

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

## **Etude d'un capteur hybride thermique photovoltaïque**

**Présenté par :**

**M elle Helali Saadia**

**M elle Meftah Kheira Halima**

**M elle Messaoudi Sarah**

**Soutenu publiquement le : 21/05/2017, devant le jury :**

<b>M .BADAOUI Abdelhamid</b>	MAA	CU Naama	Président
<b>M. AIDAOUI Abdelghani</b>	Pr	CU Naama	Encadreur
<b>M. TAIBI Brahime</b>	Magistère	CU Naama	Co- Encadreur
<b>M. ZIANI Zakaria</b>	M.CB	CU Naama	Examineur
<b>M .BRAHIMI Mohamed</b>	Magistère	CU Naama	Invité

**Année universitaire 2016-2017**



## *« Remerciements »*

*Nous remercions avant tout ALLAH  
le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience qui nous ont  
permis d'accomplir ce petit et modeste travail.*

*Au cours de ce travail, nous étions encadré par  
Monsieur **AIDAOU ABDELGHANI**, nous tenons à le remercier  
Pour avoir accepté d'être le directeur de ce mémoire.*

*Nous exprimons nos sincères remerciements  
à monsieur le Co-encadreur **TAIBI BRAHIM**  
Pour ses encouragements, et ses conseils précieux  
Tout le long du travail, et de nous avoir facilité la tâche.*

*Nous adressons nos remerciements  
Les plus vifs aux membres du jury  
Qui ont pris sur leur temps et aménagé leur volonté pour examiner et porter  
une analyse critique  
Sur notre travail, sans oublier les ingénieurs  
Du laboratoire qui nous ont aidé .*

*Enfin à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près, ainsi nos  
familles pour leur soutien.*



# *Dédicaces*

*Au nom de Dieu le clément et le Miséricordieux et en termes d'amour et de fidélité, je dédie ce présent mémoire :*

*Aux deux êtres les plus précieux au monde*

*Ma MERE et mon PERE*

*QUE DIEU LES PROTEGE*

*A ma SCEUR IMANE et ma belle- SCEUR IMANE et mes FRERES*

*Mohammed Taïa et le généreux Ayoub qui a une grande*

*main dans cette mémoire*

*A mon petit neveu Mohammed RAYANE*

*A mes deux familles*

*Helali et saad*

*Pour leur affection, leur soutien et leur compréhension qu'ils m'ont prodigués durant toutes ces années de dur labeur*

*A tous mes camarades de la promotion 2016/2017.*

*HELALI SAADIA*

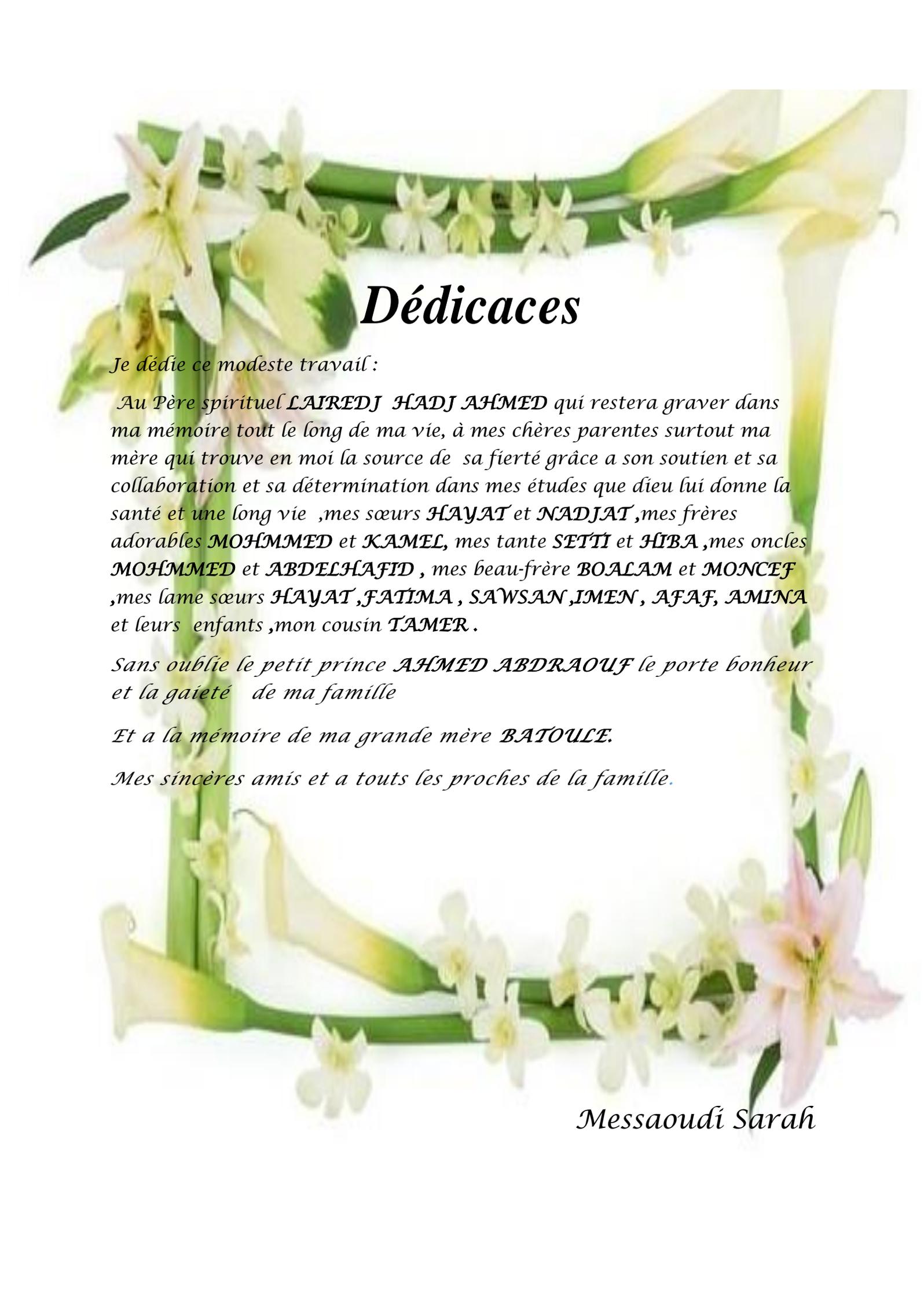


# *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

- ❖ *Mes chers parents **ma Mère et mon Père**, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour. L'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne Vaut les efforts fournis jour et nuit, pour mon éducation et mon bien être.*
- ❖ *Mes Frères **Zakaria, Zinedine et Hamza**, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection, que je porte pour vous. Vous êtes mes anges gardiens et mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse.*
- ❖ *Ma Sœurs tu es présente dans tous mes moments, par ton soutien moral et tes belles surprises sucrées, sans oublier le petit poussin Mohamed que j'adore et je chérisse.*
- ❖ *Ma Belle Famille **HADJADJ** et la famille **ZIANE**, qui m'ont donné le temps et le courage pour terminer mes études. En témoignage de L'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous, je vous dédie ce travail, avec mes vœux de bonheur, de santé et de longue vie.*
- ❖ *Mes camarades qui m'ont soutenu et aidé.*

*Meftah khira halima*

A decorative border of white and pink flowers, including lilies and smaller blossoms, frames the text. The flowers are arranged in a rectangular shape around the central text.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Au Père spirituel LAÏREDJ HADJ AHMED qui restera graver dans ma mémoire tout le long de ma vie, à mes chères parentes surtout ma mère qui trouve en moi la source de sa fierté grâce a son soutien et sa collaboration et sa détermination dans mes études que dieu lui donne la santé et une long vie ,mes sœurs HAYAT et NADJAT ,mes frères adorables MOHAMMED et KAMEL, mes tante SETTI et HIBA ,mes oncles MOHAMMED et ABDELHAFID , mes beau-frère BOALAM et MONCEF ,mes lame sœurs HAYAT ,FATIMA , SAWSAN ,IMEN , AFAF, AMINA et leurs enfants ,mon cousin TAMER .*

*Sans oublie le petit prince AHMED ABDRAOUF le porte bonheur et la gaieté de ma famille*

*Et a la mémoire de ma grande mère BATOULE.*

*Mes sincères amis et a touts les proches de la famille.*

*Messaoudi Sarah*

# Sommaire

---

## Sommaire :

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....11

### Chapitre I : Le gisement solaire

I-1. Introduction.....12

I-2. Soleil .....13

I-3. Aspects géométriques.....14

I-3-1. Mouvement de la terre autour de soleil.....14

I-3-2. Mouvement apparent du soleil.....16

I-3-3. Heures et temps.....17

I-4. Aspects énergétiques.....19

I-4-1. L'atmosphère terrestre.....19

I-4-2. Masse d'air.....21

I-5. Conclusion.....21

### Chapitre II : Généralités sur les transferts thermiques

II-1. Introduction.....22

II-2. Transfert par conduction.....23

II-3. Transfert par convection.....26

II-3-1. Convection libre ou naturelle.....27

II-3-2. Convection forcée.....27

II-3-3. Convection mixte.....27

II-3-3-a. Estimation du coefficient d'échange convectif.....27

II-3-3-b. les nombres adimensionnels .....28

II-3-3-c. évaluation du coefficient d'échange par convection.....31

II-4. Transfert par rayonnement.....32

II-5. Conclusion.....33

# Sommaire

---

## Chapitre III

### Modélisation et simulation des résultats d'un capteur solaire PVT

III-1. Introduction.....	34
III-2. Modélisations du système PVT.....	35
III-3. Bilans thermiques et calcul de rendement .....	36
III-4. Modélisations des échanges thermiques dans un capteur solaire.....	37
III-5. Méthodes par tranche.....	37
III-6. Les échanges d'un capteur solaire plan à air.....	40
III-6-1. Les échanges radiatifs.....	40
III-6-1-1. Échanges radiatifs entre les vitrages et la voûte céleste .....	40
III-6-1-2. Échanges radiatifs entre la vitre et l'absorbeur.....	40
III-6-1-3. Échanges radiatifs entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium sur l'isolant..	41
III-6-2. Les échanges convectifs.....	41
III-6-2-1. Échanges convectifs entre le capteur et le milieu environnant.....	41
III-6-2-2. Échanges convectifs entre l'absorbeur et la vitre.....	41
III-6-2-3. Échanges convectifs dans la lame d'air mobile.....	42
III-7. Rendements thermiques du capteur solaire plan $\eta$ .....	44
III-8. Conclusion.....	44

## Chapitre IV : Résultats et discussion

IV-1. Introduction.....	45
IV-2. L'effet photovoltaïque.....	46
IV-3. La production de puissance électrique et caractéristique I-V.....	46
IV-4. L'effet du rayonnement global sur les températures .....	48
IV-5. Conclusion.....	49
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>50</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>51</b>

## Liste des symboles

---

### Liste des symboles :

---

---

Nu : Nombre de Nusselt.

Pr : Nombre de Prandlt.

PVT : Photovoltaïque thermique.

Re : Nombre de Reynolds.

T : Température [K].

$\varepsilon$ :Emissivité.

$I_0 = 1367$  : Constante solaire  $W. m^{-2}$ .

$I_{global}$  : Flux de rayonnement solaire reçu par unité de surface.  $m^{-2}$

TSM : Temps solaire moyen (heure (h))

TSV : Temps solaire vrai (heure(h))

TU : Temps universel (heure (h))

L : Latitude (degrés)

$\lambda$  : Longitude (Degrés)

$\delta$  : Déclinaison

$\omega$  : Angle horaire.

A : Absorbeur

C : Ciel

R : rayonnement.

$p_{Max}$  : La puissance maximale.

$V_{Max}$  : La tension maximale.

## Liste des symboles

---

$I_{Max}$  : Courant maximale.

FF : facteur de forme

$\eta$  : Rendement.

---

---

# Liste des figures

---

## Liste des figures :

---

<b>Figure I -1</b> : Flux reçu sur la terre.....	13
<b>Figure I -2</b> : Spectre solaire.....	14
<b>Figure I -3</b> : Schématisation des mouvements de la terre autour de soleil .....	15
<b>Figure I -4</b> : Mouvement apparent du soleil observé d'un point de latitude L.....	17
<b>Figure I -5</b> : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.....	18
<b>Figure I -6</b> : Répartition spectrale du rayonnement solaire du sol terrestre.....	20
<b>Figure I -7</b> : Spectre du rayonnement atmosphérique.....	20
<b>Figure II -1</b> : Schéma de transfert de chaleur par conduction.....	24
<b>Figure II -2</b> : Schéma de transfert de chaleur convectif.....	27
<b>Figure II -3</b> : Schéma de transfert de chaleur par rayonnement.....	32
<b>Figure III -1</b> : schéma d'un capteur solaire hybride.....	35
<b>Figure III -2</b> :schéma par analogie électrique du PVT.....	35
<b>Figure IV -1</b> : la variation du courant en fonction de l'intention.....	46
<b>Figure IV -2</b> : la variation de la puissance électrique en fonction de l'intention.....	47
<b>Figure IV -3</b> : la variation de température de l'absorbeur et le fluide caloporteur en fonction de l'éclairement.....	48
<b>Figure IV -4</b> : la variation de rendement en fonction de l'éclairement.....	49

## Liste des tableaux

---

### LISTE DES TABLEAUX :

---

---

<b>Tableau(II.1)</b> : Conductivités thermiques de quelques matériaux. ....	25
<b>Tableau (II.2)</b> : Prandtl de quelques gaz.....	29
<b>Tableau (II.3)</b> : Prandtl de quelques liquides.....	30
<b>Tableau (II.4)</b> : facteur d'émissivité des matériaux courants.....	33
<b>Tableau (IV.1)</b> : les performances d'un capteur solaire.....	47

---

---

# Introduction générale

L'énergie solaire est la source la plus importante d'énergie renouvelable, pour cela l'exploitation de l'énergie solaire en Algérie est un grand axe de recherche qui connaît de considérable développement cette dernière décennie.

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire : le solaire photovoltaïque qui transforme directement le rayonnement en électricité ; le solaire thermique qui transforme directement le rayonnement en chaleur.

La composante la plus importante et la plus coûteuse d'un système solaire actif de l'énergie est le capteur solaire, il est un dispositif qui capte l'énergie solaire rayonnante et la convertit en énergie utile.

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à l'étude et l'amélioration de la performance des capteurs solaires. Des nombreuses innovations techniques permettent d'augmenter le rendement des panneaux thermiques et hybride PVT, telles que, diminuer les pertes thermiques par l'utilisation des tubes transparents "sous vide", amélioration des échanges thermiques par des assemblages tubes-ailettes, l'ajout des systèmes de concentration du rayonnement solaire sur les capteurs solaires et aussi permet d'obtenir des très grandes performances.

Le présent travail comporte quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Une étude théorique des différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur feront l'objet du troisième chapitre.
- Les principaux modèles et le bilan thermique sont illustrés dans le troisième chapitre.
- Les résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

# Chapitre I

## Le gisement solaire

### I.1. INTRODUCTION :

Jusqu'à preuve du contraire, de toutes les énergies renouvelables, l'énergie la plus dominante est **l'énergie solaire**. En plus, elle est une des plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité d'exploiter sans intermédiaire à une partir de ses besoins. La connaissance de la place du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. La trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée ainsi que les heures de son lever et de son coucher permettent d'évaluer certains aspects tels que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Dans cette partie nous allons définir certains aspects solaires à savoir :

- Les aspects géographiques.
- Les aspects énergétiques

## I-2. Le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est approximativement de 1 391 000 Km (100 fois celui de la Terre), et sa masse est de l'ordre de  $2.10^{27}$  tonnes [1].

Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent.

La valeur du flux de rayonnement solaire  $I_{globale}$  reçue par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil.

Sa valeur moyenne  $I_0$  est appelée constante solaire, et vaut  $1367 \text{ W.m}^{-2}$  [3]

En première approximation, on peut calculer la valeur de  $I_{globale}$  en fonction du Numéro du jour de l'année  $j$  par la relation :

$$I_{globale} = I_0 [1 + 0.034 \cos (0.984j - 2^0)] \quad (1.1)$$

Hors atmosphère, l'énergie moyenne journalière reçue par la Terre est approximativement égale à  $5,5 \text{ KWh.m}^{-2}$ . En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre. Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultra-violet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

Le rayonnement solaire au sol dépend par conséquent de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux et n'est Donc pas homogène sur toute la surface de la Terre (figure I.1).

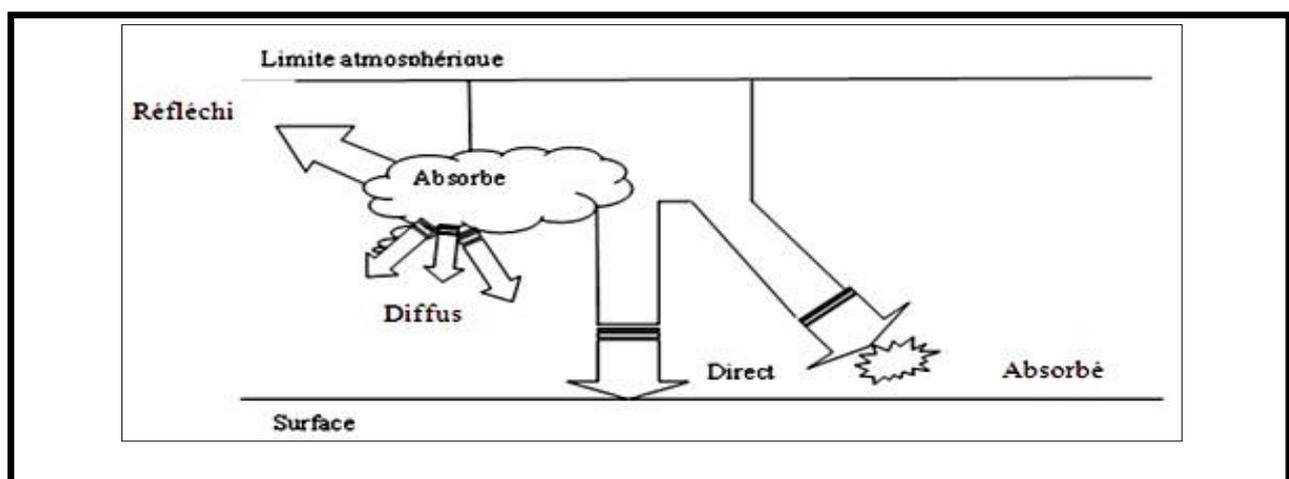
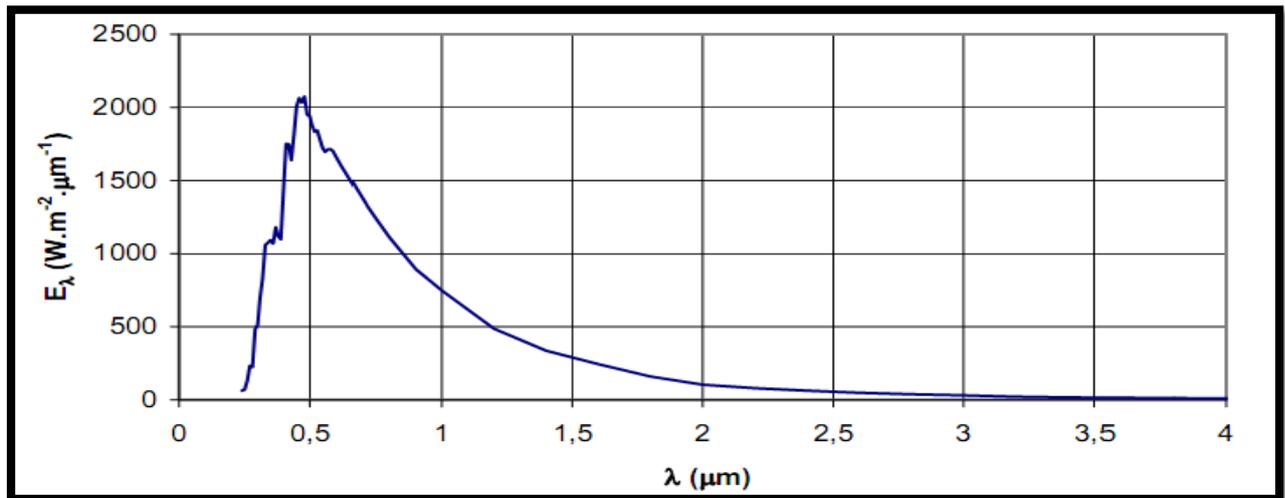


Figure I.1: Flux reçu sur la terre

La répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère est illustrée par la figure 1.2



**Figure I.2 : Spectre solaire**

98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à  $4 \mu\text{m}$ . En première approximation, le rayonnement solaire peut être assimilé au rayonnement d'un corps noir à une température de  $5777\text{K}$ .

### I-3. Aspects géométriques:

Nous allons nous intéresser dans ce qui suit aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la Terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction fixée. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire.

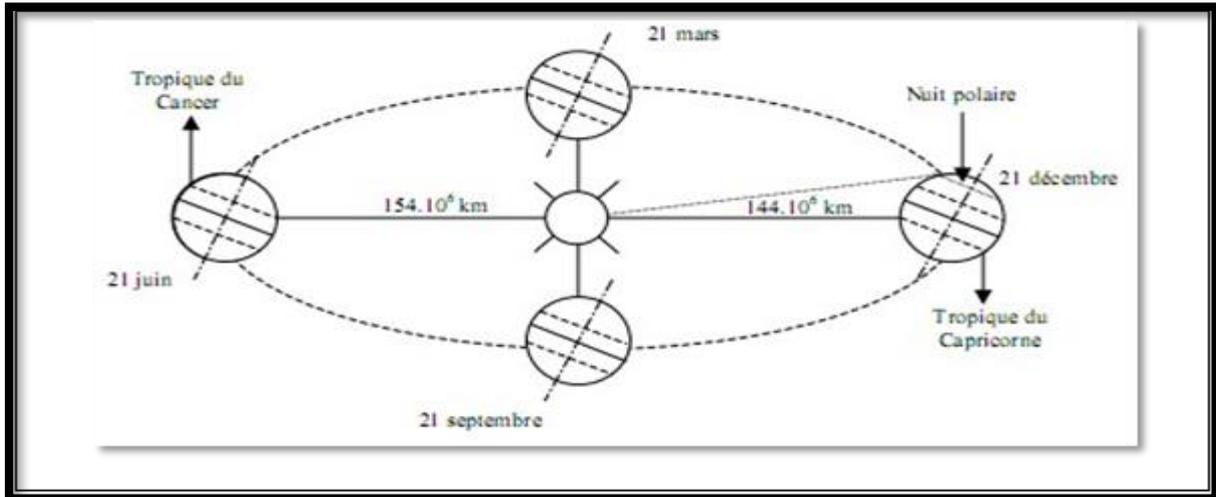
#### I-3.1. Mouvement de la terre autour de soleil:

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

L'excentricité de cette ellipse est faible, il en résulte que la distance Terre/Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $149\,675\,10^6\text{Km}$ .

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. 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, l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison qui vaut  $23^\circ 27'$ .

Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure I.3 [4].



**Figure I.3 : schématisation des mouvements de la terre autour de soleil**

### I.3.1.1 Constante solaire et correction de la distance Terre Soleil :

L'échelle des phénomènes mettant en œuvre l'énergie solaire à la surface de la Terre est donnée par la constante solaire. La mesure de celle-ci n'a été effectuée jusqu'à présent que depuis le sol, à l'aide d'instruments imparfaits.

La valeur la plus probable, actuellement retenue, est  $1367 \text{ W. m}^{-2}$  ( $\pm 6 \text{ W. m}^{-2}$ ) souvent arrondie à  $1367 \text{ W. m}^{-2}$ . Différentes formules de précision acceptable permettent de retrouver les valeurs de la constante solaire [3] :

$$I_c = 1370 \left( 1 - \frac{\sin(\delta)}{11,7} \right) \quad (1.2)$$

### I.3.1.2 Déclinaison du soleil:

La déclinaison  $\delta$  est l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial terrestre.

Elle varie au cours de l'année entre  $-23,45^\circ$  et  $+23,45^\circ$ . Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation [3] :

$$\delta = 23.45 \sin(0,986 j - 80) \quad (1.3)$$

$j$  : est le numéro d'ordre de jour dans l'année ( $1 \leq j \leq 365$  ou  $366$ ).

### I.3.1.3 Temps solaire moyen et temps universel :

La rotation régulière de la terre sur elle-même, autour de l'axe des pôles, détermine la succession des jours et des nuits. Une rotation complète de la terre ( $360^\circ$ ) correspondant à 24 heures, en moyenne : c'est la définition même de l'heure.

Compte tenu du sens de rotation de la terre, et en affectant du signe + les longitudes à l'est de la méridien origine, et du signe – les longitudes à l'ouest de ce même méridien, l'heure du passage du soleil au méridien correspondant à la longitude  $\lambda$ .

Ainsi, le soleil passe au méridien de tous les lieux de même longitude  $\lambda$  à l'heure TSM telle que :

$$\text{TSM} = 12 - \left(\frac{\lambda}{15}\right) \quad (1.4)$$

### I.3.1.4 Temps solaire vrai et angle horaire du soleil :

A la notion de temps solaire vrai TSV se rattache celle d'angle horaire du soleil  $\omega$  ; qui est l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Puisque cette trajectoire est uniformément décrite ( $360^\circ$ ) en 24 heures, l'angle horaire du soleil augmente de  $15^\circ$  par heure. La valeur  $0^\circ$  étant donnée au passage du soleil dans le plan méridien (midi solaire vrai = 12h TSV) ; l'angle horaire est compté négativement avant midi TSV, et positivement après-midi.

Pour un lieu de longitude  $\lambda$  donnée, il existe une correspondance directe entre le TSV et l'angle horaire  $\omega$  du soleil [3] :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (1.5)$$

Où  $\omega$  est mesuré en degrés et TSV en heures.

$\omega$  et  $\lambda$  sont exprimés en degrés ( $\lambda$  positif pour les longitudes est).

### I.3.2. Mouvement apparent du soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude  $L$  au nord de l'équateur est représenté sur la figure I.4 [4].

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à  $(L - d)$ . La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le

21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

Un jour a été divisé en 24h et l'heure solaire TS a été définie en fixant  $\text{TS} = 12\text{h}$  lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »).

La hauteur  $h$  du Soleil peut alors se déduire de la relation [4] :

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1.6)$$

Et l'azimut  $a$  par la relation :

$$\sin(a) = \cos(\delta) \sin \frac{\omega}{\cos(h)} \quad (1.7)$$

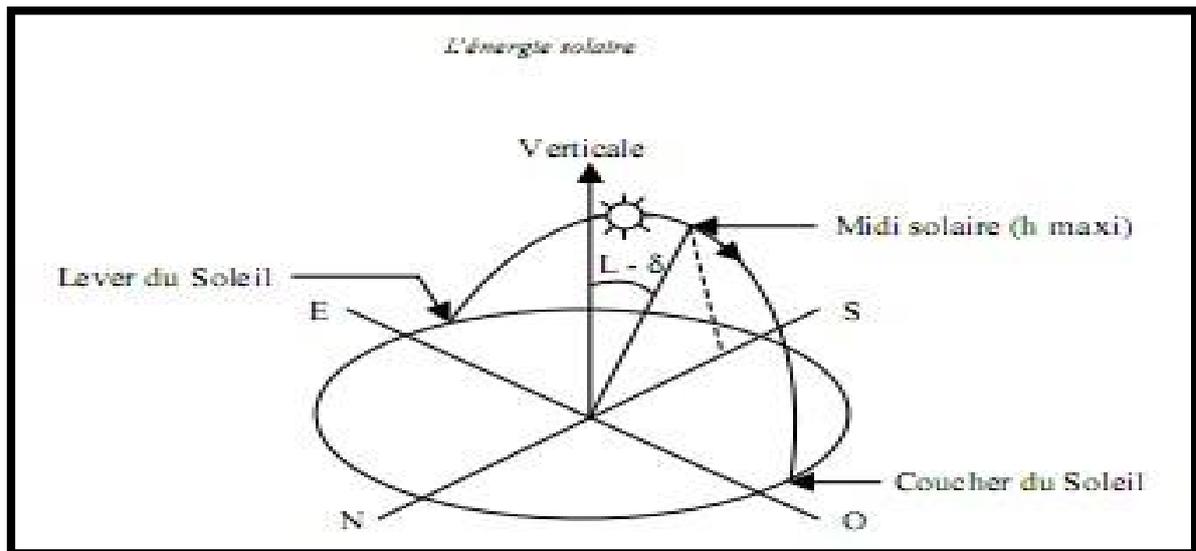


Figure I.4 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude  $L$  (1.4)

### I.3.3. Heures et temps :

#### I.3.3.1. Durée du jour :

Le module  $\omega_1$  de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant,  $\sin(h) = 0$  ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_1) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (1.8)$$

L'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur [4] :

$$(\text{TSV})_1 = 12 - \frac{\omega_1}{15} \quad (1.9)$$

L'angle horaire  $\omega_c$  au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, Nous avons donc  $\omega_1 = -\omega_c$  et la durée du jour vaut :

$$D = 2 \cdot \frac{\omega_1}{15} \quad (1.10)$$

#### I.3.3.2 Relation entre temps légal et temps solaire :

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel il se trouve soit [5] :

$$C = TL - TCF \quad (1.11)$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure I.5 [4].

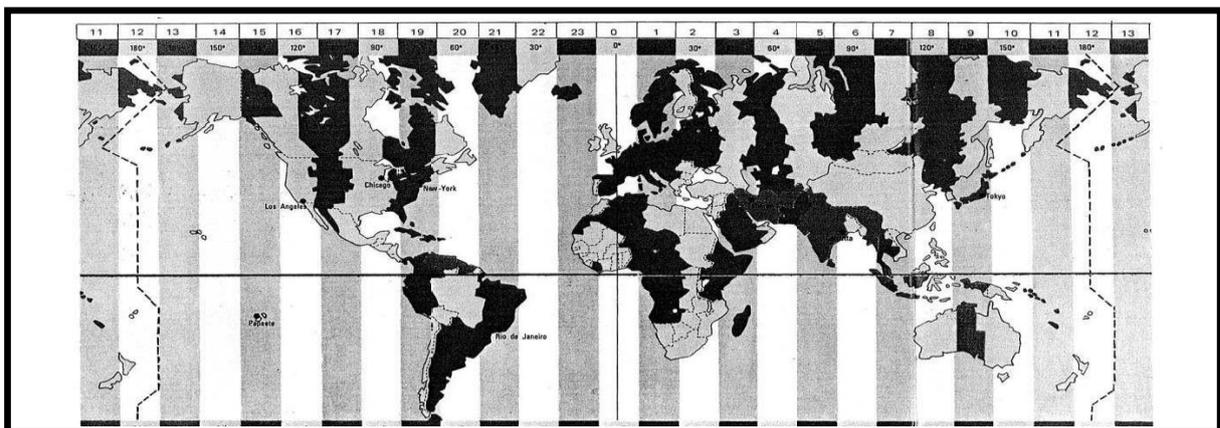
La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du Soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET [4]:

$$ET = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (1.12)$$

$$N' = (N - 81) \times \left(\frac{360}{365}\right) \quad (1.13)$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année

ET Équation du temps (terme correctif) en mn



**Figure I.5 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich**

La différence de longitude ( $\lambda - \lambda_{\text{réf}}$ ) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le temps solaire TS se calcule finalement par la formule [4] :

$$TS = TL - C + ET + \frac{\lambda_{\text{ref}} - 1}{15} \quad (1.14)$$

Le problème est souvent de déterminer la différence C entre TL et TCF en un lieu donné. On peut procéder de la manière suivante :

- Il est possible de connaître TL et TU (écouter une radio internationale) d'où (TL-TU).
- La différence (TCF-TU) peut être lue sur la figure I.5.

- On en déduit

$$C = (TL - TU) - (TCF - TU) \quad (1.15)$$

## I.4 Aspects énergétiques:

### I.4.1 L'atmosphère terrestre :

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

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

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

- CO<sub>2</sub> (0,03%)
- Vapeur d'eau: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant tout la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère
- Ozone O<sub>3</sub> située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...

La répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec l'indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde, est représenté sur la figure I.6 [4].

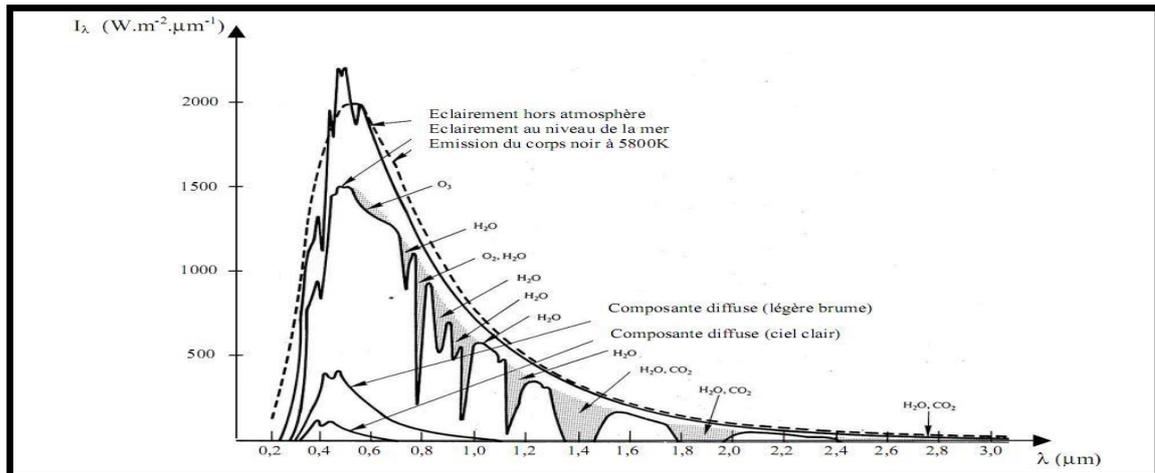


Figure I.6: Répartition spectrale du rayonnement solaire du sol terrestre.

#### I.4 .1.1 Rayonnement du ciel et de l'atmosphère :

Les gaz non transparents de l'atmosphère ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes:

- Vers  $14,7 \mu\text{m}$  pour le  $\text{CO}_2$ .
- Entre  $5$  et  $7 \mu\text{m}$  et entre  $14$  et  $20 \mu\text{m}$  pour la vapeur d'eau.
- Vers  $9,6 \mu\text{m}$  pour  $\text{O}_3$ .

Ainsi et comme le montre la figure I.7 [4], il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'onde ( $>3 \mu\text{m}$ ) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à  $3 \mu\text{m}$ .

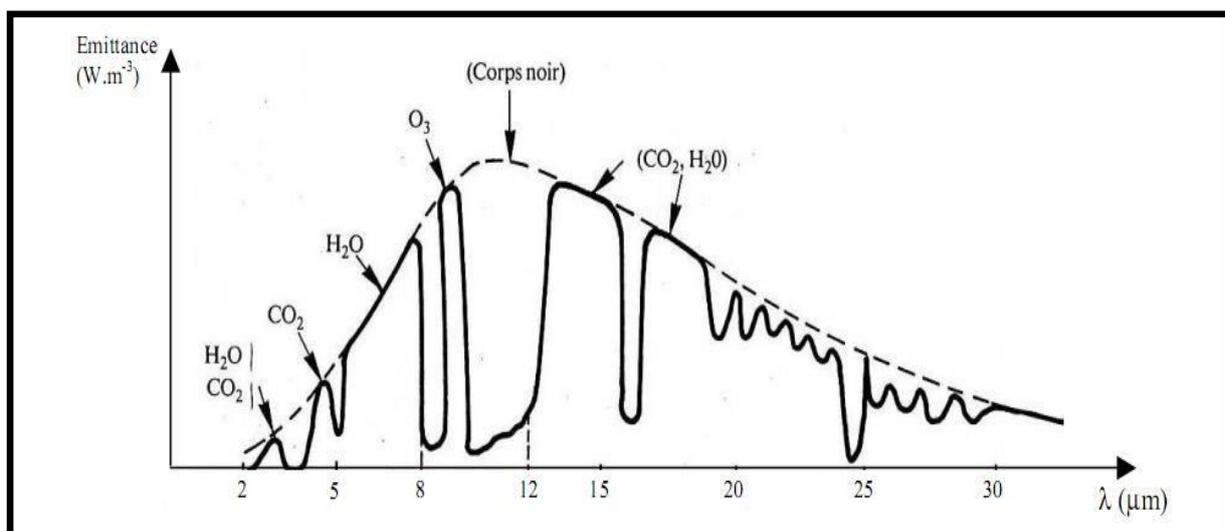


Figure I.7: Spectre du rayonnement atmosphérique.

**I.4.2 Masse d'air :**

Par convention une masse d'air unité correspond au trajet d'un rayon solaire selon la verticale du lieu. Elle est définie par : [2], [6].

$$m=1/\sin(h) \quad (1.16)$$

Si :  $h \leq 10^0$

$$m= (1/\sin(h)) +0,15(3,885 + h)^{-1,253} \quad (1.17)$$

**I.5 CONCLUSIONS**

L'évaluation et la connaissance du potentiel solaire permettent de sensibiliser les décideurs et de susciter leur intérêt pour les technologies solaires et stimulent les opérateurs économiques à investir dans des projets solaires sur des sites adéquats.

Une fois cette étape franchie, il convient d'évaluer ce même potentiel à l'échelle de la région et pour des durées plus courtes : valeurs journalières pour le PV et horaires pour panneau thermique (ou chauffe-eau solaire).

# Chapitre II

## Généralité sur les transferts thermiques

### II.1. INTRODUCTION

Les capteurs solaires reçoivent l'énergie et la convertissent soit en électricité pour les panneaux photovoltaïques ou en chaleur pour les capteurs solaires thermiques ou bien en électricité et en chaleur pour les capteurs hybrides, les capteurs ne sont pas 100% efficaces, La majeure partie de cette énergie est perdue à l'environnement.

## II.2 Transfert par conduction :

La conduction est le transfert de la chaleur à partir d'une partie d'une substance à une autre partie de la même substance, ou bien d'une substance à l'autre en contact physique avec elle, elle est traduite par le coefficient de conductibilité thermique qui s'exprime en :

❖ *Kcal/h/m/deg*

❖ *Watt/m/deg*

La transmission de chaleur par ce moyen est d'autant plus faible que le matériau est épais et de faible densité.

Dans le cas d'un capteur solaire, l'énergie est absorbée par la vitre et par les cellules de silicium et la chaleur est conduite à l'arrière et avant du capteur par l'intermédiaire des couches intervenantes. La loi de Fourier pour l'état d'équilibre, des applications unidimensionnelles est comme suit :

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Où :

Q : Est le flux de chaleur transmis par conduction [W]

$\lambda$  : Est la conductivité thermique du matériau  $\frac{W}{m \cdot K}$

A : La surface de la section perpendiculaire [m<sup>2</sup>]

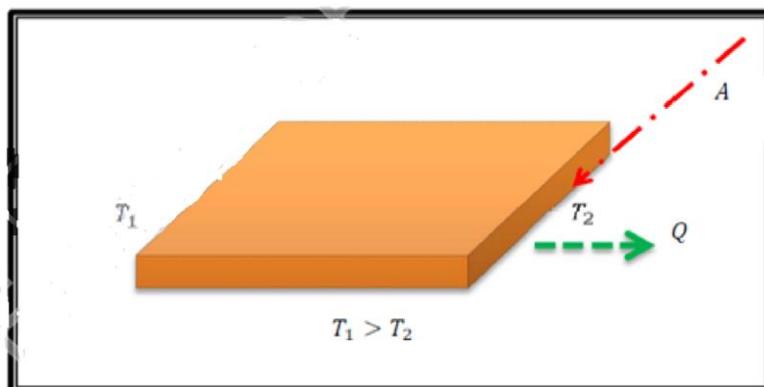
$\frac{dT}{dx}$  : La variation de la température en ce qui concerne la longueur du chemin de transfert de chaleur.

Pour une plaque plane simple d'épaisseur L, l'équation devient :

$$Q = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

Et pour une plaque composite composée de deux matériaux :

$$Q = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}} \quad (2.3)$$



**Figure II.1 : Schéma de transfert de chaleur conduction**

Le tableau II.1 contient les conductivités thermiques de différents matériaux et de quelques matériaux isolants [7] :

Tableau II.1 : Conductivités thermiques en (w/m.k) de quelques matériaux

<b>METAUX ET ALLIAGES (à la température ambiante)</b>			
Plomb pur	<b>35</b>	Titane	<b>21</b>
Etain	<b>61</b>	Acier inox (Cr 18 % - Ni 8 %)	<b>16</b>
Nickel pur	<b>61</b>	Acier doux (1 % de C)	<b>46</b>
Fer pur	<b>85</b>	Laiton (Cu 70 % - Zn 30 %)	<b>99</b>
Aluminium à 99 %	<b>203</b>	Alliage (Al 92 % - Mg 8 %)	<b>104</b>
Aluminium à 99.9 %	<b>228</b>	Zinc	<b>111</b>
Cuivre à 99.9 %	<b>386</b>		
<b>SOLIDES NON METALLIQUES (à la température ambiante)</b>			
Amiante (feuilles)	<b>0,162</b>	Liège	<b>0,046</b>
Verre courant	<b>0,70</b>	Matières plastiques phénoplastes	<b>0,046</b>
Plaque de fibrociment	<b>0,74</b>	Laine de verre	<b>0,046</b>
Briques de terre cuite pleines	<b>1,16</b>	Matières plastiques polyvinyles	<b>0,162</b>
Verre pyrex	<b>1,16</b>	Matières plastique polyester	<b>0,209</b>
Béton plein	<b>1,7</b>	Porcelaine	<b>0,928</b>
Electrographite	<b>116</b>		
<b>LIQUIDES</b>		<b>GAZ (à 0°C et sous la pression normale)</b>	
Eau à 20°C	<b>0,59</b>	Air	<b>0,024</b>
Eau à 100°C	<b>0,67</b>	Azote	<b>0,024</b>
<b>Quelques matériaux isolants</b>			
Polystyrène expansé			<b>0.040</b>
Laine de roche			<b>0.040</b>
Laine (vêtement)			<b>0.040</b>

### II.3 Transfert par convection

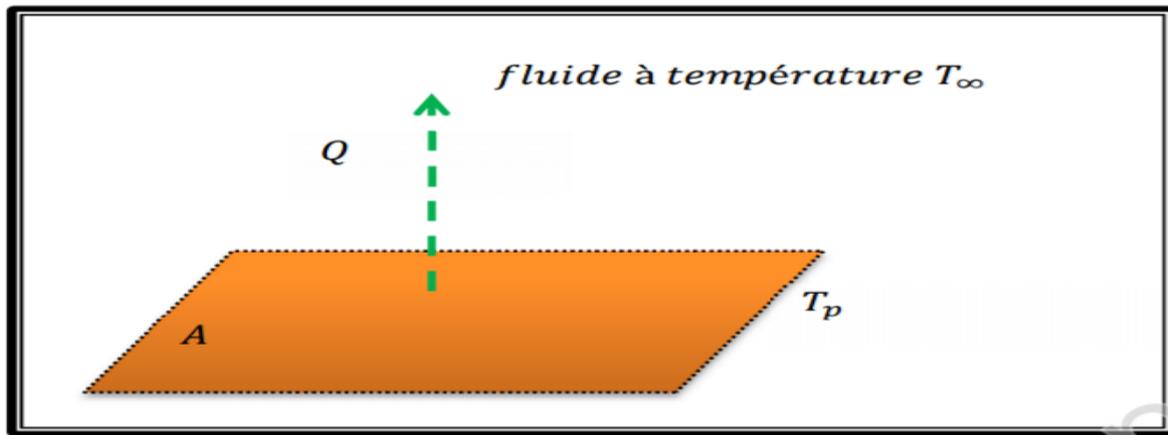
La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement [7].

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de températures, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

Le transfert de chaleur par convection est décrit en utilisant des corrélations entre certains paramètres dimensions. De tels paramètres sont les nombres de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl. Ces paramètres sont employés afin de déterminer la valeur de  $h$  pour chaque cas:

$$Q = h A (T_s - T_f) \quad (2.4)$$

La loi de Newton du refroidissement est alors employée afin de calculer le transfert de chaleur Par convection.



**Figure II.2 : Schéma de transfert de chaleur convectif**

Selon la nature des mécanismes engendrant des fluides, on distingue trois types de transfert par convection :

### II.3.1 Convection libre ou naturelle :

Lorsqu'un fluide se trouve en contact avec un corps chaud, sa température augmente et sa masse volumique  $\rho$  diminue, et il se déplace (il monte) par rapport au corps chaud. Cet écoulement de fluide le long de ce corps chaud entraîne un phénomène de convection que l'on appelle naturelle ou libre. Si le fluide est plus chaud que le corps, l'écoulement se fera vers le bas mais il y aura toujours de la convection.

### II.3.2 Convection forcée :

Le mouvement du fluide est provoqué par une intervention mécanique indépendante de toute hétérogénéité dans la répartition des températures au sein du fluide.

### II.3.3 Convection mixte :

Dans ce cas, les deux mécanismes sont superposés.

#### II.3.3- a- Estimation du coefficient d'échange convectif :

Dans le cas du transfert thermique par convection, le coefficient d'échange convectif dépend de plusieurs paramètres tels que la géométrie de la paroi, les caractéristiques thermophysiques du fluide et la nature de l'écoulement, il peut être déterminé avec l'aide du coefficient de **Nusselt** qui représente le rapport du courant thermique dû à la convection et à la conduction thermique à travers la couche limite.

### II.3.3-b- Les nombres adimensionnels :

Nous allons définir ci-après les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection, donnant dans chaque cas, une interprétation physique de ces nombres.

#### ❖ Nombre de Nusselt :

La quantité de chaleur échangée par convection est équivalente au flux transmis par conduction à travers une couche du fluide d'épaisseur  $dx$  :

$$Q_{p-f} = -\lambda A \frac{dT}{dx} = h A (T_p - T_f) \quad (2.5)$$

D'où:

$$\frac{hL}{\lambda} = \frac{-\frac{dT}{dx}|_{x=0}}{\frac{T_p - T_f}{L}} \quad (2.6)$$

$L$  : La longueur caractéristique.

En peut écrire :

$$dT = d(T - T_p)$$

$$\frac{hL}{\lambda} = \frac{d\left[\frac{T_p - T}{T_p - T_f}\right]}{d\left(\frac{x}{L}\right)} \Bigg|_{x=0}$$

La combinaison  $\frac{hL}{\lambda}$  est appelée le nombre de Nusselt.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (2.7)$$

Ou :

$h$  : Coefficient d'échange par convection  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$

$\lambda$  : Conductivité thermique du fluide  $\left[\frac{W}{m K}\right]$

$L$  : La longueur caractéristique [m]

La signification physique du nombre de Nusselt est le rapport de la quantité de la chaleur échangée par convection à la quantité de chaleur échangée par conduction.

### ❖ Nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide.

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\mu}{\frac{\lambda}{c_p}} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{\lambda}{\rho c_p}} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.8)$$

Avec

$\rho$  : Masse volumique  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$C_p$  : Chaleur spécifique  $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

$\mu$  : Viscosité dynamique  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

$\lambda$  : Conductivité thermique  $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$

$\nu$  : Viscosité cinématique  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Dans le cas des gaz,  $P_r$  est sensiblement constant avec la pression et la température et ne varie qu'avec les changements thermiques de  $C_p(T)$ .

Quelques exemples du nombre de Prandtl à 100°C pour des gaz courants :

**Tableau II.2 : Prandtl de quelques gaz [8]**

Gaz	Pr
Ar	0.66
Air	0.69
H2	0,69
O2	0.70
N2	0.70
He	0.71
CO	0.72
CO2	0.75
H2O (vapeur)	1.06

Dans le cas des liquides, le nombre de Prandtl est beaucoup plus variable :

Tableau II.3: Prandtl de quelques liquides [8].

Liquide	T (°C)	Pr
Eau	0	13.6
	20	7.03
	100	1.75
Alcool itannique	0	21.8
	30	13.9
	60	12.1
Glycol	20	203
	100	25
Glycérine	0	100'000
	30	5'200

Pour les métaux liquides, au contraire,  $Pr$  est très petit, de l'ordre de 0.01.

#### ◆ Nombre de Grashoff :

C'est une dimension pour la convection libre, Ce nombre est défini comme le rapport entre la force de gravité et de la force d'inertie.

$$Gr = \frac{\beta g L^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (2.9)$$

Avec :

$\beta$ : Coefficient de dilatation thermique dans l'espace  $\left[\frac{1}{K}\right]$

$g$  : Gravitation  $\left[\frac{9.81 m}{s^2}\right]$

$\Delta T$  : L'écart de température [K]

#### ◆ Nombre de Reynolds :

Ce nombre représente le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité.

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \rho \frac{VL}{\mu} \quad (2.10)$$

Avec :

$V$  : La vitesse d'écoulement du fluide  $\left[\frac{m}{s}\right]$

Ce nombre joue un rôle fondamental dans la caractérisation de l'écoulement :

- Si  $Re < 2400$  on est en régime laminaire.
- Pour des vitesses plus élevées,  $Re \gg 2400$ , le régime est turbulent.

#### ❖ Nombre de Rayleigh :

Il caractérise la convection naturelle selon le mode d'échange (à température de parois constante ou flux thermique constante).

$$Ra = Gr Pr \quad (2.11)$$

#### II.3.3-c- Evaluation du coefficient d'échange par convection :

La détermination du coefficient d'échange diffère selon la nature de convection.

#### ❖ Convection libre :

Pour ce type de convection, le nombre de Nusselt est donné en fonction des nombres adimensionnels, Grasshoff et Prandtl par la relation suivante :

$$Nu = K (Gr Pr)^n \quad (2.12)$$

$K$  et  $n$  : Sont des constantes.

#### ❖ Convection forcée :

Dans ce mode de convection le nombre de Nusselt est donné en fonction de deux nombres adimensionnels, le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl par la relation suivante :

$$Nu = a Re^n Pr^m \quad (2.13)$$

$a$ ,  $n$  et  $m$  : Sont des constantes qui peuvent être déterminées en fonction du régime de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

#### II.4. Transfert par rayonnement :

Tout corps émet un rayonnement thermique qui dépend de sa température et se traduit par son refroidissement.

Si on prend le rayonnement entre un corps et le milieu environnant nous avons la relation :

$$Q = \varepsilon_p \sigma A (T_p^4 - T_f^4) \quad (2.14)$$

Avec :

$Q$  : Énergie de chaleur transmis par rayonnement

$\varepsilon$  : Facteur d'émissivité du corps

$T$  : Température du corps en Kelvin

$\sigma$  : Constante de Stephan

La valeur de  $\varepsilon$  vaut 1 pour un corps dit noir.

La plupart des gaz monoatomiques ou poly-atomiques symétriques (H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, ...) n'absorbent et n'émettent aucun rayonnement thermique. Par contre les gaz poly-atomiques non symétriques émettent un tel rayonnement.

Un corps étant rarement totalement isolé, il recevra également le rayonnement émit par le gaz qui l'environne ou par d'autres corps lui faisant face.

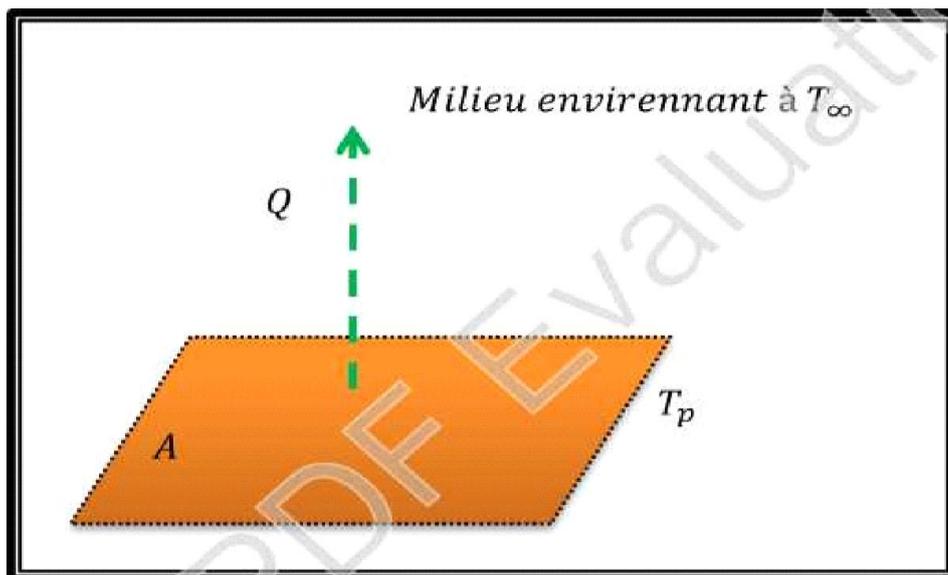


Figure II.3 : Schéma de transfert de chaleur par rayonnement

**Tableau II -4 : Facteurs d'émissivité des matériaux courants**

Matériau	Emissivité [e]
Aluminium poli	0,02
Aluminium oxydé	0,20
Zinc (galvanisé)	0,23
Sol	0,38
Eau	0,67
Bois	0,91
Brique rouge	0,93
Noir de carbone	0,95
Glace	0,98

## **II.5. CONCLUSION**

Donc l'énergie peut être transférée en général sous trois formes, transfert par conduction, par convection et par rayonnement, cette transformation de l'énergie solaire ce fait par des capteurs solaire hybride PVT.

# Chapitre III

## Modélisation d'un capteur solaire PVT

### **III.1. INTRODUCTION**

Le concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Il est caractérisé par une combinaison sandwich séparant air et eau. Le fluide caloporteur est canalisé, ce qui permet une circulation forcée. La face inférieure est isolée et ne comporte pas d'absorbeur. La figure (III.1) présente une description d'un capteur PV/T utilisant l'air comme fluide caloporteur [8].

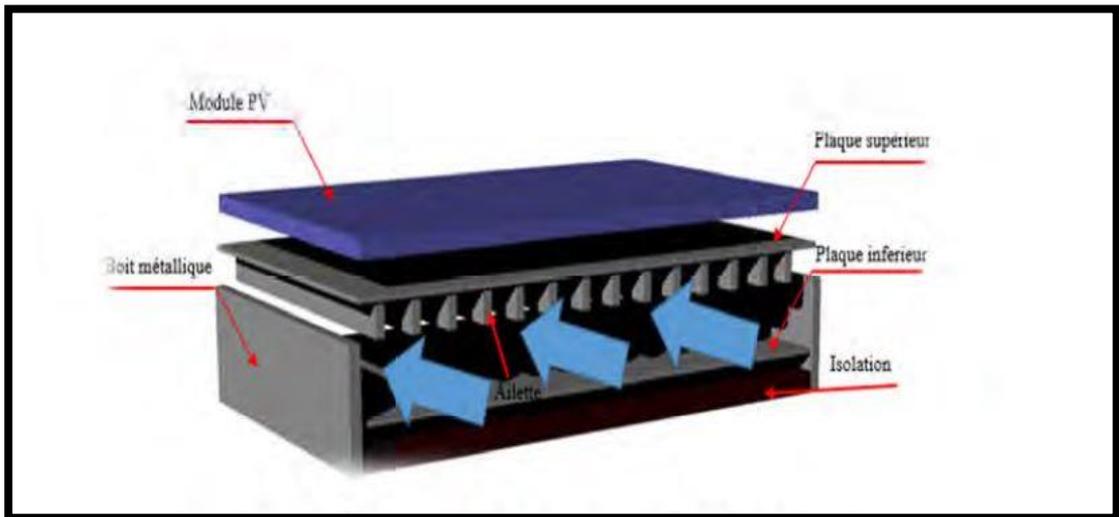


Figure III.1 : schéma d'un capteur solaire hybride

### III.2 MODELISATION DU SYSTEME PV/T :

L'analogie électrique traditionnelle permet une grande simplification des problèmes de thermique. C'est la méthode nodale qui permet une modélisation par analogie électrique des systèmes [9].

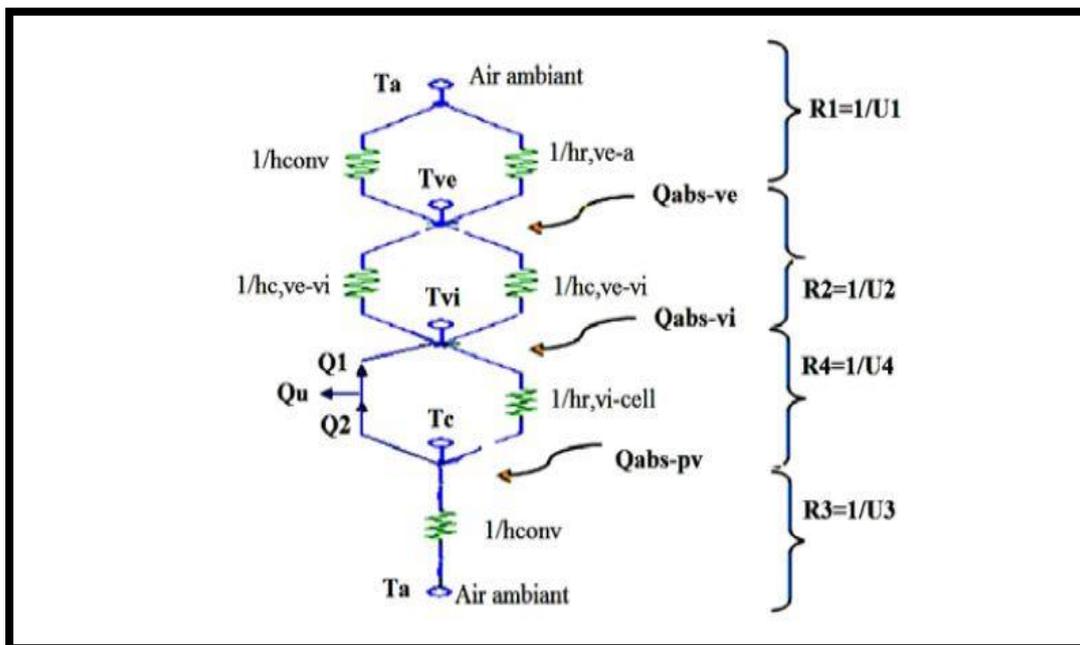


Figure III.2 Schéma par analogie électrique du PV/T

Le PV/T est un système complexe qui fait intervenir un couplage de transfert thermique entre les différents éléments qui le constituent. Les équations du bilan font apparaître des paramètres qui décrivent la géométrie du système, la nature de l'écoulement de l'eau et de l'air ambiant, les pertes par convection et par rayonnement. La précision du modèle dépend fortement de ces paramètres [8].

En plus des hypothèses générales mentionnées pour la modélisation des capteurs utilisant la méthode nodale, on impose les hypothèses particulières suivantes :

- La conduction thermique dans le sens de l'écoulement du fluide est négligeable.
- Le vent extérieur est supposé de direction toujours parallèle aux faces du capteur.
- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés (la conductivité thermique de l'absorbeur est supposée très grande) [8].

### III.3 Bilan thermique et calcul de rendement :

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$Q_{sa} = Q_u + Q_{st} \quad (3.1)$$

Où

$Q_{sa}$  : Flux solaire absorbé en  $[w/m^2]$

$Q_p$  : Flux perdu par la paroi absorbante en  $[w/m^2]$

$Q_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur en  $[w/m^2]$

$Q_{st}$  : Flux stocké dans le capteur  $[w/m^2]$ .

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable, ce qui conduit à :

$$Q_{sa} = Q_p + Q_u \quad (3.2)$$

### III.4 Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire :

Le principe de modélisation consiste à écrire les bilans énergétiques de chaque élément constituant le capteur ; absorbeur, vitre, isolant et fluide caloporteur. Avant d'aborder les calculs, il est nécessaire de considérer certaines hypothèses :

- ✓ Les propriétés physiques et thermiques du fluide caloporteur (air) sont données en fonction de sa température moyenne.
- ✓ L'absorbeur étant cellule solaire à base de Silicium.
- ✓ La température ambiante est la même autour du capteur.
- ✓ La température dans le fluide et dans l'absorbeur ne dépend que de la dimension longitudinale (sens de l'écoulement) [9].

### III.5 Méthode par tranches :

Cette méthode est aussi dite, la méthode de modélisation « pas à pas » la méthode consiste à découper l'isolateur en tranches fictive de longueur  $\delta_x$  dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à écrire les bilans dans chaque tranche. Il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert d'électricité [10].

Les différents échanges thermiques qui ont lieux, sont schématisés par le circuit électrique équivalent cette méthode est aussi dite, la méthode de modélisation « pas à pas » qui prend en compte, l'évolution des températures de tous les éléments du capteur solaire dans le temps et dans l'espace.

Elle consiste à découper le capteur solaire en tranches fictives de longueur  $\delta_x$  dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur, et à écrire le bilan des échanges dans chaque tranche. Il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et les circuits électriques analogiques équivalents [11].

Le réseau électrique correspond au capteur solaire tel que schématisé, par conséquent l'application de la loi d'Ohm conduit aux équations des bilans suivantes :

- **Dans la vitre :**

$$h_{r,p-v} \cdot (T_p - T_v) + \frac{h_{c,p-v}}{2} (T_p - T_v) = U_{av_1} \cdot (T_v - T_a) \quad (3.3)$$

- **Dans l'absorbeur (cellules) :**

$$(\tau_v \alpha_{cellule} - \tau_v \eta_{ele}) I_g = h_{c,p-f} (T_p - T_f) + \frac{h_{c,p-v}}{2} (T_p - T_{Al}) + h_{r,p-v} (T_p - T_v) \quad (3.4)$$

- **Dans le fluide caloporteur :**

$$h_{c,p-f} \cdot (T_p - T_f) = h_{c,f-Al} \cdot (T_f - T_{Al}) + Q_u \quad (3.5)$$

- **Dans la plaque inférieure en aluminium (de la côte de l'isolant) :**

$$h_{c,Al-f} \cdot (T_p - T_{Al}) + h_{r,p-Al} \cdot (T_p - T_{Al}) = U_{ar} \cdot (T_{Al} - T_a) \quad (3.6)$$

Avec :

$T_a$  : Température ambiante [°C]

$T_v$  : Température de la vitre [°C]

$T_c$  : Température d'absorbeur [°C]

$T_f$  : Température du fluide caloporteur, air [°C]

$T_{Al}$  : Température de la plaque d'aluminium près de l'isolant (plan inférieur de l'écoulement devine d'air mobile) [°C].

$U_{av_1}$  : Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre [  $w/m^2$  ]

$U_{ar}$  : Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur [  $w/m^2$  ]

$h_{r,p-v}$  : Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre [  $w/m^2$  ]

$h_{c,p-v}$  : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre [  $w/m^2$  ]

$h_{c,p-f}$  : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide [  $w/m^2$  ]

$h_{r,p-Al}$  : Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium [  $w/m^2$  ]

$h_{c,f-Al}$  : Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium [  $w/m^2$  ]

$I_g$  : Flux solaire global reçu par le capteur plan.

$\tau_v$  : Coefficient de transmission des couvertures transparentes.

$\alpha_p$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

Ce système d'équation peut être réécrit sous la forme d'une équation matricielle à quatre (04) dimensions de la forme :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} T_v \\ T_p \\ T_f \\ T_{Al} \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

Dont les températures sont déterminées par la matrice inverse :

$$[T] = [B][A]^{-1} \quad (3.7)$$

Le déroulement de ces calculs nécessite la connaissance des valeurs des coefficients d'échanges par convection, par rayonnement et par conduction, ainsi que les valeurs des coefficients des pertes globales par l'avant du capteur  $U_{av_1}$  et par l'arrière  $U_{ar}$  définis par les expressions :

$$U_{av_1} = h_{c,v-a} + h_{r,v-a} \quad (3.8)$$

et

$$U_{ar} = \frac{1}{\left[ \sum \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{c,v-a}} \right]} \quad (3.9)$$

Avec :

$U_{av_1}$  : Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre [  $w/m^2$  ]

$h_{c,v-a}$  : Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'ambiance [  $w/m^2$  ]

$h_{c,v-a}$  : Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et l'ambiance [  $w/m^2$  ]

$U_{ar}$  : Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur [  $w/m^2$  ]

$e_{is}$  : Épaisseur de l'isolant placé à l'arrière du capteur [m]

### III.6. Les échanges dans un capteur solaire plan à air :

#### III.6.1. Les échanges radiatifs :

##### III.6.1.1. Echanges radiatifs entre les vitrages et la voûte céleste :

On emploie l'expression du coefficient d'échange radiatif suivant [6] :

$$h_{r,v-c} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_v (1 + \cos \varphi) (T_v + T_c) (T_v^2 + T_c^2) \quad (3.10)$$

Où

$\varphi$  : étant l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale, les températures  $T_v$  et  $T_c$  sont les températures absolues.

$T_c$  : Température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de **Swinbank** (1963) [6,12] suivante :

$$T_c = 0,0552 \cdot T_a^{1.5}$$

Les températures  $T_c$  et  $T_a$  sont exprimées en Kelvin

##### III.6.1.2 Echanges radiatifs entre la vitre et l'absorbeur :

Sont décrits par l'expression suivante :

$$H_{r,p-v} = \frac{\sigma (T_v + T_p) (T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{p-v}} - 1} \quad (3.11)$$

Les températures  $T_v$  et  $T_p$  sont respectivement la température des vitrages et de la plaque absorbante exprimées en Kelvin.

### III.6.1.3- Echanges radiatifs entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium sur l'isolant :

Sont décrit par l'expression :

$$h_{r,p-v} = \frac{\sigma (T_p + T_{Al})(T_p^2 + T_{Al}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{p-Al}} + \frac{1}{\varepsilon_{Al-p}} - 1} \quad (3.12)$$

Où, les températures  $T_p$  et  $T_{Al}$  exprimées en Kelvin, sont la température de l'absorbeur et de la Plaque considérée en aluminium sur l'isolant.

### III.6.2 : Les échanges convectifs

#### III.6.2.1- Echanges convectifs entre le capteur et le milieu environnant :

Lorsque le vent souffle parallèlement aux parois externes du capteur, en emploi une corrélation empirique simple qui permet d'estimer le coefficient d'échange par convection forcée en fonction de la vitesse du vent [12] décrite par :

$$h_{c,v-a} = h_{vent} + 5.76 + 3.86 \cdot U_{vent} \quad (3.13)$$

#### III.6.2.2- Echanges convectifs entre l'absorbeur et la vitre :

Le transfert thermique dans l'espace compris entre la vitre et l'absorbeur, est à la fois caractérisé par des échanges de conduction et de convection naturelle, sont exprimés par un coefficient de conduction-convection tel que [13] :

$$h_{c,p-v} = \frac{N_u \cdot d}{\lambda_a} \quad (3.14)$$

Le nombre de **Nusselt**,  $Nu$  est exprimé en fonction du nombre de **Rayleigh** par la corrélation

De **Holland** [13] suivante :

$$N_u = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\varphi)^{1.6}}{R_a \cdot \cos \varphi} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{R_a \cdot \cos \varphi} \right] + \left[ \left( \frac{R_a \cdot \cos \varphi}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3.15)$$

Avec :

$R_a$  : Etant le nombre de **Rayleigh**,  $R_a = \frac{g\beta\Delta T e_v^3}{\alpha\nu}$

$g$  : Accélération de la pesanteur  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$ .

$\beta$  : Coefficient de dilatation thermique de l'air  $\beta = \frac{1}{T} \left[ \frac{1}{K^\circ} \right]$ .

$\Delta T$  : Écart de température entre la vitre et l'absorbeur [  $K^\circ$  ].

$e_v$  : Distance entre la vitre et l'absorbeur [  $m$  ].

$a$  : Diffusivité thermique de la lame d'air entre la vitre et l'absorbeur  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$

$\nu$  : Viscosité cinétique du milieu  $\left[ \frac{m^2}{s} \right]$ .

$\varphi$  : Angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal en degré.

$\lambda_a$  : Conductivité thermique de la lame d'air entre la vitre et l'absorbeur (air)  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ .

D'autres corrélations peuvent être également employées, on cite en particulier celles établies par **Jacques. B [14]**.

$$\begin{aligned} N_u &= 1.013 && \text{pour } G_r < 1700 + 47.8\varphi \\ N_u &= 2.5 + 0.0133(90 - \varphi) && \text{pour } G_r > 80000 \\ N_u &= [0.06 + 3 \cdot 10^{-4}(90 - \varphi)] && \text{pour aoutrement} \end{aligned}$$

Avec, Gr étant le nombre de **Grashoff**, tel  $G_r = \frac{g\beta\Delta T e_v}{\nu^2}$  et  $\varphi$  en degré.

### III.6.2.3- Echanges convectifs dans la lame d'air mobile :

Les coefficients d'échange convectifs  $h_{c, Al-f}$  et  $h_{c, p-f}$  respectivement entre le fluide et les parois solides, l'absorbeur et la plaque d'aluminium sur l'isolant, sont estimés par la relation :

$$h_{c, Al-f} = h_{c, p-f} = \frac{N_u \lambda_a}{D_h} \quad (3.16)$$

Avec :

$\lambda_a$  : Conductivité thermique du fluide, l'air en écoulement  $\left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$ .

$D_h$  : Diamètre hydraulique équivalent du conduit utile [  $m$  ]

$N_u$  : Nombre de **Nusselt**.

Le nombre de Nusselt est généralement en fonction du régime d'écoulement, tel que :

- En régime laminaire ( $Re < 2300$ ), le nombre de **Nusselt** est décrit par les corrélations

Suivantes :

- Corrélation proposé par **Mercer [2]** :

$$N_u = 4.9 + \frac{0.0606 \left( \frac{Re Pr D_h}{L_c} \right)^{1.2}}{1 + 0.0909 \left( \frac{Re Pr D_h}{L_c} \right)^{0.7} Pr^{0.17}} \quad (3.17)$$

Où

$R_e$  : étant le nombre de Reynolds,  $R_e = \frac{U_f D_h}{\nu}$

$P_r$  : Nombre de Prandtl,  $P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda}$

- Corrélation de Malik et Charters [15] :

$$N_u = \frac{0.0192 R_e^{0.75} P_r}{1 + 1.22 R_e^{\frac{1}{8}} (P_r - 2)} \quad (3.18)$$

- En régime turbulent ( $Re > 2300$ ), Nusselt est estimé par les corrélations suivantes :

- Corrélation de Kays [6]

$$N_u = 0.0158 R_e^{0.75} \quad \text{Pour } \frac{L_c}{D_h} > 10$$

Où,  $R_e$  étant le nombre de Reynolds donné par :

$$R_e = \frac{U_f D_h}{\nu} \quad (3.19)$$

$U_f$  : Vitesse d'écoulement dans le conduit utile d'écoulement d'air [m/s]

$D_h$  : Diamètre hydraulique équivalent du conduit utile [m]

$\nu$  : Viscosité cinétique du fluide en écoulement

### III.7. Rendement thermique du capteur solaire plan $\eta$ :

Le rendement thermique du capteur solaire photovoltaïque thermique PVT calcule par la relation suivante [16]:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g} \quad (3.20)$$

Le rendement électrique du capteur PVT est égal [17] :

$$\eta_{pv} = \frac{E}{A_c I_t} = \frac{A_c I_g (\eta_{ref} [1 - 0.0054(T_c - 298.15)])}{A_c I_g} \quad (3.21)$$

Le rendement global du capteur photovoltaïque thermique est défini comme la somme de l'énergie thermique et l'énergie électrique et les tous divisées par le rayonnement incident sur la surface du capteur.

$$\eta_{pvt} = \frac{E + Q_u}{A_c I_g} = \eta_{pv} + \eta_{th} \quad (3.22)$$

### III.8. Conclusion

Le but essentiel de simulation c'est pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel mais le plus important est d'analysé profondément les résultats.

# Chapitre IV

## Résultats & discussion

### IV.1 INTRODUCTION

L'irradiation solaire, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système solaire, il serait intéressant d'étudier son effet sur les caractéristiques du système. Notre travail a pour objectif, l'étude de l'effet de l'intensité de l'éclairement solaire sur capteur solaire hybride PVT. Une partie expérimentale d'essai a été réalisée au laboratoire des énergies renouvelables du centre universitaire **SALHI Ahmed– Naâma**.

#### IV.2 L'effet photovoltaïque :

Les mesures ont été réalisées au sein du laboratoire énergies renouvelables du centre universitaire à Naâma, Un site situé au sud algérien à une latitude de (33 ,3365) [18]. Il est caractérisé par un ensoleillement très important, les expériences ont été faites le 12 avril pour mesurer les valeurs stationnaires de l'irradiation solaire et sont illustrées sur le tableau (IV.1).

#### IV.3 La production de puissance électrique et caractéristique I-V :

La figure (IV.1) et (IV.2) présente la variation de la puissance électrique et caractéristique I-V en fonction de l'éclairement, on voit qu'une augmentation de l'éclairement ( $I_{\text{global}}$ ) conduit à un accroissement important de l'intensité du courant photovoltaïque et de la puissance. Le photocourant est par conséquent directement lié au flux.

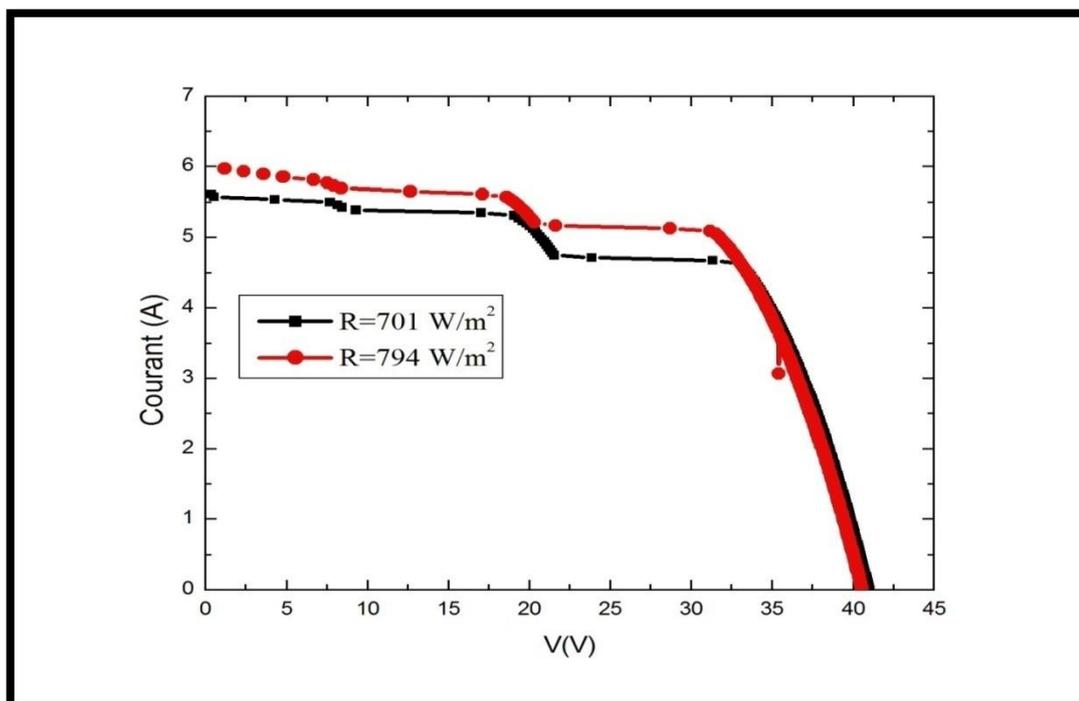


Figure IV.1: La variation de la caractéristique I-V en fonction de la tension

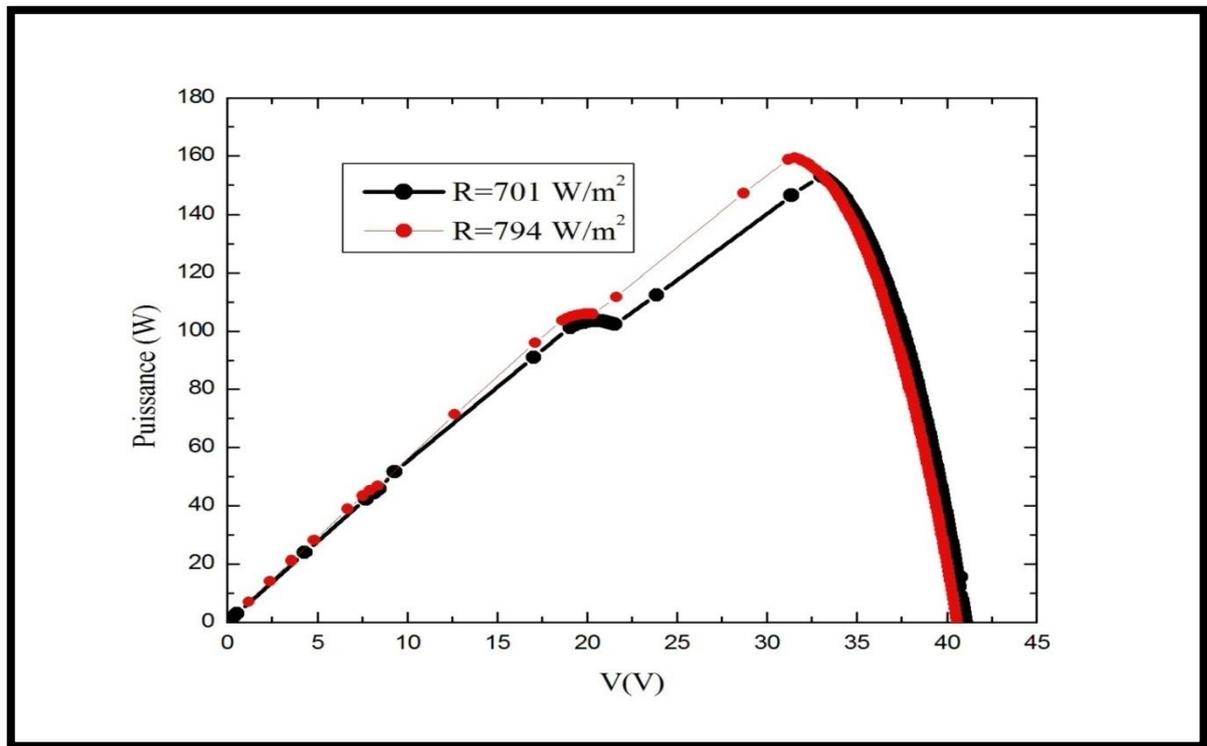


Figure IV.2 : La variation de la puissance électrique en fonction de la tension

Tableau (IV.1) : les performances d'un capteur solaire

<b>R (w /m<sup>2</sup>)</b>	<b>p<sub>Max</sub>(w)</b>	<b>V<sub>Max</sub>(V)</b>	<b>I<sub>MAX</sub>(R)</b>	<b>FF</b>	<b>η</b>
137	44.38	10.09	4.397	0.212	0,032
627	65.60	24.78	2.647	0.301	0,10
637	97.04	37.33	2.598	0.446	0,15
657	146.7	33.95	4.321	0.632	0,17
701	153	33.03	4.633	0.660	0,21
775	158.3	31.53	5.022	0.665	0,20
794	159.3	31.55	5.049	0.653	0,20

#### IV.4 Effet du rayonnement global sur les températures

L'analyse des courbes de la figure (IV.3) et (IV.4) permet de remarquer que la température de l'absorbeur est la plus élevée, ce qui s'explique aisément par son facteur d'absorption solaire élevé. Puis, dans un ordre décroissant, nous avons la température du fluide caloporteur du coefficient de convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur, aussi le rendement du système hybride est plus élevé par rapport à un système thermique.

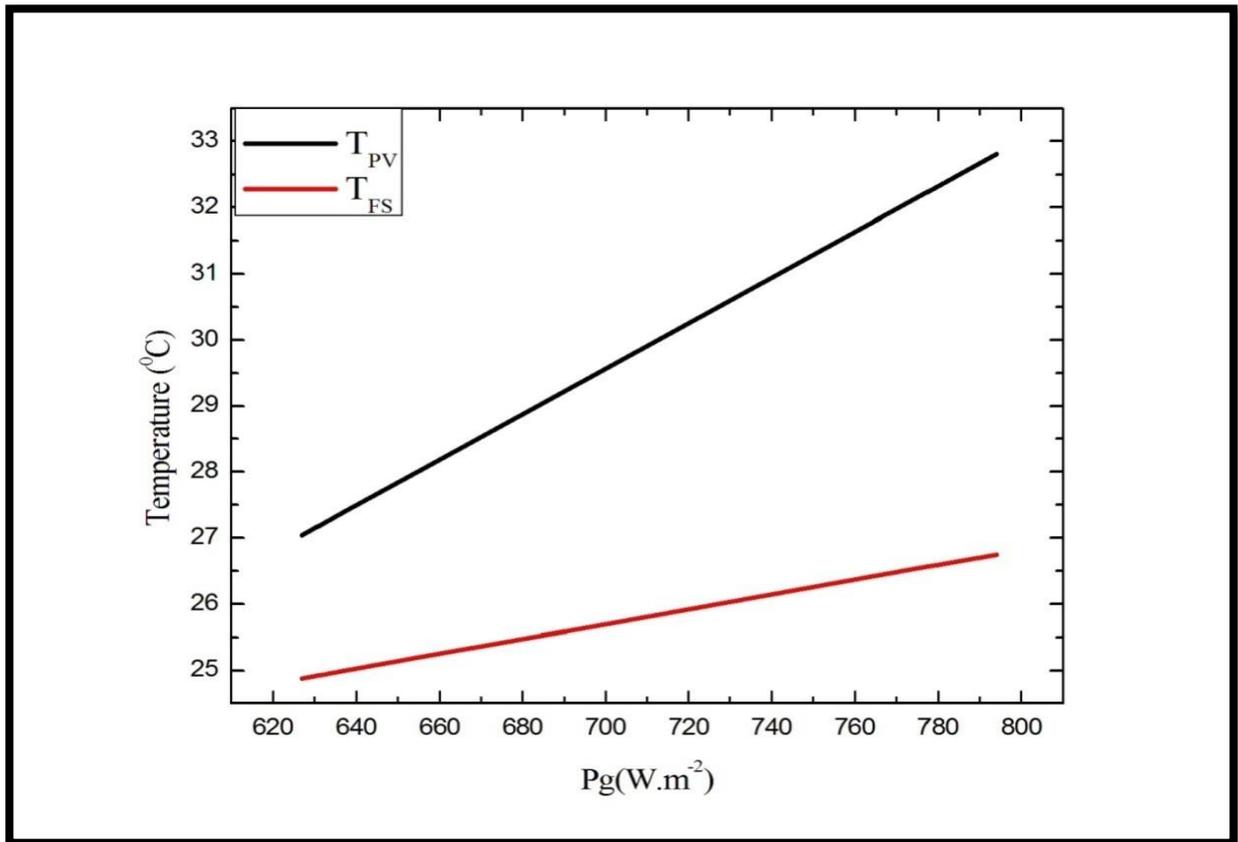
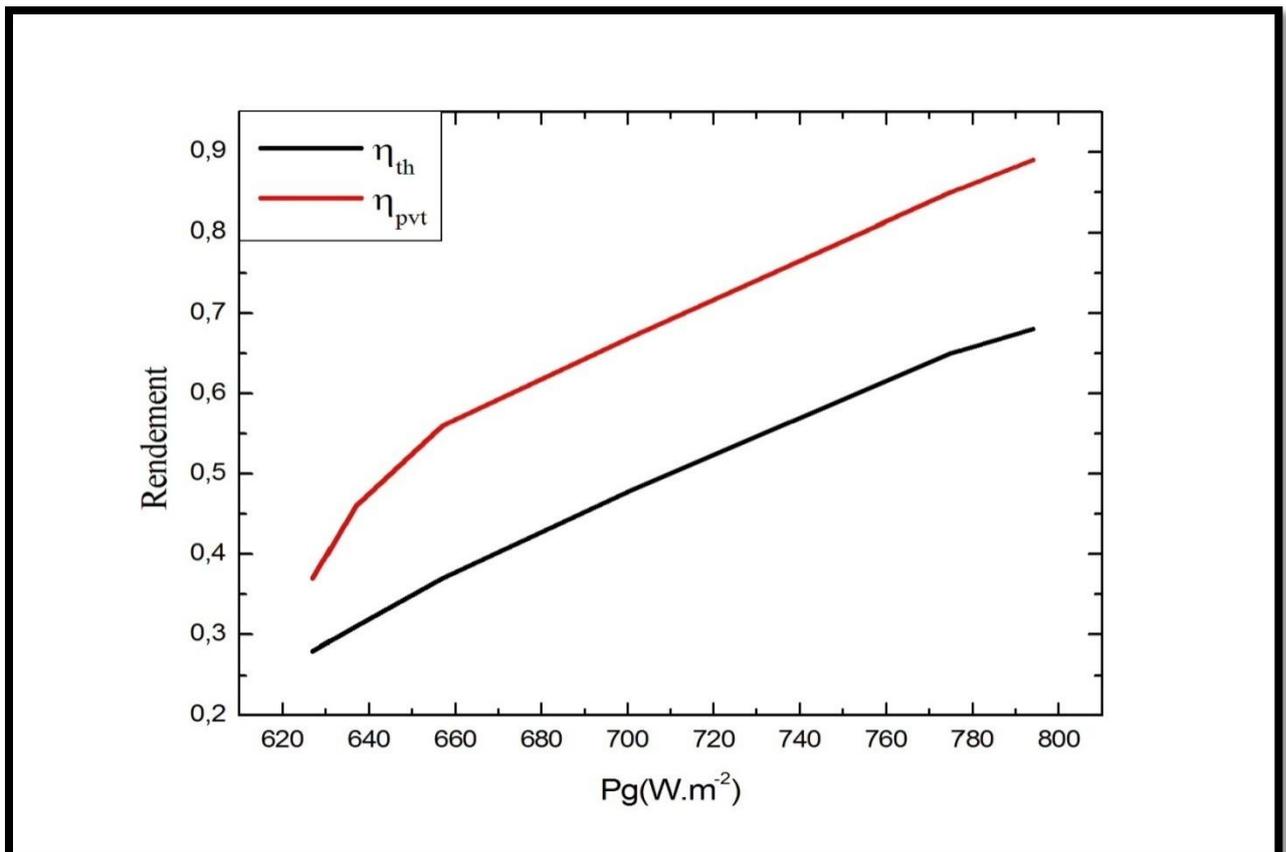


Figure IV.3: La variation de la température de la cellule et le fluide caloporteur en fonction d'éclairement



**Figure IV.4 : La variation du rendement d'un système thermique et un système hybride en fonction de l'éclairement**

#### **IV.5.CONCLUSION**

D'après les résultats obtenus on constate que les performances du module photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, particulièrement l'éclairement et la température, et le plus important que le rendement du système hybride est plus élevé par rapport à un système thermique.

# Conclusion générale

Une alternative intéressante aux modules photovoltaïques ordinaires est d'utiliser les générateurs photovoltaïques combinés avec les capteurs thermiques pour former les capteurs hybrides, le capteur ainsi réalisé permet de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur.

Ce travail nous a permis d'étudier le capteur hybride PVT à air, en déterminant ses performances thermiques et électriques, comme température des cellules et la température de sortie de fluide, le rendement électrique et thermique, pour différents valeurs de radiation solaire. Les résultats obtenus permettent de penser qu'il constitue une bonne alternative aux générateurs photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques séparément installés. La chaleur extraite pourrait alors être utilisée pour chauffer de l'eau ou être transformée en une autre énergie (mécanique ou électrique), de même pourrait aider à éviter le problème de 'hot spot' dans le générateur photovoltaïque. On augmenterait ainsi le rendement électrique du capteur et exploiter l'énergie thermique recueillie.

Dans une première partie nous avons définis les notions de base sur gisement solaire, Dans une seconde partie, nous avons cités les différents modèles utilisés différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur PVT, Enfin, dans le dernier chapitre nous avons fait une modélisation et simulation d'un capture hybride PVT aussi une expérience pour traiter l'effet de l'éclairement sur les caractéristiques de fonctionnement du capteur solaire et calcule le rendement du système hybride.

# **Bibliographie**

# *Bibliographie*

- [1] -**FATMI HAKIM**, « système hybride thermique photovoltaïque pour la production de l'eau distillée », mémoire de magister, Constantine (2012).
- [2]- **R. Bernard, G. Merguy, M. Schwartz**, « Le rayonnement solaire : conversion thermique et application ». Technique et documentation, deuxième édition, (1980).
- [3]- **C. P. De Brichambaut, C. Vauge**, « Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique », (1981).
- [4]- **Y. Jannot**, Thermique solaire, Paris (2007).
- [ 5]- **Y. Boualatfi**, Mémoire de magister, Ouargla, (2004).
- [6]- **R. Rahmani**, Mémoire de magister, Constantine (2007).
- [7]- **O. O. Badran, M. M. AbuKhader**, « Evaluating thermal performance of a single slope still », Heat Mass Transfert, Vol.43, (2007).
- [8]-**KhelifaAbdelkrim**, « généralité sur les transferts thermiques », Mémoire de magister, Batna(2011).
- [9] **BENSELLAMA Elhadi**, « modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique », mémoire fin d'études, Blida, (2006-2007).
- [10] **J, Bonal; P, Rossetti**. « Les énergies alternatives », Omniscience. (2007).
- [11] **O, Sotehi**. « Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire »; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [12] **P, H, Communay**. « Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs », Groupe de Recherche et d'Edition, France. (2002).

[13] **N, Bellel.** « Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur »; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).

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

[15] **T, Enrênez; J, P, Bibring; M, Blanc; M, A, Barucci; F, Roques, P, Zarka.**  
« Le système solaire », Éditions et EDP sciences, Paris. (2003).

[16] **U, Eiker.** « Solar technologies for buildings », John Wiley sans Sons, England.(2001).

[17] **F.A. peuser, K.H. remmers, M.schanauss,** « installations solaires thermiques conception et mise en œuvre », (2005).

[18] <https://abbassa.wordpress.com/lat-long-naama/>

## Résumé

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque, et causera une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement.

Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires photovoltaïques, et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y'a eu aussi l'aide d'exploiter ce phénomène par la combinaison DES systèmes photovoltaïques avec un système thermique pour former le capteur hybride (PVT) qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur.

L'objectif de ce travail est d'étudier théoriquement, et de modéliser le capteur hybride à travers la détermination des niveaux des températures de ses différentes couches et d'étudier son rendement thermique et enfin comparer ses performances avec d'autres configurations.

**Mot Clet :** Capteur solaire, Photo voltaïque, Thermique, hybride, Rendement thermique.

## Abstract

During the photovoltaic conversion of the solar collector a heat is generated what will increase the temperature of the photovoltaic cell and will cause a fall of its efficiency. This phenomenon is due to the part of the solar radiation not absorptive by the cells and which will cause its heating.

This heating was regarded as harmful for the output of the photovoltaic solar collectors. Several efforts were performed to evacuate this heat. Another way to exploit this phenomenon is by the combination of the photovoltaic system with a thermal one to form the hybrid collector (PVT) which will generate at the same time electricity and heat.

The objective of this work is to study theoretically and to model the hybrid collector through the determination of the levels of the temperatures of its various layers and to study its thermal efficiency, and finally to compare its performances with other configurations.

**Keywords:** Solar collector, Photovoltaic, Thermal, hybrid, Thermal efficiency.

## ملخص:

حرارة خلال عملية التحويل الكهروضوئي للوح الشمسي تنتج كمية معتبرة من الحرارة والتي تتسبب في ارتفاع درجة الخلايا الكهروضوئية وبالتالي تحد من فعاليتها. هذه الظاهرة ناتجة عن كمية الإشعاع الغير ممتص من طرف الخلايا الكهروضوئية مما يجعلها أكثر حرارة.

تعتبر هذه الحرارة العائق أمام فعالية الخلية الكهروضوئية لذا فالكثير من المجهودات تبذل من أجل هذه الأخيرة يمكن تخفيض حرارة الألواح الكهروضوئية بامتصاص الحرارة عن طريق انجاز نموذج للوح ثنائي الاستعمال بحيث يستطيع أن ينتج طاقة كهرومائية وحرارية في نفس الوقت. بهذه الوسيلة يمكن خفض الحرارة و بالتالي رفع المردود الكهرومائي للألواح.

الهدف من عملنا هذا هو دراسة النظرية و انجاز نموذج للوح ثنائي الاستعمال وتحديد درجة الحرارة عند كل طبقة ثم دراسة فعالية الحرارية و في الأخير إجراء مقارنة بين مزايا هذا النموذج مع مختلف الأشكال الأخرى. إن النتائج التي تحصلنا عليها تدل على أن اللوح يمكن أن يكون البديل بالنسبة للألواح الكهروضوئية و الحرارية المستعملة عادة بصفة مستقلة.

**الكلمات المفتاحية :** الألواح الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، الحرارة، لوح ثنائي الاستعمال، نموذج المردور