

Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est possible de l'estimer par la formule suivante :

$$I_{\text{dir}} = F \times CI \quad (\text{I-18})$$

Où F est le flux incident reçu sur une surface face aux rayons solaires.

CI étant le coefficient d'orientation :

$$CI = (\sin(\beta)\cos(h) + \cos(\beta)\sin(h)) \quad (\text{I-19})$$

**I.9.4. Rayonnement solaire diffus sur un plan incliné**

Le rayonnement solaire diffus D arrive sur le plan récepteur incliné après avoir été diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère.

$$I_{\text{dif}} = 125 \times \sin(h)^{0.4} \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + 211.86 \sin(h)^{1.22} \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (\text{I.20})$$

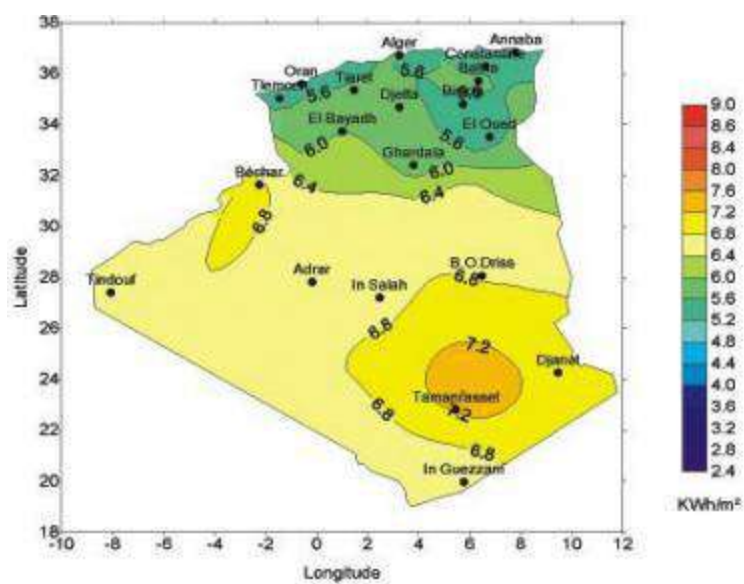
**I.9.5. Rayonnement global**

Le rayonnement global sur une surface est la somme du rayonnement direct ( $I_{\text{dir}}$ ) et du rayonnement diffus ( $I_{\text{dif}}$ ), soit :

$$I_{\text{gl}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (\text{I.21})$$

**I.10. Le gisement solaire en Algérie**

Le gisement solaire 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 un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. [1]



**Figure (I.7) : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu**



**Chapitre II :**

**Étude bibliographique**

## **II.1.Introduction**

L'utilisation de l'énergie solaire thermique redevient d'actualité grâce à son formidable impact sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et à des installations performantes.

Ainsi pour les installations collectives, la mise en œuvre de la garantie de résultats solaires est une donnée incontournable.

Pour exploiter ou stocker cette énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, photovoltaïque ou photothermique .

## **II.2. L'énergie Solaire thermique**

La conversion thermique de l'énergie solaire s'effectue dans un capteur solaire thermique (panneaux solaires thermiques). C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide (eau ou antigel ou air). Le capteur thermique est désigné comme capteur photothermique.

Le rayonnement se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur (basse température): chauffe-eau, chauffages solaires, cuisson solaire, séchage solaire.
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : climatisation solaire, centrales solaires thermodynamiques. [8]

## **II.3. Les type des capteurs solaires :**

- 1 - Les capteurs solaires photovoltaïques qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique. [9]
- 2- Les capteurs solaires thermiques qui transforment l'énergie lumineuse en énergie thermique.

## **II.4. Composants des systèmes solaires thermiques :**

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants:

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories). Les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air.
- Un stockage thermique.

### II.4.1. Le ballon de stockage

Sauf cas spécifique (surface de capteur inférieure à 20-30m<sup>2</sup>), les ballons de stockage sont des ballons type « tampon ECS » dépourvus d'échangeurs de chaleur incorporés. En effet, pour des raisons de coût et de performances, des échangeurs à plaques sont préconisés pour transférer l'énergie à l'eau chaude sanitaire.

Pour certaines applications, ou plus spécialement certaines implantations des ballons de stockage avec des températures basses, on utilise des ballons avec échangeur interne pour éviter les risques de gel dans les canalisations et dans l'échangeur à plaques. Dans ce cas, les canalisations d'eau froide et d'eau chaude doivent être isolées efficacement.

Une attention particulière est portée à la tenue en température des ballons d'eau chaude sanitaire. Certains produits sont garantis uniquement si la température de stockage est inférieure ou égale à 60°C. Tenue en température minimale de 80°C est nécessaire pour les ballons de stockage solaire.

### II.4.2. Définition et le principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique :

Un capteur solaire (figure I.1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide "fluide caloporteur". Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3  $\mu\text{m}$ ), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante. [10]

L'absorbant émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 $\mu\text{m}$ ). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur. [11]

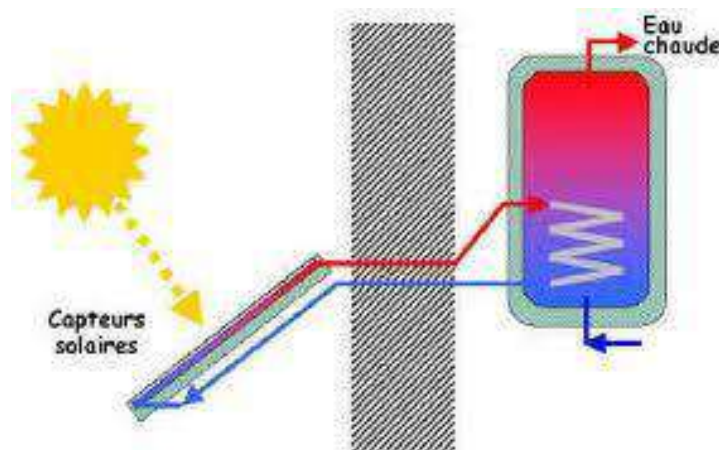


Figure (II.1) : Capteur solaire thermique

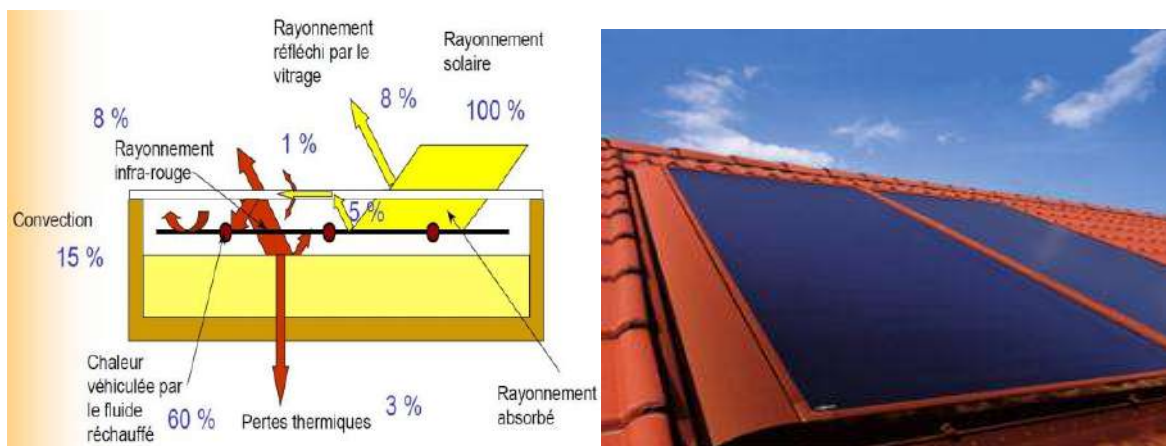
## II.5. Les différents types des capteurs solaires thermiques

### I .5.1. Les capteurs solaires thermiques plans :

Les capteurs solaires plans, sont conçus pour la conversion de l'énergie solaire par voie thermodynamique ou bien la conversion thermique de l'énergie solaire. [12].

#### II.5.1.1. Les capteurs plans vitrés :

Ce type de capteur solaire thermique utilise l'effet de serre pour capter l'énergie thermique du soleil. Ils sont généralement composés d'un châssis sous forme de coffre, d'un isolant en fond, d'un absorbeur de couleur noire en tubes de cuivre munis d'ailettes dans lequel circule le fluide caloporteur et d'une vitre. [13]



Figure(II.2) : Le capteur plan vitré [9]

#### II.5.1.2. Les capteurs non vitrés :

Ce capteur est le plus simple que l'on puisse imaginer, son application usuelle est le chauffage de piscine en plein air, il ne permet pas la production d'ECS (Eau chaude sanitaire) sauf dans les pays chauds.

Il s'agit d'un seul absorbeur en matière synthétique pour les applications à basse températures en métal revêtu d'une couche sélective, se compose d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres, la température de fonctionnement est généralement inférieure à 30°C. [14]

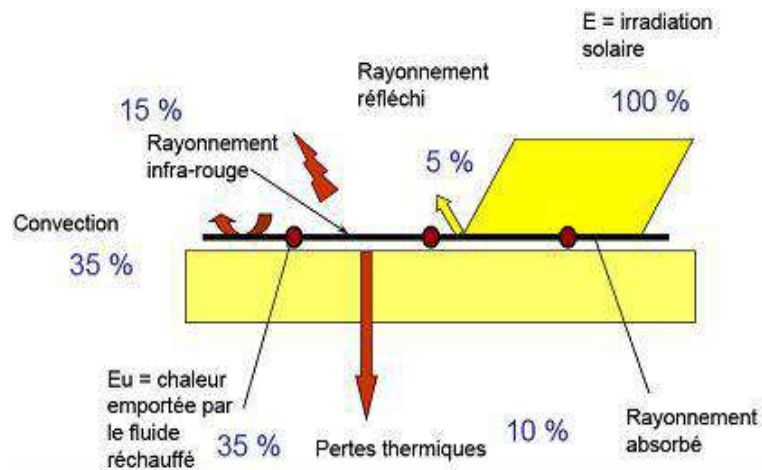


Figure (II.3) : Capteurs plans non vitrés utilisés pour le chauffage de l'eau de piscine. [9]

### II.5.2. Les capteurs à tubes sous vide

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevées (jusqu'à  $120^{\circ}\text{C}$ ). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif. Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, l'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration.

Ces capteurs conviennent bien à la production d'EC (eau chaude) en montagne ou dans les pays du nord compte tenu de leur bon rendement pour des températures extérieures basses.

Voir Figure (II.3). [14]

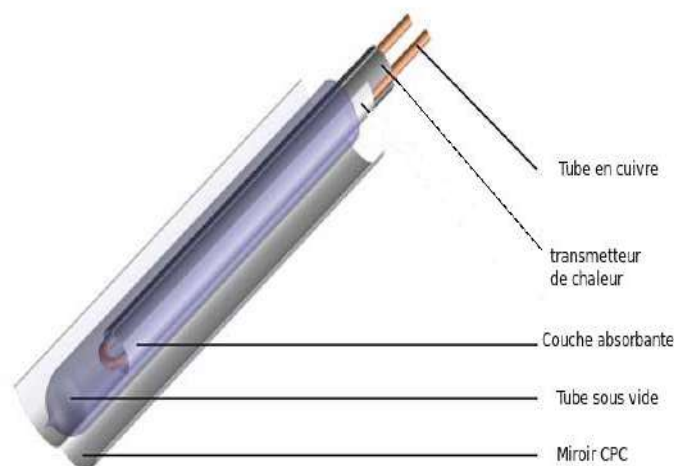
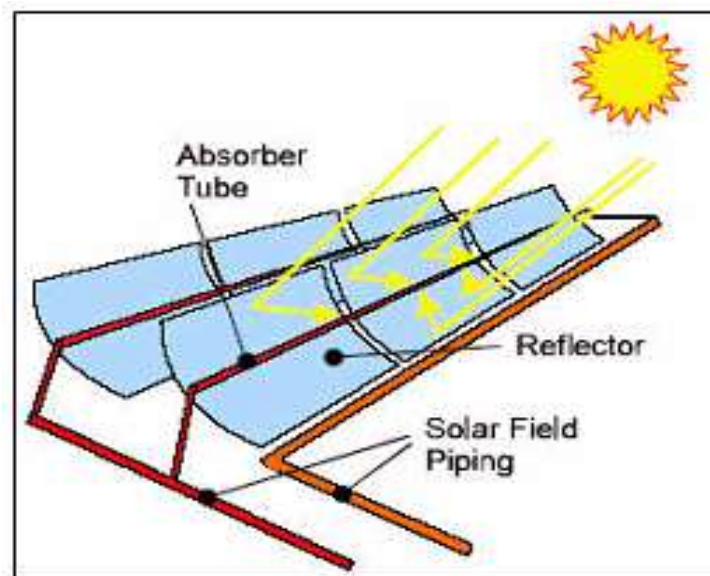


Figure (II.4) : capteur à tubes sous vide [11]

### II.5.3. Les capteurs à concentration [14]

#### II.5.3.1. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques :

Les capteurs à concentration fonctionnent avec un système de poursuite du soleil. Selon que la concentration se fait sur un point (suivi du soleil selon deux axes) ou sur une ligne (suivi du soleil selon un axe), les températures atteintes sont plus ou moins élevées. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire, avec un système de poursuite du soleil selon une seule direction. De ce fait, le facteur de concentration n'est pas très élevé, ainsi que les températures atteintes. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 200 à 400 °C, pour des puissances de plusieurs centaines de kW.



Figure(II.5) : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.

Les premières centrales industrielles importantes de ce type ont été développées aux Etats - Unis par la compagnie Luz Solar. Deux variantes existent, selon la partie mobile :

- ❖ Soit le miroir
- ❖ Soit l'absorbeur

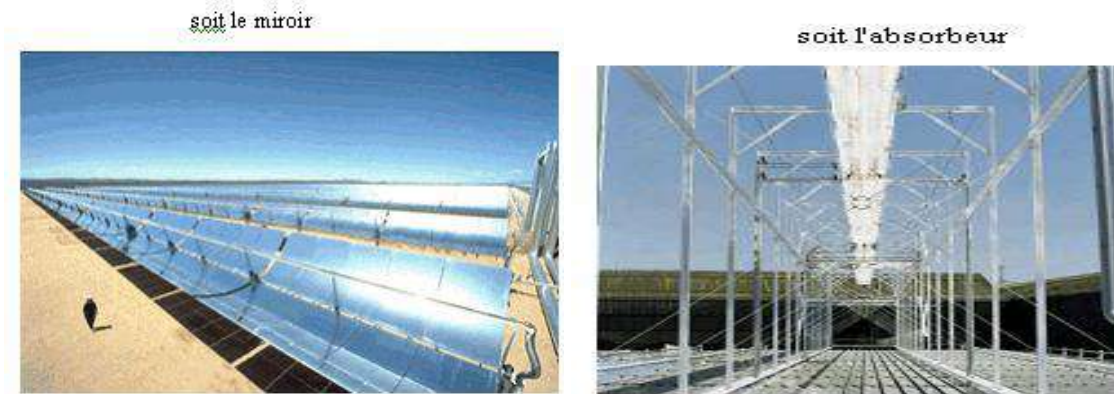


Figure (II.6) : Schéma représentant les parties mobiles d'un capteur cylindro- parabolique

### II.5.3.2. Les capteurs à concentration du type dishes :

Les capteurs à concentration du type « dishes » concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, avec un système de poursuite du soleil selon deux directions. De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs dizaines de kW.

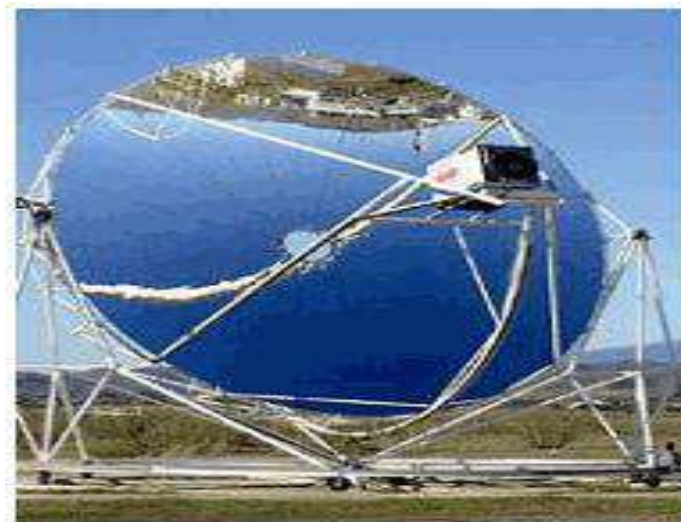


Figure (II.7) : Schéma d'un capteur à concentration type dishes.

### II.5.3.3. Les centrales à tour :

Les installations de ce type concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, à l'aide de miroirs (appelé "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour. De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes. Compte tenu du grand nombre de miroirs,

les puissances peuvent atteindre plusieurs MW. Une telle centrale (Thémis) a été expérimentée dans les années 80, et devrait reprendre du service prochainement. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs MW.



Figure (II.8): Centrale solaire à tour

## II.6. Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente (vitre), d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre figure(I.9).

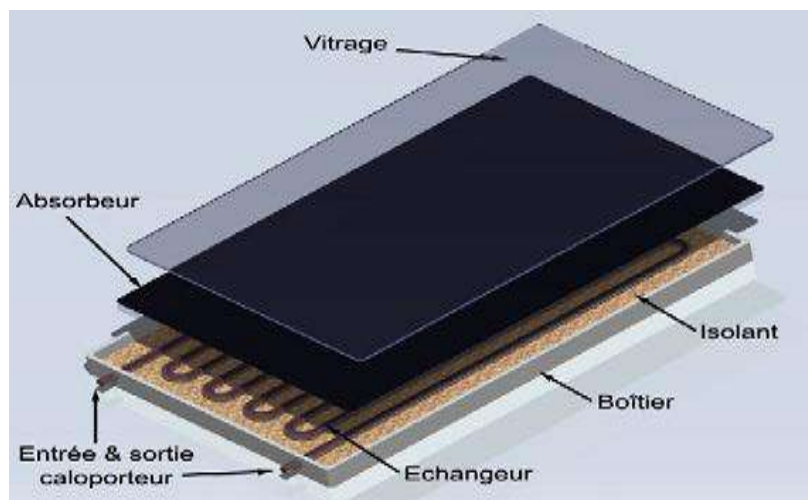


Figure (II.9) : Composants d'un capteur solaire plan

**II.6.1.L'absorbeur :**

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur. [6]

Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. [6]

Les métaux utilisés : le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium, qui ont de bonnes conductibilités thermiques.

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm [15].

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [15].

**Jean-Bernard [6]** conclut par des calculs et optimisation qu'un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R ( $\epsilon < 0.15$ ,  $\alpha > 0.9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir.

**II.6.2.La couverture transparente (vitrage) :**

C'est la partie à travers laquelle le rayonnement atteint la surface de l'absorbeur.

L'une de ses caractéristiques est de réaliser l'effet de serre.

Les matériaux les plus utilisés sont :

- ❖ Le verre.
- ❖ Les polycarbonates.
- ❖ Les polymétacrylates de méthyle.

En ce qui concerne les verres, on préférera ceux dont le taux d'oxyde de fer est le plus faible (verre horticole par exemple).

On rencontre également des couvertures transparentes multiples (doubles) et des couvertures constituées par un film souples transparent tel que Mylar ou Tedlar, parmi les fonctions de la couverture transparente on peut citer :

- ❖ La protection de l'absorbeur et l'isolation thermique.
- ❖ Fait partie de l'isolation thermique.
- ❖ Elle réfléchit le rayonnement au minimum et absorbe la lumière aussi peu possible de sorte que la totalité du rayonnement atteint la surface de l'absorbeur.

### **II.6.3. L'isolation thermique**

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

#### **➤ Partie avant de l'absorbeur**

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. [16]

En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [6].

#### **➤ Parties arrière et latérale**

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, si non, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux

faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [6] , [15].

#### **II.6.4. Le cadre du capteur :**

Le cadre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

#### **II.6.5. Le fluide caloporteur :**

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants [6]:

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ( $\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ ) pour l'air contre  $4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$  pour l'eau.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

#### **II.7. L'utilisation des capteurs**

- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages
- Faire fonctionner des moteurs thermiques
- Alimenter des machines de réfrigération.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C.

## **II.8. L'orientation des capteurs [17]**

Les capteurs solaires peuvent être :

### **II.8.1. Des capteurs fixes :**

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- La simplicité et la fiabilité.
- Un faible entretien.
- Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).
- L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité.

### **II.8.2. Des capteurs à poursuite**

Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.

## **II.9. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires [8].**

Elles peuvent être classées en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes :

### **II.9.1. Paramètres externes :**

Les paramètres externes sont représentés par :

- Paramètre d'ensoleillement : éclairage énergétique du rayonnement global à la position du soleil et à la durée d'insolation. [8].
- la température extérieure sèche.
- la vitesse du vent sur le capteur.

### **II.9.2. Paramètres internes :**

Les paramètres internes sont représentés par :

- paramètre de position : l'inclinaison et l'orientation
- dimensions de capteur: épaisseur, longueur, la largeur et la surface réceptrice.
- la section de passage du fluide. [8].

### **II.9.3. Paramètres de fonctionnements :**

Les paramètres de fonctionnement sont représentés par :

- la température d'entrée du fluide dans le capteur.
- les températures des différentes parties du capteur.
- le débit du fluide caloporteur.

Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi les différents types de capteur, dont entre autres : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur.

### II.10. Quelques résultats obtenus par les chercheurs

Le Chauffe-eau solaire se caractérise par sa performance thermique et il dépend en grande partie de la transmission, l'absorption et la conduction de l'énergie solaire et la conductivité du fonctionnement de fluide.

Les performances d'un capteur se traduisent essentiellement par le rendement de ce dernier. En pratique, ce rendement est fonction de l'énergie utile qu'on cherche constamment à augmenter :

- ❖ Par augmentation de la quantité d'énergie solaire reçue par l'absorbeur,
- ❖ Par diminution des pertes de chaleur vers l'arrière du capteur (zones non réceptrices) et vers l'avant du capteur (entre l'absorbeur et l'ambiance).

L'augmentation de la chaleur reçue par l'absorbeur a été étudié par de nombreux chercheurs. [18-19] ont étudiés l'effet de l'utilisation d'un revêtement sélectif (revêtement de l'absorbeur d'une teinture noire mate) pour augmenter la part du rayonnement absorbé. En outre, l'effet de la conductivité thermique de la plaque absorbante sur les performances des capteurs solaires a été étudié par l'intermédiaire du système de simulation en régime transitoire (TRNSYS) par **Sharia et al.** [20]. Ils ont confirmés que les facteurs caractéristiques comme le facteur de rendement du capteur et le facteur de dissipation de la chaleur sont fortement dépendants de la conductivité thermique de la plaque absorbante.

La diminution des pertes de chaleur vers les zones non réceptrices nécessite une bonne isolation thermique en utilisant divers matériaux d'épaisseur variable **Colle et al.** [21]. Par contre les pertes vers l'avant sont difficiles à estimer en raison de la complexité des phénomènes se produisant dans cette partie du capteur. **Benkhelifa** [22] à présenter un modèle mathématique permettant de calculer les pertes thermiques vers l'avant d'un capteur solaire plan. Il a exploité un programme de calcul pour étudier l'influence de quelques paramètres physiques et géométriques sur le coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur. Ainsi, il a montré que le coefficient de pertes thermiques vers l'avant augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, de la température de la plaque absorbante et du coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, et il diminue avec l'augmentation de la distance entre l'absorbeur et le vitrage.

Les performances d'un capteur solaire sont aussi influencées par les différents modèles des plaques absorbantes.

L'amélioration des performances d'un capteur solaire avec une plaque absorbante ondulé-croisé qui renforce la turbulence et le transfert de chaleur à l'intérieur du canal et le taux d'écoulement du fluide a été analysée par **Gao et al. [4]**. Leurs résultats ont prouvés que les capteurs solaires avec des plaques absorbantes ondulés-croisés ont un meilleur rendement thermique par rapport aux capteurs plats.

### **II.11. Conclusion**

Dans ce chapitre une étude descriptive est présentée sur les capteurs solaires, ses composants, les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement influant sur leur efficacité etc. Dans le chapitre suivant sera présentée la partie énergétiques et les formules mathématiques liées aux phénomènes physiques qui génèrent dans ces capteurs.



**CHAPITRE III :**

**Etude théorique et numérique d'un  
capteur solaire plan**

## PARTIE 01 : ETUDE THEORIQUE

### III.1. INTRODUCTION

Parmi les panneaux solaires thermiques, nous avons choisi le capteur plan à chauffe-eau solaire.

Dans ce chapitre, on s'intéressera particulièrement à :

- Les modes de transfert thermique
- Établir le bilan énergétique au niveau du capteur.
- Formuler des hypothèses pour simplifier nos calculs.
- Déterminer les différents coefficients des transferts thermiques ainsi que le coefficient d'échange global.
- Établir l'analogie électrique-thermique
- Déterminer les différents facteurs relatifs à la géométrie de l'absorbeur
- Établir une méthode numérique pour résoudre l'équation concernant le bilan thermique de notre système.

### III.2. Les modes de transfert thermique

#### III.2.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts :

- une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$Q_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{grad} T \quad (III.1)$$

$$Q_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (III.2)$$

Avec :

$Q_{cd}$ : Le flux de chaleur par conduction (W).

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).

$\lambda$ : La conductivité thermique ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

$x$ : Variable d'espace dans la direction du flux (m).

### III.2.2. Convection

Dans ce cas le transfert de chaleur s'effectue d'un fluide liquide ou gazeux à un corps solide (par exemple entre l'air et une paroi). Les particules se trouvent en mouvement entre elles. On distingue deux types de convection :

#### III.2.2.1. La convection libre ou naturelle

Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermocirculation.

#### III.2.2.2 La convection forcée

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilation ...).

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$Q_{cv} = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad (\text{III.3})$$

Avec:

$Q_{cv}$ : Le flux de chaleur par convection (W).

$S$  : La surface de transmission de chaleur ( $m^2$ ).

$T_p$ : La température de surface de solide ( $^\circ C$ ).

$T_\infty$ : La température du fluide avant son contact avec le solide ( $^\circ C$ ).

$h_c$ : Le coefficient de transmission thermique par convection ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).

➤ **En convection forcée**

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange  $h_c$  par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et le fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes :

$U_m$  : vitesse moyenne du fluide

$\rho$  : masse volumique du fluide

$C_p$  : Chaleur spécifique du fluide

$\mu$  : viscosité thermique du fluide

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide

$D$  : dimension caractéristique de la surface d'échange

➤ A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

$$Nu = h_c \cdot \frac{D}{\lambda} \quad \text{nombre de Nusselt}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot U_m D}{\mu} \quad \text{nombre de Reynolds}$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot c_p}{\rho} \quad \text{nombre de Prandtl}$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélation mathématiques  $\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr})$  qui permettent de calculer  $h_c$  par :

$$h = \text{Nu} \cdot \frac{D}{\lambda} \quad (\text{III.4})$$

Re : le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

Pr : le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

Nu : le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

#### ➤ En convection naturelle :

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est fonction de sa température.

La convection forcée est négligeable si :

$$\text{Gr}/\text{Pr}^2 > 100$$

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n$$

Convection laminaire  $\text{Gr} \cdot \text{Pr} < 109 \Rightarrow n=1/4$

Convection turbulente  $\text{Gr} \cdot \text{Pr} > 109 \Rightarrow n=1/3$

### III.2.3. Le rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{III.5})$$

$Q_r$  : densité de flux de chaleur émis par le corps.

$\varepsilon$  : émissivité thermique du matériau.

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à  $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{k}^{-4}\text{)}$

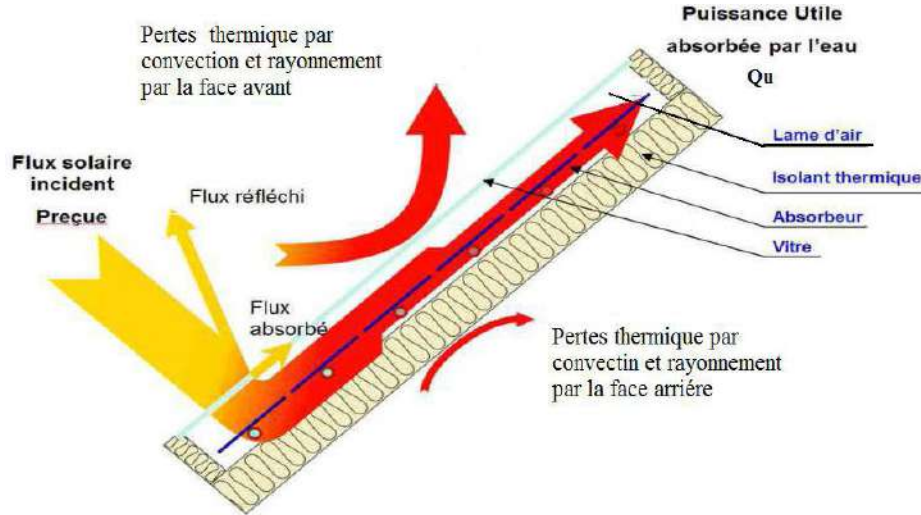
$T_p$  : Température de la surface.

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface.

$S$  : Aire de la surface ( $\text{m}^2$ )

### III.3. Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure III.1).



Figure(III.1) : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré

#### III.3.1 Échanges thermiques au niveau de la vitre [23]

En plus du flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage, il existe un autre flux de chaleur incident ( $Q_v$ ) qui sera absorbé par la vitre mais avec peu d'importance.

$$Q_v = \alpha_v \cdot s_v \cdot G \quad (III.6)$$

$\alpha_v$  : coefficient d'absorption de la vitre.

$s_v$  : Surface de la vitre ( $m^2$ ).

G: Le rayonnement global.

Le flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant est donné par l'équation (III.7) :

$$Q_{cvam} = h_{cvam} \cdot S_v \cdot (T_v - T_{am}) \quad (III.7)$$

$T_{am}$ : La température ambiante ( $^{\circ}K$ ).

$h_{cvam}$  : coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant. Ce dernier est dû entièrement à la vitesse du vent ( $W/ m^2 \cdot ^{\circ}K$ ).

On pourra utiliser la corrélation de Hottel et Woertz :

$$h_{cvam} = 5.67 + 3.86 \cdot V \quad (III.8)$$

V : La vitesse du vent (m/s).

➤ Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel est donné par l'équation (III.9) :

$$Q_{rvc} = h_{rvc} \cdot S_v \cdot (T_v - T_{ciel}) \quad (III.9)$$

$T_{ciel}$  : La température de ciel (°K).

$h_{rvc}$  : coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et ciel (W/ m<sup>2</sup>°K).

$$h_{rvc} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_v \cdot \sigma (1 + \cos\beta)(T_{ciel} - T_v) \cdot (T_{ciel}^2 + T_v^2) \quad (III.10)$$

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot Tam^{1.5} \quad (III.11)$$

### III.3.2 Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur [23]

➤ Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage est donné par l'équation (II.12)

$$Q_{cabv} = S_{ab} \cdot h_{cabv} \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (III.12)$$

$T_{ab}$  : La température de l'absorbeur (°K).

$S_{ab}$  : La surface de l'absorbeur (m<sup>2</sup>)

$h_{cabv}$  : Le coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur (W/ m<sup>2</sup>°K).

$$h_{cabv} = Nu \cdot \left( \frac{e}{\lambda_{air}} \right) \quad (III.13)$$

$$Nu = 1 + 1.446 \times \left( 1 - \frac{1708 \times (\sin(1.8\beta))^{1.6}}{Ra \times \cos(\beta)} \right) \times \left( 1 - \frac{1708}{Ra \times \cos(\beta)} \right) + \left( \frac{Ra \times \cos(\beta)}{5830} \right)^{0.666} - 1 \quad (III.14)$$

$Pr$  : nombre de Prandtl.

$e$  : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante (m).

$Gr$  : nombre de Grashof.

$\lambda_{air}$  : Conductivité thermique de l'air (W/m.K).

$\beta$  : inclinaison du capteur (rad).

$Ra$  : Etant le nombre de *Rayleigh*

➤ Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage est donné par l'équation (III.15)

$$Q_{rabv} = S_{ab} \cdot h_{rabv} \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (III.15)$$

$$h_{rabv} = \frac{\sigma(T_{ab}+T_v)(T_{ab}^2+T_v^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}}\right)+\left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)-1} \quad (\text{III.16})$$

$\varepsilon_{ab}, \varepsilon_v$  : Sont respectivement les émissivités de l'absorbeur et du vitrage.

$\sigma$  : constante de Stéphane Boltzmann :  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

➤ Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par l'équation (III.17)

$$Q_{cdabi} = \frac{(T_{ab}+T_i)}{\left(\frac{e_{ab}}{S_{abi} \cdot \lambda_i}\right)+\left(\frac{e_i}{S_{abi} \cdot \lambda_{ab}}\right)} + \frac{(T_{ab}-T_i)}{\left(\frac{e_{ab}}{S_{abil} \cdot \lambda_{il}}\right)+\left(\frac{e_{il}}{S_{abil} \cdot \lambda_{ab}}\right)} \quad (\text{III.17})$$

$T_i$ : Température de l'isolant ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$S_{abi}$ : Surface de contact absorbeur isolant pour la face avant ( $\text{m}^2$ ).

$S_{abil}$ : Surface de contact absorbeur isolant pour la face latérale ( $\text{m}^2$ ).

$\lambda_i$ : Conductivité thermique de l'isolant (laine de roche). ( $\text{Wm}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{K}^{-1}$ )

$\lambda_{il}$  : conductivité thermique de l'isolant. (Laine de verre). ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

$\lambda_{ab}$  : conductivité thermique de l'absorbeur ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ).

$e_{ab}$ : Épaisseur de l'absorbeur (m).

$e_i$ : Épaisseur de l'isolant (laine de roche) (m).

$e_{il}$ : Épaisseur de l'isolant latéral (laine de verre) (m).

➤ Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau) est donné par l'équation (II.18)

$$Q_{cabf} = h_{cabf} \cdot S_{abf} \cdot (T_{ab} - T_f) \quad (\text{III.18})$$

$T_f$ : Température du fluide caloporteur ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$S_{abf}$ : Surface de contact absorbeur fluide caloporteur ( $\text{m}^2$ ).

$h_{cabf}$ : Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

Le coefficient d'échange de chaleur par convection à l'intérieur des tubes  $h_{cabf}$  est calculé suivant Gnielinski [24].

$$Nu = \frac{\Omega}{8} \left( \frac{(Re-10^3) \cdot Pr}{1+12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3}-1)} \right) \left( 1 + \left(\frac{di}{L}\right)^{\frac{2}{3}} \right) \quad (\text{III.19})$$

$\Omega$ : coefficient de Darcy.

Pr: nombre de Prandtl.

Re: nombre de Reynolds.

di: diamètre intérieur (m).

L: longueur du tube (m).

Cette corrélation est utilisable pour  $0.6 < Pr < 2000$ ,  $2300 < Re < 106$ . Le nombre de Reynolds est donné par:

$\Omega$ : coefficient de Darcy.

Pr: nombre de Prandtl.

Re: nombre de Reynolds.

di: diamètre intérieur (m).

L: longueur du tube (m).

Cette corrélation est utilisable pour  $0.6 < Pr < 2000$ ,  $2300 < Re < 106$ .

Le nombre de Reynolds est donné par:

$$Re = \rho \cdot \frac{D \cdot V}{\mu} \quad (\text{III.20})$$

D: diamètre du tube (m).

$\mu$ : viscosité dynamique de l'eau (Pas).

V: vitesse moyenne du fluide (m/s).

Pour un écoulement turbulent hydraulique lisse, le coefficient de Darcy est donné par des relations différentes, suivant le nombre de Reynolds.

Si  $2300 \leq Re \leq 10^5$ , on applique la formule de Blasius :

$$\Omega = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} \quad (\text{III.21})$$

Si  $10^5 \leq Re \leq 10^6$ , on applique la relation d'Herman :

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 \cdot Re^{-0.3} \quad (\text{III.22})$$

Le coefficient d'échange de chaleur interne est donné par:

$$h_{\text{cabf}} = Nu \cdot \frac{\lambda_{\text{eau}}}{d_i} \quad (\text{III.23})$$

$\lambda_{\text{eau}}$  : conductivité thermique de l'eau ( $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ K^{-1}$ )

$d$  : diamètre du tube intérieur (m).

➤ Le flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur est donné par (III.24) :

$$Q_{abv} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot S_{ab} \cdot G \quad (\text{III.24})$$

$\alpha_{ab}$  : coefficient d'absorption de l'absorbeur.

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre.

$G$ : éclairement global incident sur le plan incliné du capteur plan. ( $\text{W/ m}^2$ ).

### III.4 Perte globale d'énergie [23]

Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Elles se manifestent selon les trois modes de transfert de chaleur. Elles se divisent en trois catégories: les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales.

#### III.4.1 Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur sera donné par la relation suivante:

$$U_{av} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{rvc} + h_{cvam}}\right) \left(\frac{1}{h_{cabv} + h_{rabv}}\right)} \quad (\text{III.25})$$

#### III.4.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur

Ce coefficient est peu important que celui d'avant, vue le capteur est très bien isolé à l'arrière.

L'expression évaluant ce coefficient est donné par:

$$U_{arr} = \lambda_{isol} / e_{isol} \quad (\text{III.26})$$

$\lambda_{isol}$ : conductivité thermique de l'isolant ( $\text{W/ }^\circ\text{K m}$ ).

$e_{isol}$ : épaisseur de l'isolant (m).

#### III.4.3 Coefficient de pertes thermiques latérales

La valeur de ce coefficient est inférieure à celle du coefficient de pertes arrière, vue que la surface latérale du capteur est peu important.

$$U_{lat} = \left(\frac{\lambda_{isol}}{e_{isol}}\right) \left(\frac{S_{lat}}{S_c}\right) \quad (\text{III.27})$$

Slat : surface latérale du capteur ( $m^2$ ).

$S_c$  : surface du capteur ( $m^2$ ).

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des trois coefficients.

$$U_L = U_{av} + U_{arr} + U_{lat} \quad (III.28)$$

### III.5. Rendement instantané du capteur solaire [23]

L'analyse faite dans ce domaine par Hottel, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant:

Puissance de sortie = Puissance captée – Pertes

$\eta$  = Puissance thermique utile par  $m^2$  du capteur / flux solaire incident sur le plan de capteur

$$\eta = \frac{Q_u}{S_c \cdot G} = \frac{S_c [(\alpha\tau) \cdot G - U_L (T_{ab} - T_{am})]}{S_c \cdot G} \quad (III.29)$$

$Q_u$  : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur (W).

$\alpha\tau$  : sont respectivement coefficient d'absorption de l'absorbeur et transparence de vitrage.

**PARTIE 02 : ETUDE NUMERIQUE****III.6. Principe de simulation :**

La simulation numérique est un outil qui convient parfaitement à l'étude du comportement du modèle numérique caractéristique des systèmes réels.

Le principe de cette simulation repose sur un découpage spatial et temporel fictif en un certain nombre des sections spatiales « dx » suivant l'axe des « x », « dy » suivant l'axe des « y » et des sections temporelles « dt » suivant l'axe temporel « t », donc nous avons un repère tridimensionnel.

Dans l'intervalle de temps  $t$  et  $t+dt$ , on décrit tout le système de la première à la dernière section spatial suivant  $ox$  et  $oy$ . la résolution des systèmes des équations expriment les bilans thermiques et massiques dans la répartition des températures relatives à chaque section.

Chaque unité peut avoir son découpage propre, mais le découpage temporel doit être le même pour tout le système.

Pour cela, nous avons élaboré un code de calcul numérique écrit en langage fortran permet de calculer les paramètres essentiels de notre problème.

Dans ce cas, nous avons utilisé les caractéristique des mesure (latitude, longitude, température ambiante, température d'enter de l'eau ...ect) concernant de site de Bou Saâda ainsi que de caractéristique du notre modèle du capteur solaire présenter dans le quatrième chapitre.

Pour résoudre les équations de transfert nous avons utilisé l'analogie électrique (loi d'Ohm et de Kirchhoff). D'une façon générale, la densité de flux de chaleur entre un point de température  $T1$  et un point de température  $T2$  peut s'écrire ce la forme:

$$Q_{2-1} = h_{2-1}.s. (T2-T1).$$

Cette expression est formellement semblable à la loi d'Ohm et autorise l'analogie suivante entre les grandeurs thermiques et électriques :

Système thermique			Modèle électrique		
Paramètre	Symbole usuel	unité	Paramètre	Symbole usuel	Unité
Température	T	K	Potentiel	V	Volts
Flux de chaleur	Q, $\Phi$	W	Intensité	I	Ampères
Densité de flux de chaleur	$\phi$	W / m <sup>2</sup>	Densité de courant	I	A / m <sup>2</sup>
Conductivité thermique	$\lambda$	W / m / K	Conductivité électrique	K	A / m / V
Résistance thermique	R	K / W	Résistance électrique	R <sub>e</sub>	$\Omega$
Capacité calorifique m. Cp	C	J / K	Capacité électrique	C	Farad

**Tableau III .1 : Analogie du système thermique au modèle électrique**

cette façon de procéder permet de représenter les échanges de chaleur par un schéma électrique auquel on peut appliquer la loi d'Ohm et de Kirchhoff (Fig. III.2) pour calculer les températures (T<sub>vint</sub>, T<sub>vext</sub>, T<sub>abs</sub>, T<sub>s</sub>, T<sub>iso</sub>) de chaque composante de notre capteur ainsi les coefficients d'échange thermique par conduction par rayonnement et par convection . Pour cela, nous avons utilisé les méthodes itératives, parmi ces méthodes, nous avons choisi la méthode de Gauss Sidel. L'algorithme de calcul est présenté dans la (Figure. III.3)

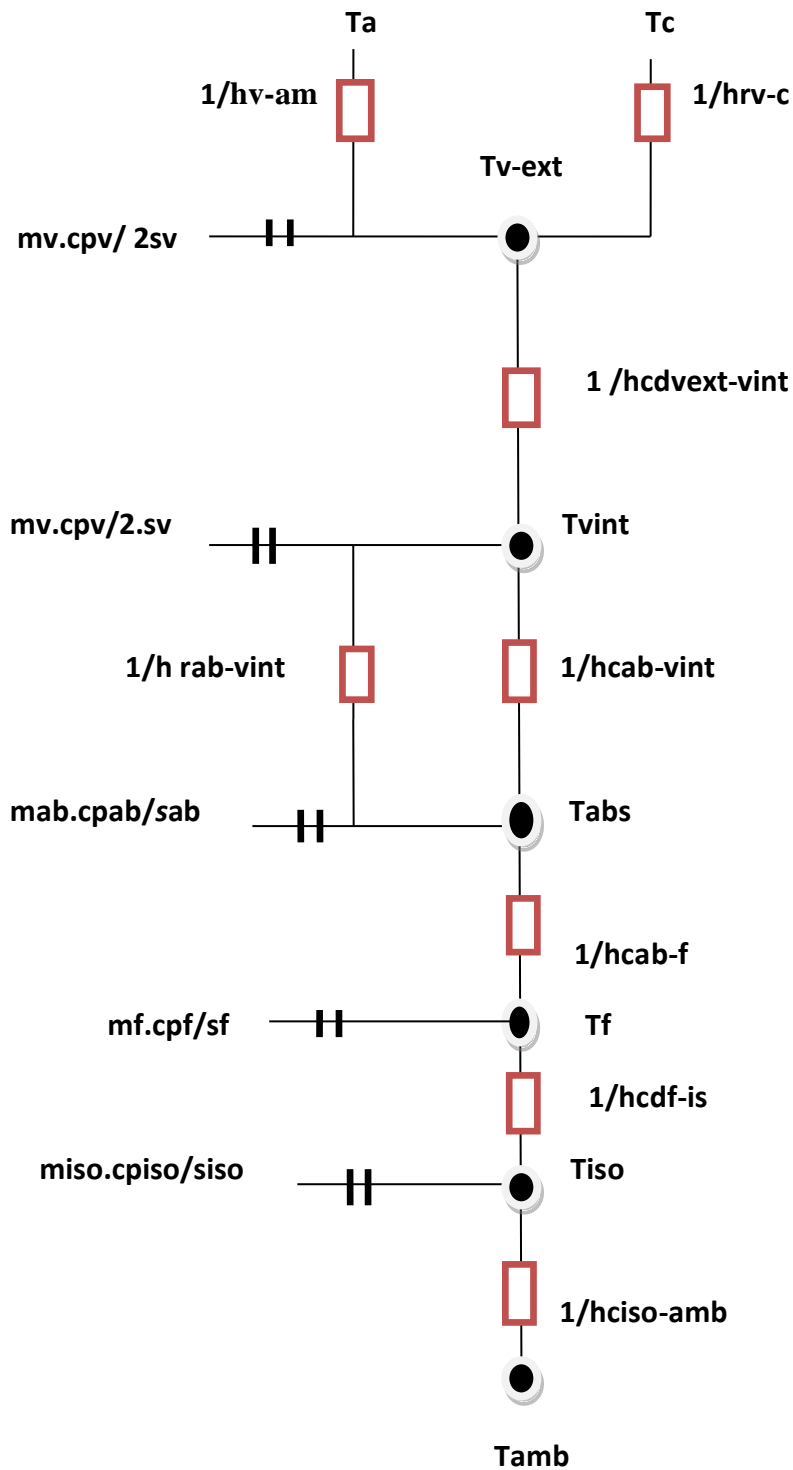


Figure (III.2) : schéma électrique équivalent du capteu

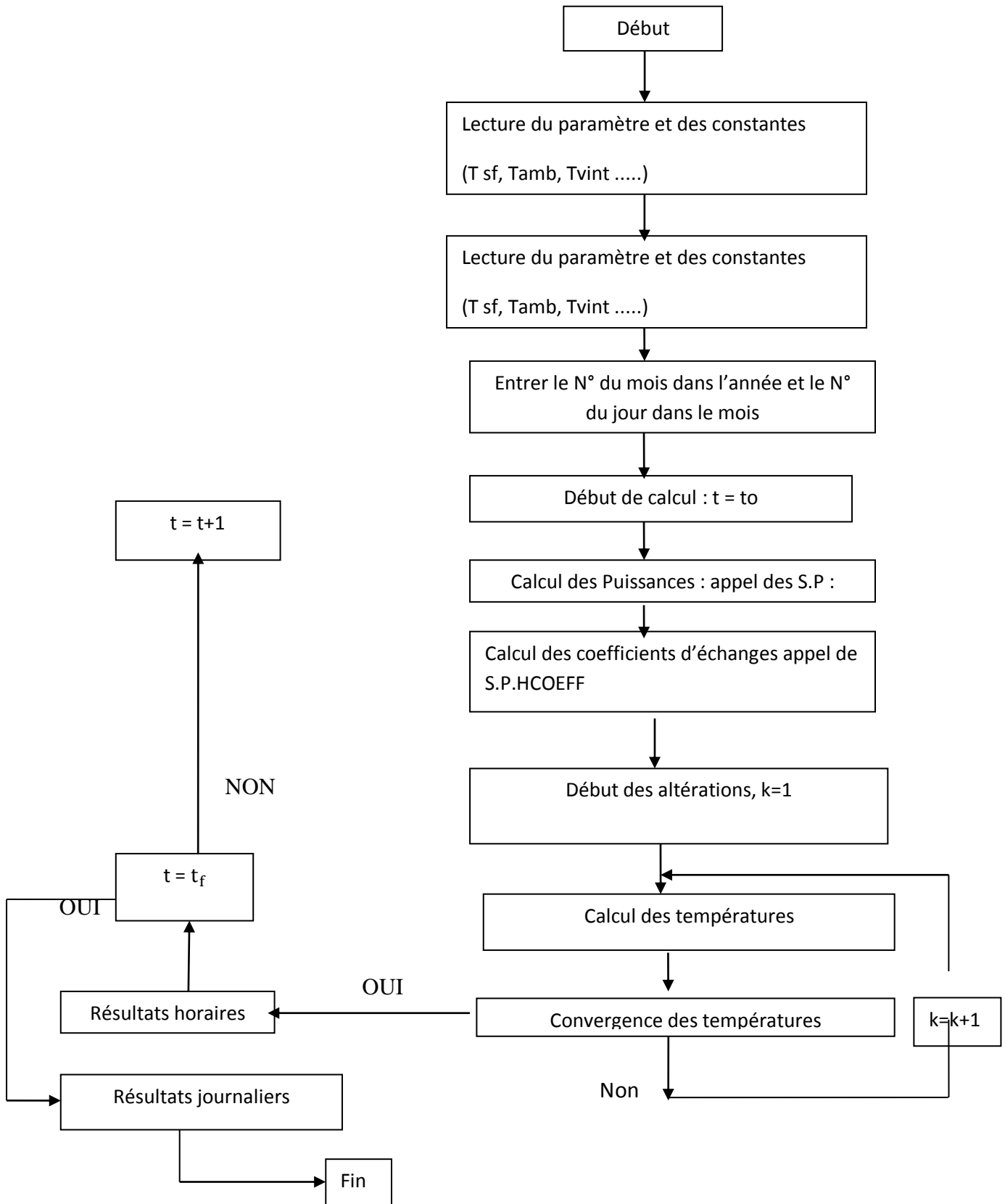


Figure (III.3) : Organigramme de calcul



**CHAPITRE IV:**  
**Résultats et discussions**

## IV.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la réalisation des tests sur un capteur plan en utilisant les différents appareils de mesures appropriés. Afin de réaliser une caractérisation de notre capteur solaire, les paramètres suivants ont été mesurés :

- Les températures des différents éléments du capteur à savoir : entrée et sortie du fluide, la couverture, l'absorbeur et la température ambiante
- Le débit massique du fluide caloporteur (eau)
- Le rayonnement solaire

## IV.2. Caractéristiques du capteur plan étudié

Le capteur réalisé est un capteur solaire plan Figure (IV.1) à circulation de fluide dans une tuyauterie en cuivre. Le fluide utilisé pour nos expériences est l'eau prévenant du réseau de distribution (réservoir).

Afin de faciliter l'inclinaison du capteur, un support mobile adapté aux conditions de tests a été utilisé. Après des tests pour trouver l'angle optimale d'inclinaison, le support est fixé sur un angle d'inclinaison qui correspond à la latitude du lieu (Boussaâda: 35°).

Nous allons traiter deux cas pour l'orientation de notre capteur, l'un vers une orientation plein sud et l'autre vers le soleil direct pour comparer les résultats à deux cas.

Les caractéristiques des différents constituants de notre capteur sont :

- ❖ longueur du capteur  $L=1.07\text{m}$
- ❖ largeur du capteur  $l=80\text{cm}$
- ❖ Un absorbeur plat en acier galvanisé peint en noir mat ; d'épaisseur égale à 1mm
- ❖ l'écartement absorbeur -vitre égale à 1.5 cm
- ❖ l'écoulement est en dessous de l'absorbeur
- ❖ le fluide caloporteur est l'eau
- ❖ l'isolation de la base en bois, d'épaisseur de 1 cm
- ❖ une couverture transparente en verre ordinaire d'épaisseur 4mm
- ❖ diamètre de conduit=14mm et épaisseur 0.8mm



Figure (IV.1) : le banc d'essais expérimentale que nous étudiée

### IV.3. Les instruments de mesures utilisés

#### IV.3.1. Mesure des différentes températures

La mesure des différentes températures du capteur (entrée et sortie du fluide, la plaque absorbante, la vitre) est assurée par un thermomètre digitale avec sonde figure (IV.2).



Figure (IV.2) : thermomètre digitale

#### IV.3.2. Mesure du débit du fluide de travail

La mesure de débit du fluide caloporteur est assurée par une méthode simple (artisanale), qui consiste à chronométrer le temps nécessaire pour remplir un réservoir de 1L, figure (IV.3).

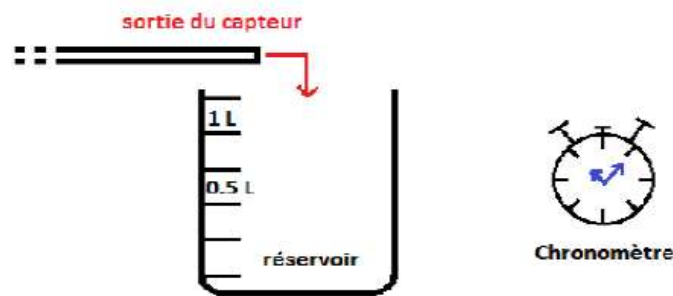


Figure (IV.3) : Méthode artisanale de mesure de débit

#### IV.4. Les coordonnées géographiques de Boussaâda

Latitude: 35.21

Longitude: 4.18

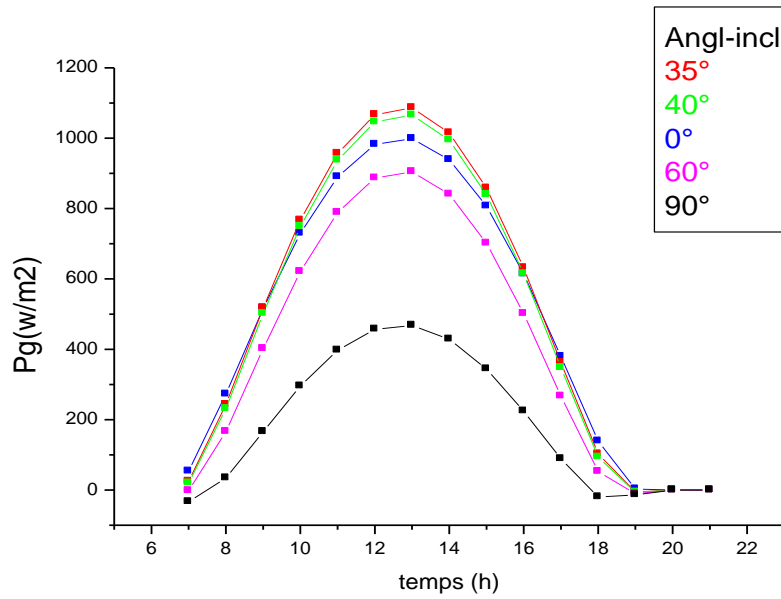
Altitude : 470 m

Le climat dominant de Boussaâda est de type désertique. Il n'y a pratiquement aucune précipitation pendant l'année.

#### IV.5. l'angle d'inclinaison optimale

Avant de commencer notre travail, nous avons effectué une chaîne de teste numérique et expérimentale pour trouver l'angle d'inclinaison optimale du capteur. Nous avons fixé le débit de sortie de l'eau sur 20 l/h et le numéro de jour dans l'année ( $N_j=107$ ) qui est correspond à la date (18-04-2017) et nous avons aussi fixée son orientation vers le sud, puis nous avons calculé la puissance solaire globale numériquement à l'aide d'un code de calcul écrit en langage Fortran comme indiqué dans la Figure(IV.4).

Expérimentales, nous avons varié l'angle d'inclinaison et à chaque fois nous avons mesuré la température de sortie de l'eau caloporteur (Tableau. IV.1) et figure(IV.5). On remarque que la puissance globale calculée numériquement et la température de sortie mesurée atteignent une valeur maximale à l'angle  $35^\circ$ , donc ceci l'angle optimal qui est correspond à la latitude de Boussaâda (35,21).



Figure(IV.4) : Evolution temporelle de puissance globale à angle d’inclinaison différent

Ts (C°)	Angle d’inclinaison(°)
33.7	30
34.8	35
33.6	40
32.8	45
31.3	50

Tableau(IV.1) : résultat expérimentale pour trouver l’angle d’inclinaison optimale de capteur à débit 20l/h

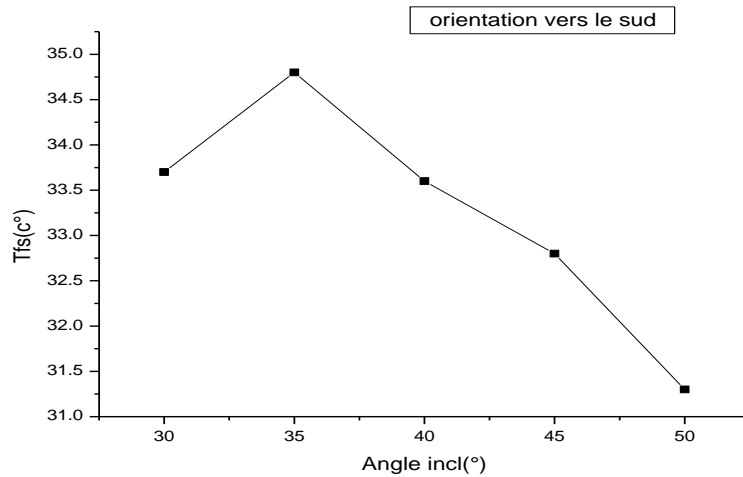


Figure (IV.5) : Evolution des températures de sortie de l'eau en fonction d'angle d'inclinaison.

### IV.6. Variation temporelles des puissances solaire globale

La figure (IV.6) représente la variation des puissances solaire globale théorique (calculer à l'aide d'un programme écrit en langage Fortran) au cours de la journée avec un angle d'inclinaison  $\beta = 0^\circ$  où le capteur est dirigée vers le soleil directe puis vers le sud.

Nous notons que la plus grande valeur du rayonnement solaire est à midi dans toutes les saisons et quel que soit l'orientation du capteur, et cela parce que l'intensité du rayonnement solaire est perpendiculaire à la surface de la terre à ce moment de la journée et au jour de 21 juin (c'est le solstice d'été). On remarque aussi dans cette figure que l'orientation du capteur vers le soleil directe assure le maximum d'énergie incident pendant le jour dans toutes les saisons.

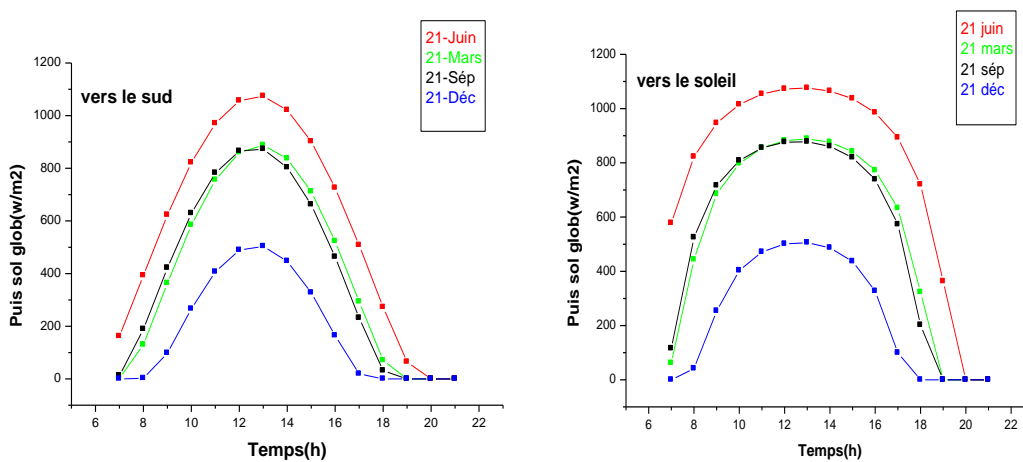


Figure (IV.6) : Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison ( $\beta=0$ )

La figure (IV .7) représente l'évolution des différents éclairagements solaires incidents sur un plan incliné d'un angle  $\beta=35^\circ$  et orienté plein sud elle permet de remarquer que l'éclairage solaire reçu par un capteur au cours de la journée est nul au lever du jour puis il commence à croître avec le temps, il atteint un maximum vers 13 h, après il commence à décroître pour atteindre le zéro au coucher du soleil.

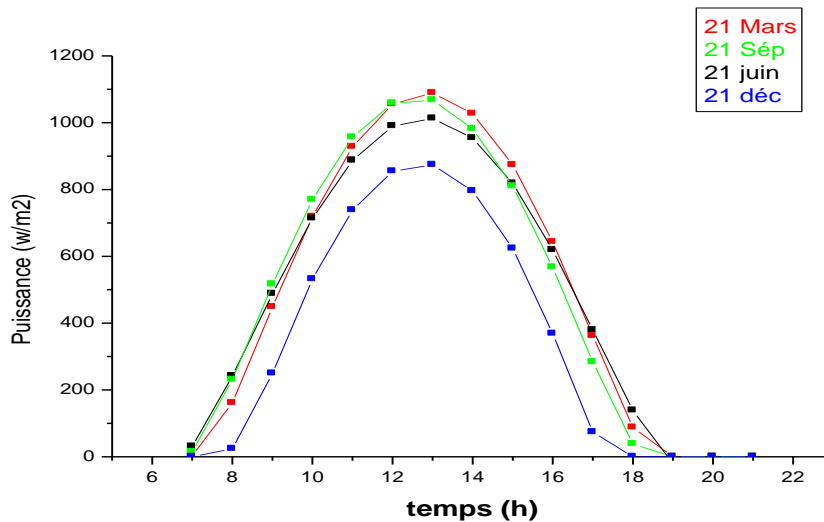


Figure (IV.7) : Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison  $35^\circ$

#### IV.7.Variation temporelles de la température des différents composants du capteur (orientation vers le soleil)

Les figures (IV.8-9-10) représentent la variation temporelle de température des différents composants de capteur en fonction de temps pour des différents débits (30 l/h, 40 l/h, 60 l/h) où le capteur est dirigée vers le soleil. On remarque que la température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbe.

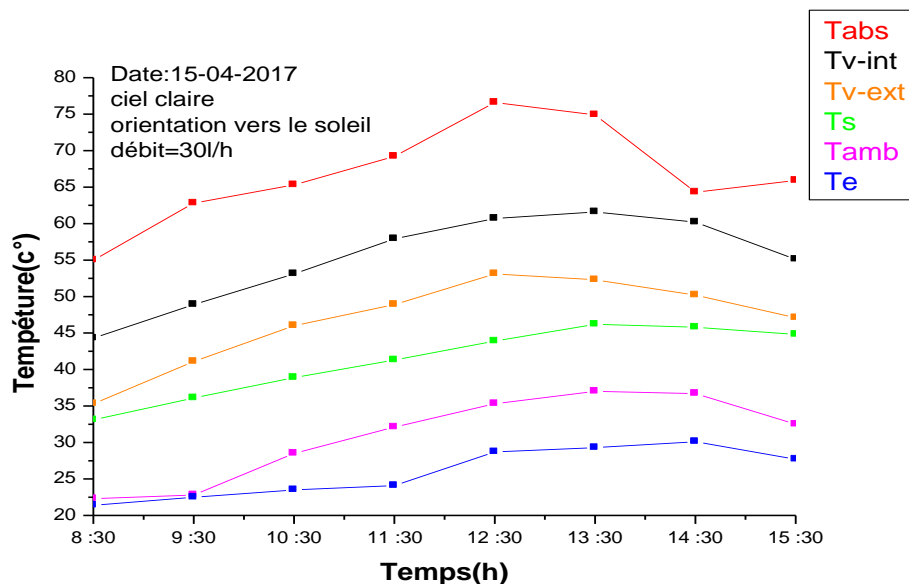
On trouve dans un ordre décroissant la température de la face intérieure de la vitre, ceci s'explique par l'absorption du rayonnement incident d'une part, et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement et de convection d'autre part. Puis, la température de la vitre extérieure qui est inférieure à celle de la face intérieure, ceci est due à son affectation par l'action du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant. D'une autre part, la température du côté intérieur de la vitre est supérieure à son côté extérieur

à cause de l'emprisonnement du rayonnement I.R entre l'absorbeur et la face intérieure de la vitre.

D'après les figure (IV. 8-9-10) en remarque que la température des différents composants augmente pour atteindre son maximum entre 12h et 14h dû à l'augmentation de température d'ambiante et de l'intensité du rayonnement solaire, et puis commencer à diminuée à cause de la chute de la température ambiante et de l'éclairement solaire global.

date		15-04-2017						
Orientation		vers le soleil						
ciel		clair						
Temps (h)	Débit (L/h)	Tamb (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	Tv,ext (°C)	Tv ,int (°C)	Tabs (°C)	Angle d'inclinaison $\beta$
8 :30	30	22.3	21.4	33.1	35.3	44.3	55.0	35
9 :30	30	22.8	22.5	36.9	41.1	48.9	62.8	35
10 :30	30	28.5	23.5	38.9	46.0	53.1	65.3	35
11 :30	30	32.1	24.1	41.3	48.9	57.9	69.2	35
12 :30	30	35.3	28.7	43.9	53.1	60.7	76.6	35
13 :30	30	37.0	29.3	46.2	52.3	61.6	74.9	35
14 :30	30	36.7	30.1	45.8	50.2	60.2	67.8	35
15 :30	30	32.5	27.7	44.8	47.1	55.1	63.3	35

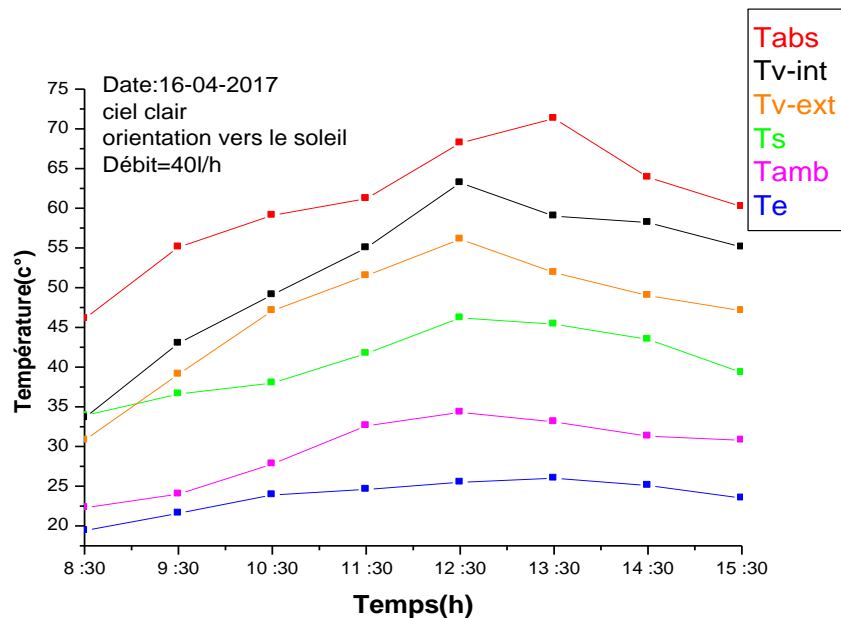
Tableau(IV.2) : résultat expérimentale pour orientation vers le soleil et débit



Figure(IV.8) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur à débit=30l/h.

date		16-04-2017						
Orientation		suivant le soleil						
ciel		clair						
Temps (h)	Débit(L/h)	Tamb (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	Tv,ext (°C)	Tv ,int (°C)	Tabs (°C)	Angle d'inclinaison $\beta$
8 :30	40	22.3	19.4	33.0	30.8	33.6	46.1	35
9 :30	40	24.0	21.6	36.1	39.1	43.0	55.1	35
10 :30	40	27.8	23.9	38.0	47.1	49.1	59.1	35
11 :30	40	32.6	24.6	41.0	51.5	55.0	61.2	35
12 :30	40	34.3	25.5	46.2	56.1	63.2	68.2	35
13 :30	40	33.1	26.0	45.4	51.9	59.0	71.3	35
14 :30	40	31.3	25.1	43.5	49.0	58.2	63.9	35
15 :30	40	30.8	23.5	39.3	47.1	55.1	60.2	35

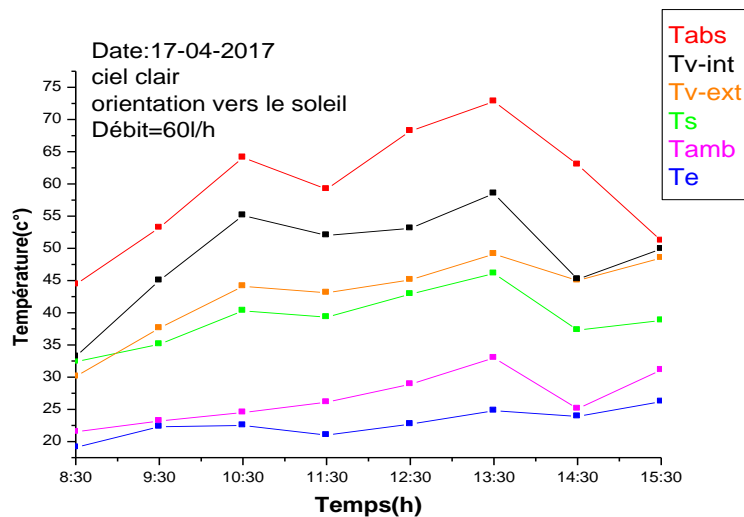
Tableau (IV.3) : résultat expérimentale pour orientation suivant le soleil et débit 40L/h



Figure(IV.9) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur à débit=40l/h.

Date		17-04-2017							
Orientation		suivant le soleil							
Ciel		clair							
Temps (h)	Débit(L/h)	Tamb (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	Tv,ext (°C)	Tv,int (°C)	Tabs (°C)	Angle d'inclinaison $\beta$	
8 :30	60	21.5	19.1	32.4	30.1	33.2	44.4	35	
9 :30	60	23.2	22.3	35.1	37.6	45.0	53.2	35	
10 :30	60	24.5	22.5	40.3	44.1	55.1	64.1	35	
11 :30	60	26.1	21.0	39.3	43.1	52.0	59.2	35	
12 :30	60	28.9	22.7	42.9	45.1	53.1	68.2	35	
13 :30	60	33.0	24.8	46.1	49.1	58.5	72.8	35	
14 :30	60	25.1	23.9	37.3	45.0	45.2	63.0	35	
15 :30	60	31.1	26.2	38.8	48.5	49.9	51.2	35	

Tableau(IV.4) : résultat expérimentale pour orientation suivant le soleil et débit 60L/h



Figures (IV.10) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur à débit=60l/h. (passage de nuage à 11h30 et à 14h30)

**IV.8. Variation temporelles de la température des différents composants du capteur (orientation vers le sud)**

Les figures (IV.11-12-13) représentent la variation temporelle de température des différents composants de capteur avec des débits (30l/h, 40l/h, 60l/h) où le capteur est dirigée vers le sud. Nous notons que la température des différents composants de capteur augmente avec l'augmentation de température de l'ambiante qui atteindrent sa valeur maximum à midi de jour où le rayonnement de soleil est perpendiculaire à la surface de la terre puis commencée à diminuer.

date		18-04-2017						
Orientation		vers le sud						
ciel		clair						
Temps (h)	Débit (L/h)	Tamb (°C)	Te (°C)	Ts (°C)	Tv,ext (°C)	Tv,int (°C)	Tab (°C)	Angle d'inclinaison $\beta$
8 :30	30	23.2	22.3	30.1	34.3	43.3	53.2	35
9 :30	30	25.9	23.4	34.9	40.1	47.9	60.4	35
10 :30	30	29.4	24.4	35.9	45.0	50.1	66.3	35
11 :30	30	33.1	25.0	38.3	47.2	55.9	69.2	35
12 :30	30	36.4	29.6	40.9	52.3	60.7	72.5	35
13 :30	30	38.0	30.2	44.2	55.4	62.6	76.7	35
14 :30	30	35.7	31.3	42.8	52.2	60.2	70.5	35
15 :30	30	33.5	28.5	40.8	49.1	55.1	65.1	35

Tableau(IV.5) : résultat expérimentale pour orientation vers le sud et débit 30L/h.

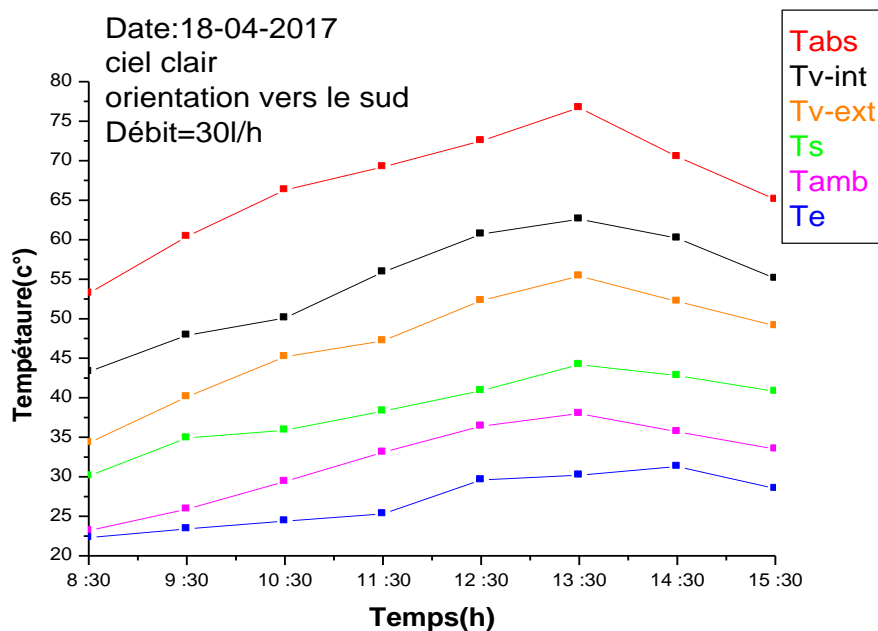


Figure (IV.11) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (Orientation vers le sud) à débit30l/h.

date		19-04-2017						
Orientation		Vers le sud						
ciel		clair						
Temps (h)	Débit (L/h)	Tamb (c°)	Te (c°)	Ts (c°)	Tv,ext (c°)	Tv ,int (c°)	Tabs (c°)	Angle d'inclinaison $\beta$
8 :30	40	17.4	14.2	24.6	27.3	36.7	42.2	35
9 :30	40	18.4	16.7	27.8	35.8	41.3	50.3	35
10 :30	40	23.5	17.3	32.8	44.1	54.2	64.2	35
11 :30	40	24.8	19.5	39.8	49.1	61.1	68.8	35
12 :30	40	30.6	22.4	44.0	54.8	67.0	75.2	35
13 :30	40	24.9	19.8	42.1	47.9	63.0	69.2	35
14 :30	40	24.1	18.2	38.6	41.7	56.6	64.2	35
15 :30	40	23.2	17.9	34.9	36.1	43.8	54.7	35

Tableau(IV.6) : résultat expérimentale pour orientation vers le sud et débit 40L/h.

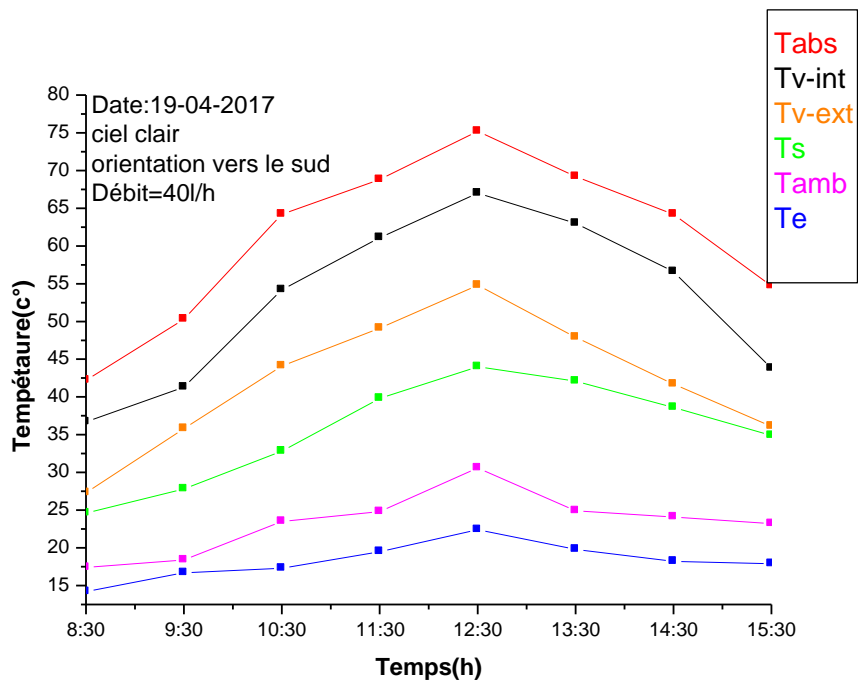


Figure (IV.12) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (Orientation vers le sud) à débit 40l/h.

date		22-04-2017						
direction		Vers le sud						
ciel		clair						
Temps (h)	Débit (L/h)	Tamb (c°)	Te (c°)	Ts (c°)	Tv,ext (c°)	Tv ,int (c°)	Tabs (c°)	Angle d'inclinaison $\beta$
8 :30	60	23.5	22.8	32.7	37.5	41.4	49.3	35
9 :30	60	27.2	23.1	39.0	44.2	47.1	56.2	35
10 :30	60	28.0	23.9	41.8	47.7	59.0	66.4	35
11 :30	60	29.0	24.3	44.1	49.8	65.2	77.1	35
12 :30	60	30.0	25.0	45.8	51.5	69.4	72.7	35
13 :30	60	35.1	27.4	47.1	52.3	57.9	67.9	35
14 :30	60	33.7	26.6	42.7	50.7	50.9	62.1	35
15 :30	60	31.2	25.6	38.4	45.5	48.5	56.1	35

Tableau(IV.7) : résultat expérimentale pour orientation vers le sud et débit 60L/h.

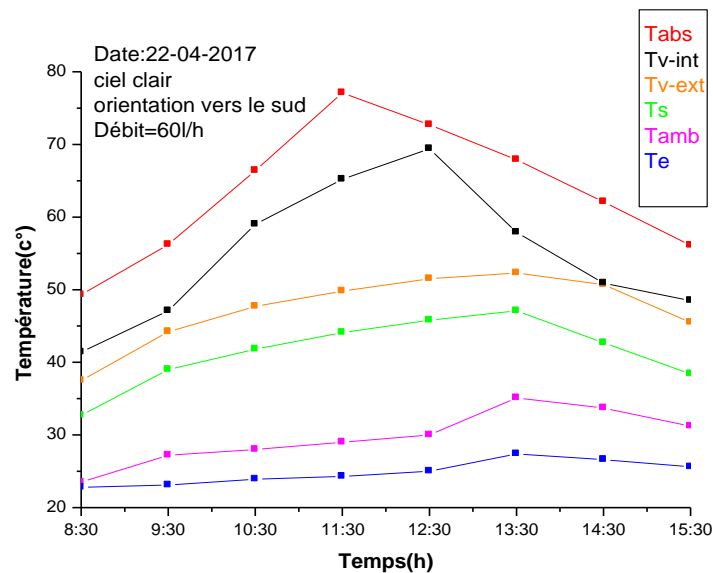
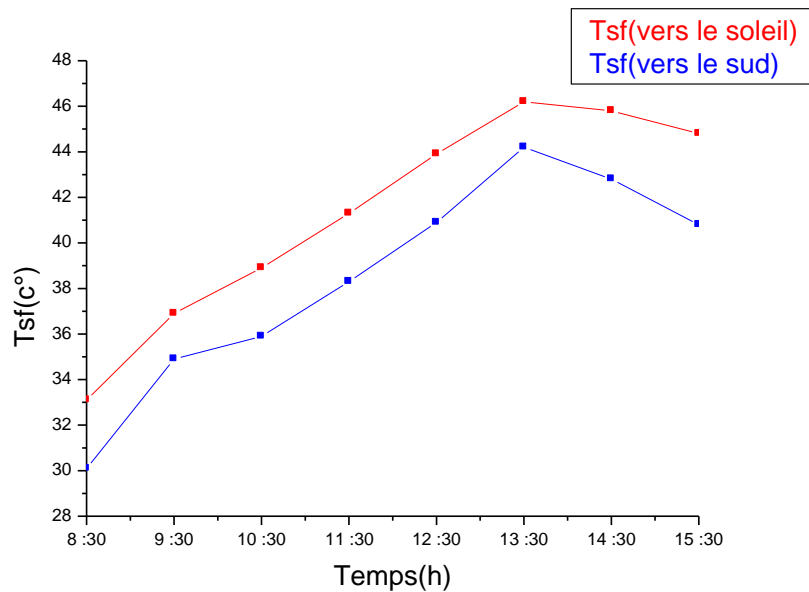


Figure (IV.13) : Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur. (Orientation vers le sud) à débit 60l/h.

### IV.9. comparaison de température de sortie de l'eau à l'état au le capteur est dirigée vers le soleil et vers le sud

La figure (IV.14) représente les variations de la température de sortie du fluide caloporteur. L'allure des courbes illustre que la température de sortie d'eau est plus élevée dans le cas où le capteur est orienté directement vers le soleil par rapport à la situation dans laquelle la direction d'un capteur fixe est vers le sud. Ceci parce que dans ce cas la quantité de rayonnement solaire capté par le capteur est très importante durant tous le temps.

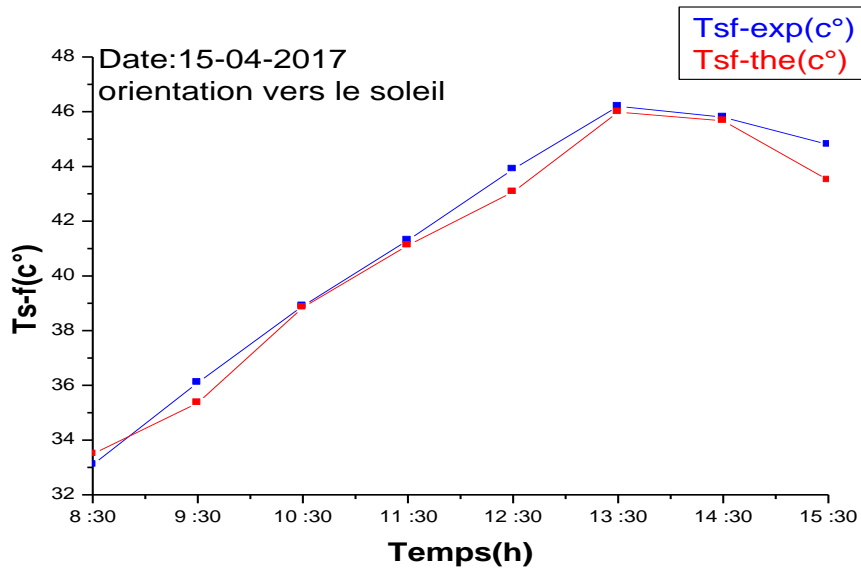


**Figure(IV.14)** : Evolution temporelle des températures de sortie de l'eau pour des différentes orientations du capteur. (Orientation vers le soleil et vers le sud)

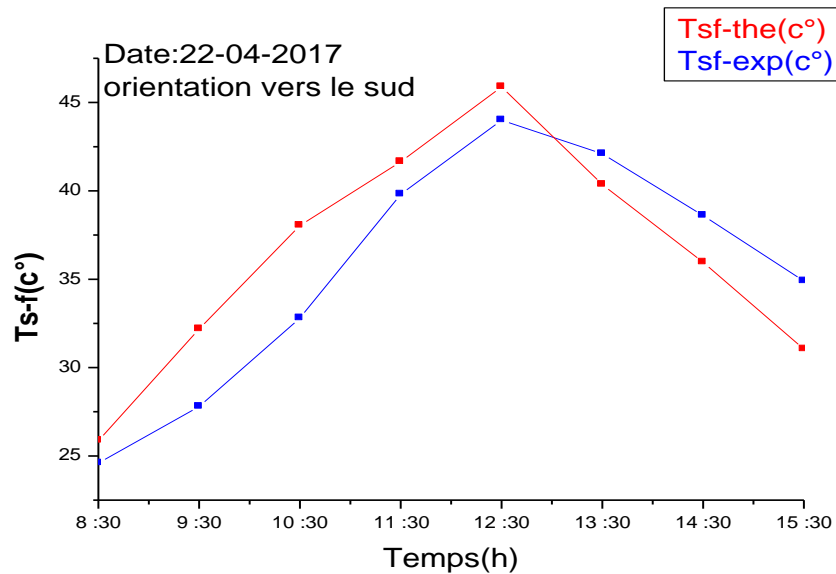
**IV.10. Comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques**

Dans cette partie, nous avons présenté une étude comparative entre nos résultats obtenus expérimentalement et à celle avec des résultats obtenus numérique à l'aide d'un notre code de calcul qui a été effectué en langage Fortran.

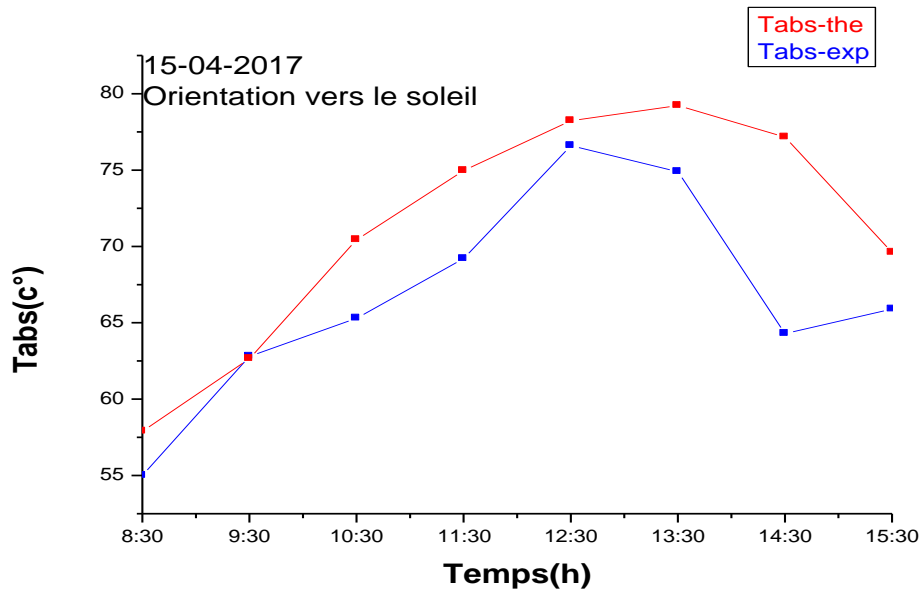
L'allures des courbes ( Fig. IV. 15 à 20) des différentes températures théorique et expérimentale de chaque composantes du capteur en fonction du temps et pour des différentes orientations montrent une concordance entre les valeurs mesurées et celles obtenues par simulation numérique à part quelques écarts de température est dû principalement aux pertes thermique et des erreurs induites par le calcul numérique et des variations environnementale ainsi que dans les mesures expérimentales.



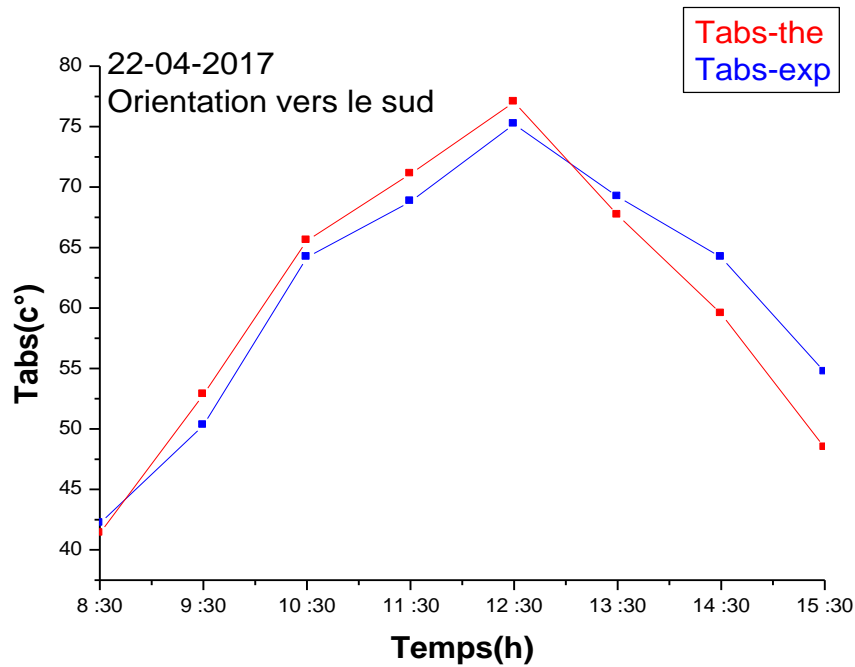
Figures (IV.15) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de sortie de fluide caloporteur à orientation vers le soleil



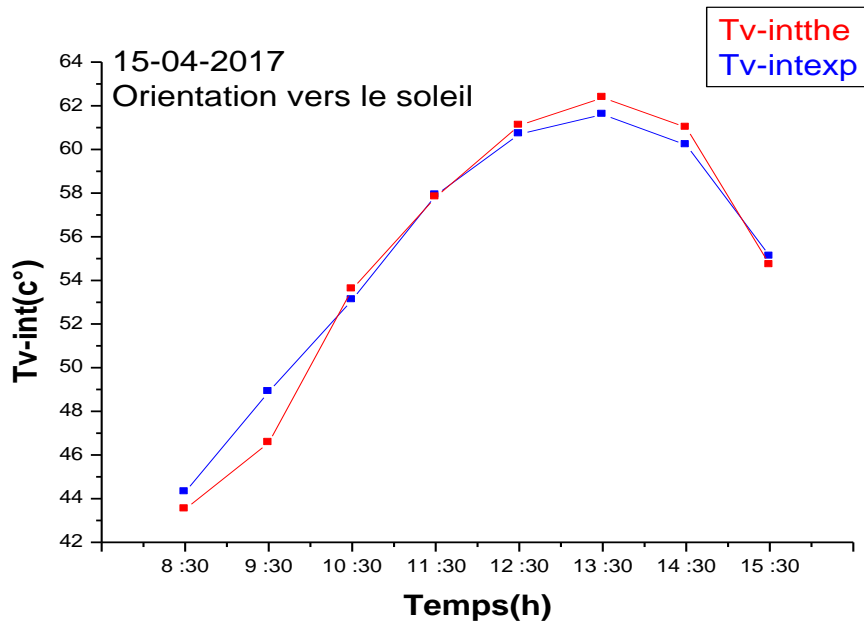
Figures (IV.16) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de sortie de fluide caloporteur à orientation vers le sud



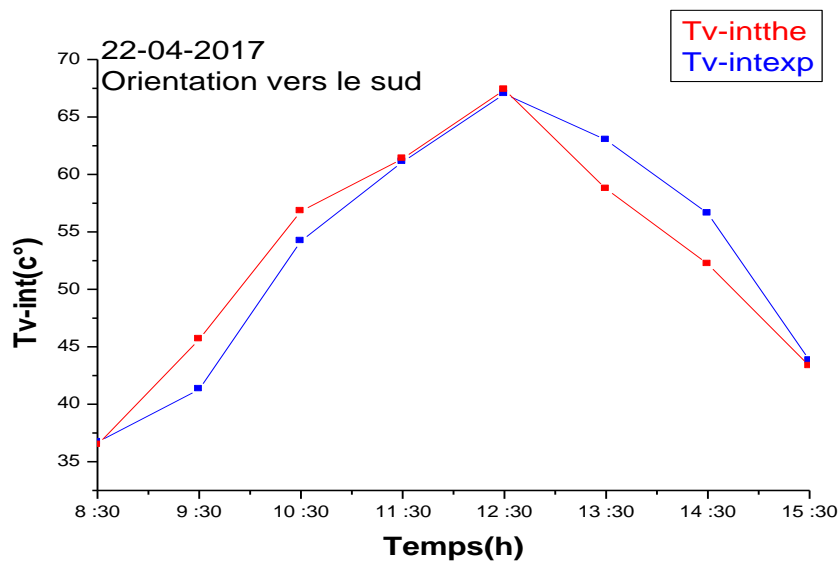
Figures (IV.17) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de l'absorbeur à orientation vers le soleil



Figures (IV.18) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de l'absorbeur (orientation vers le sud)



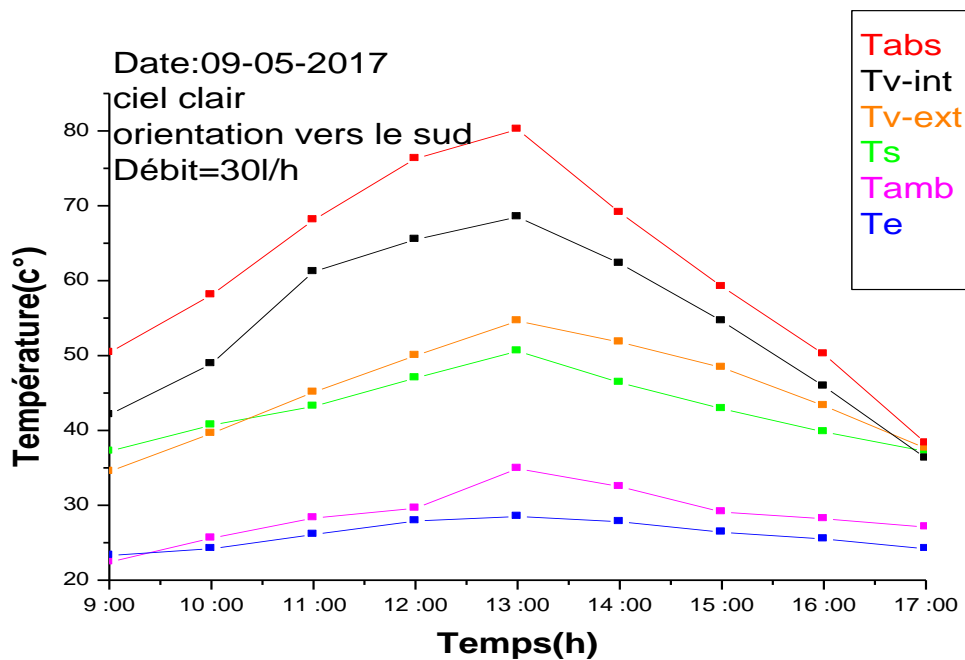
Figures (IV.19) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de vitre intérieure (orientation vers le soleil).



Figure(IV.20) : Comparaison de la température théorique et expérimentale de vitre intérieure (orientation vers le sud)

#### IV.11. variation des températures pendant le mois de Mai (Nj=125)

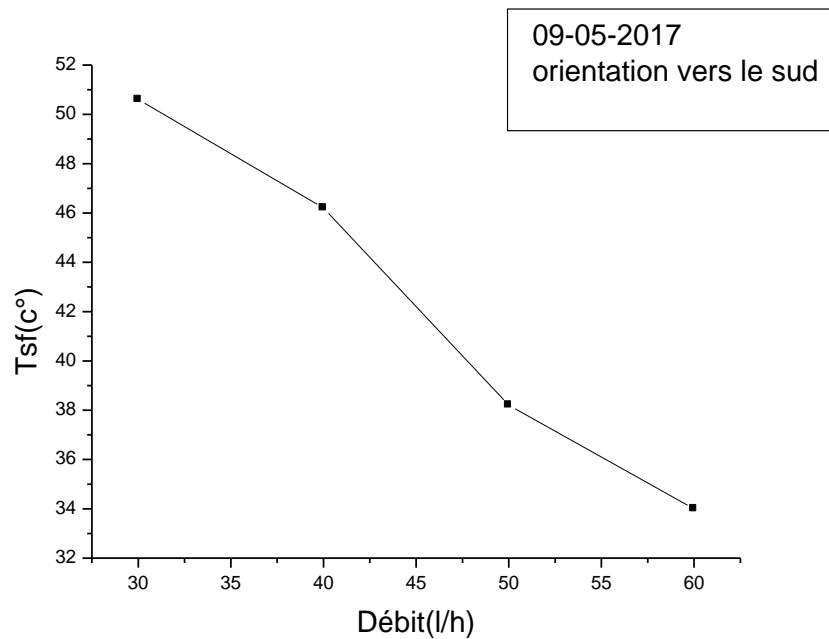
Afin de connaître l'efficacité de notre capteur durant quelques jours dans l'année, nous avons effectué des quelques test pendant le moi de Mai (9.5.2017). Les résultats présentés dans le Fig. (IV.21) montrent que les températures de différentes composantes du capteur sont plus importantes à ceux pendant le moi d'Avril et cela est dû à l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire.



**Figure (IV.21) :** Evolution temporelle des températures du capteur. (Orientation vers le sud) mois de Mai (Nj=125)

**IV.12.Effet de débit sur la température de sortie**

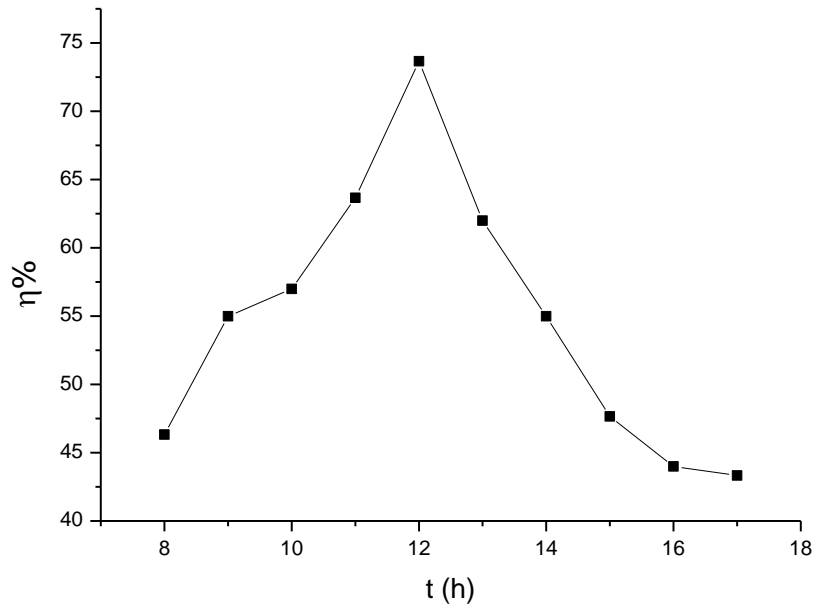
La figure (IV.22) montre l'évolution de température de sortie du fluide caloporteur (eau) en fonction des différents débits de sortie de 30 l/h jusqu'à 60 l/h. La température de sortie du fluide caloporteur diminuée avec l'augmentation du débit. On note que ces valeurs de températures ont été enregistrées entre 13h en intercalant 5 minutes entre chaque mesure.



**Figure (IV.22) :** Evolution des températures de sortie de l'eau en fonction de débit

**IV.13. Le rendement thermique horaire :**

La figure (IV.23) représente la variation temporelle de rendement thermique de capteur .On remarque que le rendement de capteur augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire jusqu'à atteindre le valeur maximale 72% entre 12het 13h puis commence à diminuer jusqu'à atteindre la valeur 47% vers 17h .



**Figure (IV.23) :** rendement thermique horaire

## CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude d'un capteur solaire plan à chauffe-eau pour notre étude expérimentale et numérique. Ce capteur d'une dimension de (1.02m x 0.75 m) a été réalisé par nous même et l'étude expérimentale a été effectuée dans la ville de Boussaâda.

On a fait des recherches bibliographiques sur les capteurs solaires, les différents types de transfert thermique on permet de mettre en évidence la nature des échanges de chaleur qui interviennent dans la présente étude. Cette étude permet de suivre l'évolution de la température des différents constituants du capteur soumis à l'ensoleillement journalier.

Concernant la partie théorique, nous établirons un rappel théorique sur les différentes équations qui caractérisent les chauffe-eau solaires et la modélisation en régime permanent pour l'évaluation des températures des différents constituants du capteur. La complexité des équations du système nous impose d'adopter une résolution numérique. Pour cela, nous avons élaboré un code de calcul écrit en langage fortran, ce modèle numérique permet de calculer l'évolution des composants du rayonnement solaire et de la température des différents éléments du système.

La température de la plaque absorbante (absorbeur) est la plus élevée. Ceci peut être justifié par son pouvoir d'absorption qui est important pour le rayonnement solaire. La modélisation mathématique basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées au capteur.

Les résultats permettent de découvrir les profils de température de l'absorbeur, le vitrage et le fluide caloporteur.

### **Les résultats expérimentaux et numériques obtenu montrent que :**

- l'orientation du capteur vers le soleil directe assure un maximum de puissance solaire et donc un meilleur rendement que l'orientation vers le sud ;
- L'angle d'inclinaison optimale du capteur doit être fixé à latitude du lieu pour obtenir un meilleur rendement ;
- La puissance solaire globale, la température de sortie de l'eau et la température de vitre intérieure passent par un maximum vers 13h au site de Bou Saâda;
- la température de sortie maximale obtenu durant notre expérience est dans les environs de 50 C° avec un débit de 40 l/h..
- l'augmentation de débit de l'eau diminue la température de sortie;
- le rendement théorique maximal de notre capteur est dans les environs de 70%.

- Les résultats numériques obtenus sont conformes aux résultats expérimentaux notamment dans les conditions où le ciel est clair, ce qui montre que notre code de calcul est valable.
- En fin, et pour être ce modèle appliqué dans l'utilisation domestique, il doit être avoir une grande dimension et l'absorbeur a une bonne conductivité thermique comme le cuivre pour assurer l'absorption d'une grande quantité d'énergie solaire.

## Annexe

### Annexes

Les propriétés thermophysiques des matériaux pouvant constitués la plaque absorbante d'un capteur solaire plan sont récapitulées dans le tableau 1.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/kg.K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09
Acier inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04

**Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques des matériaux métalliques.**

Support et traitement	Absorptivité de la surface	Emissivité de la surface	Effet de l'humidité
Acier et nickel noir sur nickel	0.95	0.07	Variable
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09	Sans effet
Acier et chrome noir	0.91	0.07	Oxydation rapide
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14	Peu d'effet
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16	Couche sélective pèle rapidement
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15	/
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08	Peu d'effet
Aluminium et oxyde de manganèse	0.70	0.08	/
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0.90	0.16	Peu d'effet
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.2	Peu d'effet

**Tableau.2:** Les différentes surfaces sélectives et leurs propriétés optiques [26].

## Annexe

Matériau	Epaisseur (mm)	Transmissivité (%)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)
Verre à vitre	3	85-92	2700	840	0.93
Polycarbonate	3.2	82-89	1200	1260	0.2
Polyméthacrylate	3.2	89-92	1200	1460	0.2
Polyster armé	1	77-90	1400	1050	0.21
Polyfluoroéthyle propylène	0.05	97	2.51	1170	0.25
Polyfluorure vinyle	0.1	93	1.5	1380	0.12

**Tableau. 3 :** Propriétés optique et thermique des différentes surfaces transparentes

Matériau	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Béton	20	0.93
Glace lisse	0	0.97
Fer poncé	20	0.24
Verre	90	0.94
Cuivre légèrement ternis	20	0.04
Cuivre Oxydé	130	0.76
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

**Tableau 4 :** Emissivité de quelques matériaux

## Annexe

---

Les différents matériaux pouvant servir d'isolant ainsi que leurs propriétés thermiques [25] sont récapitulés dans le tableau 5.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (J/kg.K)	Diffusivité thermique 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
Air à 20°C	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyurethane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine de roche	0.04	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47
Feutre d'amiante	0.047	116	800	5.1
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9
Perlite	0.048	60	840	9.5
Silicate de calcium	0.052	200	920	2.8
Magnésie	0.055	200	880	3.1
Béton cellulaire	0.075	280	800	3.3
Vermiculite	0.09	80	880	12.8

Tableau 5 : Propriétés thermiques des matériaux qui servent d'isolant

## References:

- [1] **A, Guedira; A, Benallou.** Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc, Revue des Energies Renouvelables, journées de thermique, p 79-84. (2001).
- [2] **N, Bellel.** Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; thèse de magistère, Université de Constantine, (1989).
- [3] **A, Labed; N, Moummi; K, Aoués; M, Zellouf; A, Moummi.** Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561. (2009).
- [4] **U, Eiker.** Solar technologies for buildings, John Wiley sans Sons, England. (2001).
- [5] **Nadjem Rabiha,** Rendement d'un capteur solaire à simple vitrage et à double vitrage " étude et comparaison " thèse de magister en génie climatique, Univ.de Constantine(2004).
- [6] **J, Bernard.** Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [7] **C, Fröhlich.** 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [8] [bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/Gherib\\_Lazhar.pdf](http://bu.univ-ouargla.dz/master/pdf/Gherib_Lazhar.pdf) ? id mémoire(1934).
- [9] **K. Salima.** "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009).
- [10] **D. Ababsa.** Optimisation du rendement d'un capteur Solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de Magistère, la faculté des sciences-département de physique de Batna, (2010).
- [11] **Ferdjani Ahmed Taha,** Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans>> Mémoire de magister de l'Université Mohamed Khider – Biskra (07/02/2013).
- [12] **Mejdoub Amine Khodja.** Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine, (2004).
- [13] <http://www.climamaison.com/lexique/panneau-solaire.ht>
- [14] [http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Capteur\\_solaire\\_plan](http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Capteur_solaire_plan).
- [15] **A, Sfeir ; G, Guarracino.** Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [16][http://www.solairethermique.guidenr.fr/I\\_rendement-capteur-solaire-thermiquemethode-francaise.php](http://www.solairethermique.guidenr.fr/I_rendement-capteur-solaire-thermiquemethode-francaise.php)
- [17] **D, K, Edwards.** Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [18] **R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz.** Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [19]<http://docplayer.fr/20048053-Universite-mentouri-de-constantine-faculte-des-sciences-exactes-departement-de-physique-memoire.html>
- [20] **A, Degionanni.** Techniques de l'ingénieur, conduction, BE8200. (1981).
- [21] **M, E, A, Bekkouche.** Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires; thèse de doctorat, Université de Tlemcen. (2009).
- [22] **SAADI SOUAD,** effet des paramètres opérationnels sur les performances

d'un capteur solaire plan; thèse de magistère en physique, Université de Constantine. (2010).

[23] **Mr S.BEKKOUCHE.** Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires. Option « Electronique et Modélisation » . Thèse doctorat. l'université Abou-bakr- Belkaid – Tlemcen. (2008).

[24] **DeWitt, David P.** (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6<sup>th</sup> Ed.). Hoboken: Wiley.pp.490, 515. ISBN 978-0-471- 45728-2.

[25] **Z. Sen.** Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).

[26] **S. A. Hakem, N. Kasbadji-Merzouk, M. Merzouk.** Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Energies Renouvelables, p 153-162. (2008).

## **Résumé**

*Dans le cadre de notre travail, nous avons présenté une étude expérimentale et numérique d'un capteur plan à chauffe-eau solaire. L'étude expérimentale a été réalisée dans la ville de Boussaâda.*

*L'étude théorique a permis d'établir les différentes équations qui caractérisent le capteur solaire. La résolution numérique du modèle a été effectuée à l'aide d'un code de calcul écrit en langage fortran. La comparaison des valeurs calculées de l'éclairement solaire et de température de différents composants du capteur et de sortie de l'eau avec les résultats expérimentales, nous a permis de valider notre modèle de calcul proposé.*

## **Summary**

*In this present work, we present an experimental and numerical study of a flat solar collector with a solar water heater. The experimental study was designed in the city of Boussaâda.*

*The theoretical study made it possible to establish the different equations that characterize the solar collectors. The numerical resolution of the model was carried out using a calculation code written in FORTRAN language. The comparison of the calculated values of the illumination Solar and temperature of different collector components and water outlet with experimental results enabled us to validate our proposed calculation model.*

**MOTS CLES :** Capteur solaire, chauffe-eau, énergie solaire, gisement solaire

## **ملخص**

أثناء هذا العمل، قمنا بدراسة تجريبية وعددية للوح مستوي لتسخين المياه بالطاقة الشمسية. ولقد تمت هذه الدراسة التجريبية في مدينة بوسعادة.

وقد مكنت الدراسة النظرية من وضع المعادلات المختلفة التي تميز المجمعات الشمسية. تم تنفيذ الحل العددي للنموذج باستخدام رمز حساب مكتوب بلغة فورتران.

المقارنة بين القيم المحسوبة لاستطاعة الأشعة الشمسية ودرجة حرارة المكونات الاستشعار المختلفة و درجة حرارة خروج الماء الساخن مع النتائج التجريبية مكنتنا من التحقق من صحة نموذج الحساب المقترح لدينا.