



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE JIJEL



FACULTE DES
SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



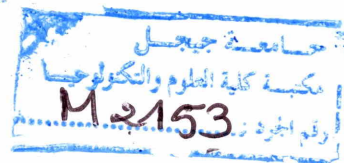
Département D'Electronique

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master en électronique
Option : Energie renouvelable



THEME

*Etude d'un capteur solaire hybride
photovoltaïque/thermique (PV/T) à air*



Réalisé par :

- M. Boubazine Yassine
- M. Bouchemlla Mohamed Badis

Encadré par :

Mme . Ghellab . A

Promotion 2014/2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Je remercie tout d'abord Allah de tout puissant qui nous éclaire le bon chemin.

Nous tenons à formuler notre gratitude et notre profonde reconnaissance à l'égard de notre promotrice. M^{me} GHELLAB Amel qui nous a toujours accueilli avec bienveillance et qui n'a ménagé ni son temps ni ses efforts pour nous guider.

Nos remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin nous exprimons notre profonde reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

DEDICACE

JE tiens a exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire madame : ghuallab amel

Je la remercie de m'avoir encadré, orienté ,aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs ,intervenants et toutes les personnes, qui par leurs paroles ,leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guide mes réflexions et ont accepter à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chères parents, Djamel et Habiba, qui ont toujours étaient là pour moi,

« vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts .vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

Je remercie mes frères Anis et Adem ainsi que mes oncles et mes tantes pour leurs encouragements et toute la famille pour leur soutien inconditionnel.

En fin ,je remercie tous mes ami(e)s que j'aime tant ,bouraoui omar mohamed benamior,sifeddin mejdoub,abdel hamid bounnar, boucherfra med reda.

Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.

A tous ces intervenants je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

M. Bouchmella Mohamed Badiss



DEDICACE

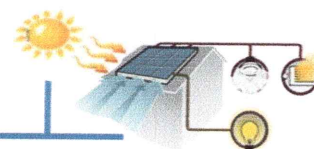
A ma mère

Yassine Boubazine



Nomenclature

| <i>Symboles</i> | <i>Désignations</i> | <i>Unités</i> |
|--------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| <i>Caractères grecs</i> | | |
| δ | Déclinaison du soleil | degré |
| ω | Angle horaire | degré, h |
| β | Inclinaison du capteur | degré |
| λ | Longueur d'onde | m |
| ν | Fréquence | Hz |
| τ | Coefficient de transmission | - |
| ρ | Albédo ou coefficient de réflexion | - |
| θ | Angle | degré |
| α | Coefficient d'absorption | - |
| β_c | Facteur de remplissage | - |
| η | Rendement | - |
| σ | Constante de Boltzmann | $W.m^{-2}.K^{-4}$ |
| <i>Caractères latins</i> | | |
| L | Longueur ou longitude | m, degré |
| ϕ | Latitude | degré |
| N | Nombre du jour | - |
| h | Hauteur du soleil | degré |
| a | Azimut | degré |
| i | Angle d'incidence | degré |
| C | Vitesse de lumière | $m.s^{-1}$ |
| r | Pouvoir réflecteur | - |
| n | Indice de réfraction | - |
| e | Épaisseur | m |
| P | Puissance | $W.m^{-2}$ |
| T | Température | K |
| S | Surface du capteur | m^2 |
| H_r | Coefficient d'échange par rayonnement | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| H_c | Coefficient d'échange par conduction | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| H_v | Coefficient d'échange par convection | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| C_p | Chaleur spécifique | $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |



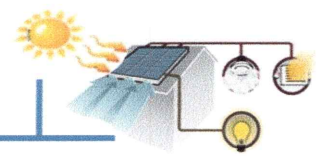
| | | |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| W | Largeur | m |
| G_f | Débit d'air | Kg.s^{-1} |
| V | Vitesse | m.s^{-1} |
| D | Diamètre | m |
| U | Coefficient des pertes globales | $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ |
| Indices | | |
| dir | Direct | - |
| dif | Diffus | - |
| s | Sol | - |
| g | Global | - |
| v | Verre | - |
| t | Tedlar | - |
| ab | Absorbeur | - |
| c | Cellule | - |
| el | Électrique | - |
| ref | Référence | - |
| is | Isolant | - |
| i | Interne | - |
| e | Externe | - |
| f | Fluide | - |
| the | Thermique | - |
| STC | Test standard condition | - |
| Abréviations | | |
| T_{SV} | Temps solaire vrai | h |
| T_{SM} | Temps solaire moyen | h |
| E_t | Équation du temps | h |
| T_U | Temps universel | h |
| T_L | Temps légal | h |
| ΔH | Écart horaire | h |
| PV | Photovoltaïque | - |
| PV/T | Photovoltaïque thermique | - |
| HPV/T | Hybride Photovoltaïque/Thermique | - |



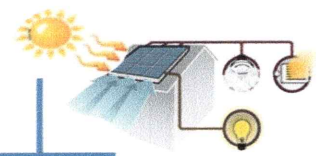
Liste des figures

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure I.1 : le cycle des saisons.....</i> | <i>04</i> |
| <i>Figure I.2 : La course du soleil à 45° de latitude nord.....</i> | <i>04</i> |
| <i>Figure. I.3:La variation de l'irradiation.....</i> | <i>05</i> |
| <i>Figure. I.4 : Rayonnement solaire annuel.....</i> | <i>06</i> |
| <i>Figure. I.5 : Le rayonnement solaire.....</i> | <i>06</i> |
| <i>Figure. I.6: angle horaire ω du soleil.....</i> | <i>07</i> |
| <i>Figure. I.7: hauteur angulaire ($h = \gamma$) et azimut ($a=\psi$) du soleil.....</i> | <i>07</i> |
| <i>Figure.I.8 :L'irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de Juillet.....</i> | <i>09</i> |
| | |
| <i>Figure II.1 : La cellule PV en Silicium.....</i> | <i>11</i> |
| <i>Figure II.2.1 : Cellule en silicium cristallin</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure II.2 .2 : Cellule monocristalline.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Figure II.2.3 : La cellule poly cristalline.....</i> | <i>13</i> |
| <i>Figure II.2 .4 : cellules à couches minces.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figure II.2.5.a : Le module rigide et le module souple en silicium amorphe.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figure II.2 .5.b : cellule de tellurure de cadmium.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figure II.2.5.c : La cellule solaire CIGS.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Figure II.3 : Le module photovoltaïque.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure II.4 : les couches du module photovoltaïque.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Figure II.5 : Les éléments du système photovoltaïque.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Figure II.6 : Le point de puissance maximale PMPP.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figure II.7 : Le courant de court-circuit I_{cc}.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Figure II.8 : tension en circuit U_{co}.....</i> | <i>19</i> |





| | |
|---|-----------|
| <i>Figure II.9 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Figure II.10 : Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Figure III.1: Schéma descriptif prototype hybride PV/T à eau.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Figure III.2. Une vue en coupe transversale collecteur hybride PV / T (verre-tedlar).....</i> | <i>25</i> |
| <i>Figure III.3: Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figure III.4 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque de pompage d'eau.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figure III.5 : schéma synoptique d'un chauffe-eau solaire.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figure III .6 : Capteur avec des chicane rectangulaire sur la plaque inférieure en bois.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figure III.7 : schéma d'un capteur solaire à air double passage.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Figure V.1 : un capteur HPV/T à air.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figure V.2 : Les éléments d'un capteur HPV/T à air.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figure V.3 : La coupe transversale dans un capteur PV/T à air.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figure V.4 :L'analogie électrique.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figure VI.1 : La variation temporelle du rayonnement solaire global.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Figure VI.2 : La variation temporelle de la température ambiante et la température du ciel.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figure VI.3 : La variation temporelle des puissances absorbées par les couches du capteur.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Figure VI.4 : La variation temporelle des températures de chaque composant du capteur.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Figure VI.5 : La variation de la puissance électrique.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figure VI.6 : La variation du rendement électrique.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Figure VI.7 : La variation du rendement thermique.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Figure VI.8 : La variation temporelle du rendement global.....</i> | <i>53</i> |



Liste Tableaux

Tableau V.1 :L'analogie entre le transfert thermique et l'électricité.....33



Sommaire

Introduction générale..... 01

Chapitre I : Gisement solaire

I.1. Introduction 3
I.2. La constante solaire..... 3
I.2.1. L'ensoleillement..... 5
I.2.2. Les données d'ensoleillement..... 6
I.3. Comment mesurer l'ensoleillement 6
I.4. Le potentiel solaire en Algérie 9

Chapitre II : Caractéristiques des cellules photovoltaïques

II.1.Introduction.....10
II.2. Le principe de fonctionnement.....10
II.3. Les technologies des cellules solaires11
II.3.1. Les cellules en silicium cristallin12
II.3. 2. Les cellules monocristallines.....12
II.3. 3. Les cellules poly cristallines.....13
II.3. 4. Les cellules à couches minces.....13
II.3. 5. a. Le silicium amorphe14



II.3. 5.b. Le tellurure de cadmium ou le sulfure de cadmium.....14

II.3. 5.c. Les cellules $CuInSe_2$ (CIS) et $CuInGaSe$ (CIGS).....15

II.4. Le module photovoltaïque.....16

II.5. Les éléments du système photovoltaïque.....17

II. 6. Caractéristiques électriques d'une cellule.....18

II. 7. Rendement de la cellule photovoltaïque22

Chapitre III : Recherche bibliographique

III.1. Introduction.....23

III.2. Capteur solaire hybride PVT.....23

Chapitre IV : Bilan thermique d'un capteur solaire hybride PV/T à air

IV.1.Introduction.....30

IV.2. La description d'un capteur HPV/T à air30

a) Le panneau photovoltaïque.....32

b) Le canal d'air32

c) L'absorbeur.....32

d) L'isolant32

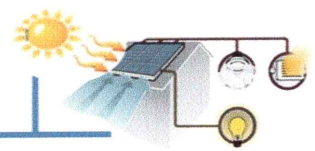
e) Plaque métallique arrière.....32

IV.3. La modélisation du système.....33

IV.4. Le tableau d'analogie électrique33

IV.5. Les hypothèses de simplification34

IV.6.Le bilan énergétique34



IV.7. Le schéma électrique.....36
IV.8. La mise en équation du système.....37
IV.10. La résolution du système d'équations.....42
*IV.11. L'organigramme développé pour le calcul numérique des paramètres
inconnus42*

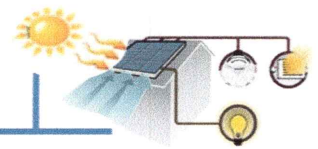
Chapitre V : Interprétations et discussions des résultats

V.1. Introduction.....44
V.2. La variation du rayonnement global44
V.3. La variation de la température ambiante et la température du ciel.....45
*V.4. La variation temporelle des puissances absorbées par les couches du
capteur.....46*
V.5. La variation des températures.....48
V.6. La variation de la puissance électrique.....49
V.7. La variation du rendement électrique50
V.8. La variation temporelle du rendement thermique.....51
V.9. Variation temporelle du rendement global52

Conclusion générale.....54

Annexe A

A. La méthode de Gauss Seidel.....55
A.1. Principe de la méthode de Gauss Seidel55
A.2. La condition de convergence.....56




Annexe B

B.1. Les caractéristiques physiques appliquées au capteur ($S=1m^2$).....57

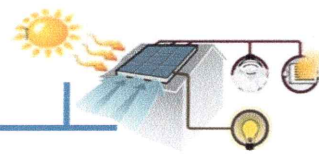
B.2. Le calcul de la température ambiante58

B.3. Les caractéristiques thermo-physiques de l'air.....59

Bibliographie.....60



Introduction
générale



Introduction générale

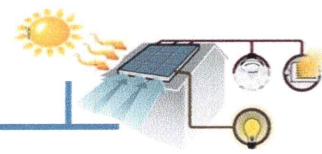
Dernièrement un grand développement des énergies renouvelables telles que les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques, éoliennes, piles à combustibles ...etc a été enregistré. Cela a conduit à une combinaison des systèmes des différentes sources d'énergies, ces systèmes sont appelées aussi les systèmes hybrides et ils sont utilisés pour fournir plusieurs besoins énergétiques. Parmi ces différents types de systèmes hybrides nous allons étudier dans ce travail le système hybride photovoltaïque thermique appelé communément PVT.

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une tension 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 est 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'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison du système photovoltaïque avec un système thermique pour former le capteur hybride PVT qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur.

Le rendement électrique du capteur hybride PVT pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur des cellules solaires, ce qui va le refroidir en même temps.[1]

L'objectif de notre travail est d'étudier théoriquement et de modéliser le capteur hybride à travers la détermination des niveaux des températures de ces différentes couches et ainsi d'étudier l'influence de quelques paramètres sur ses performances électriques et thermiques, ainsi de déduire une configurations (type absorbeur) qui influent directement sur le coût et le rendement.

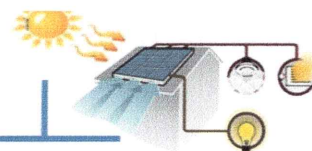


Ce mémoire est divisé en cinq chapitres :

- **Le premier chapitre :** présente certaines notions de base préliminaires relatives au gisement solaire.
- **Le deuxième chapitre :** comprend d'abord une étude des technologies intervenantes dans les industries des capteurs PV, ainsi que leurs caractéristiques et leurs principes de fonctionnement
- **Le troisième chapitre:** est consacré à une synthèse bibliographique sur les conceptions des capteurs solaires hybrides PV/T à air c'est-à-dire pour différents modèles et géométries du canal d'air.
- **Le quatrième chapitre :** la modélisation numérique du comportement énergétique du capteur, ainsi que le bilan énergétique au niveau de chaque couche de dispositif et les échanges de chaleur, en plus la résolution mathématique du système utilisant la méthode itérative de Gauss Seidel en langage MATLAB.
- **Le cinquième chapitre :** comporte les interprétations des résultats obtenus par la simulation et leurs discussions, il renferme donc les déductions dénichées par notre étude.



Chapitre I
Gisement solaire



Gisement solaire

I.1. Introduction

L'énergie solaire est la plus dominante de toute l'énergie renouvelable, elle est l'une des plus facilement exploitables, comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettant d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir : Les grandeurs astronomiques, les grandeurs géographiques, le rayonnement solaire hors atmosphère, le rayonnement direct, diffus et global. [2]

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 (soit à environ 80 km d'altitude) 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} . En première approximation, on peut calculer la valeur de I_c en fonction du numéro du jour de l'année n_j par la relation suivante :

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

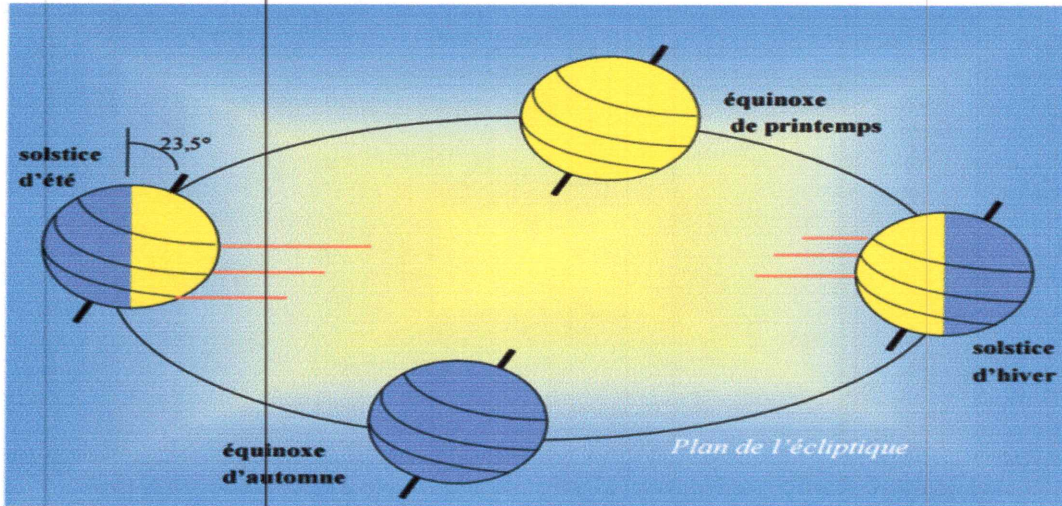
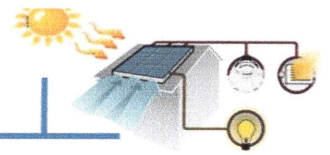


Figure I.1 : le cycle des saisons[2]

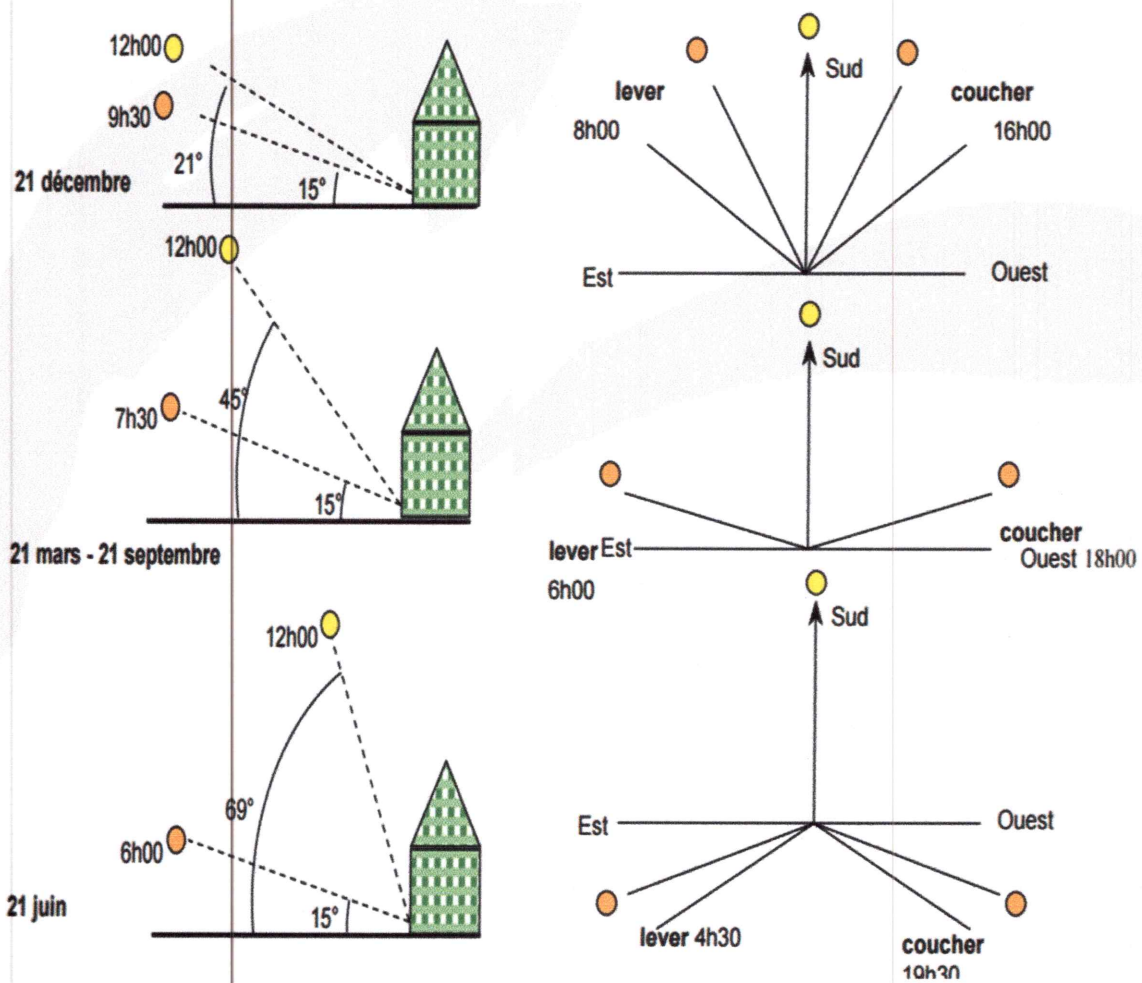
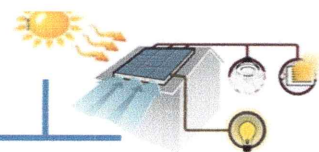


Figure I.2 : La course du soleil à 45° de latitude nord [2]



I.2.1.L'enseillement :

L'enseillement est représenté par le rayonnement électromagnétique. Il dépend de la longueur d'onde du rayonnement (certaines longueurs d'onde sont absorbées partiellement ou totalement par les particules de l'atmosphère). [2]

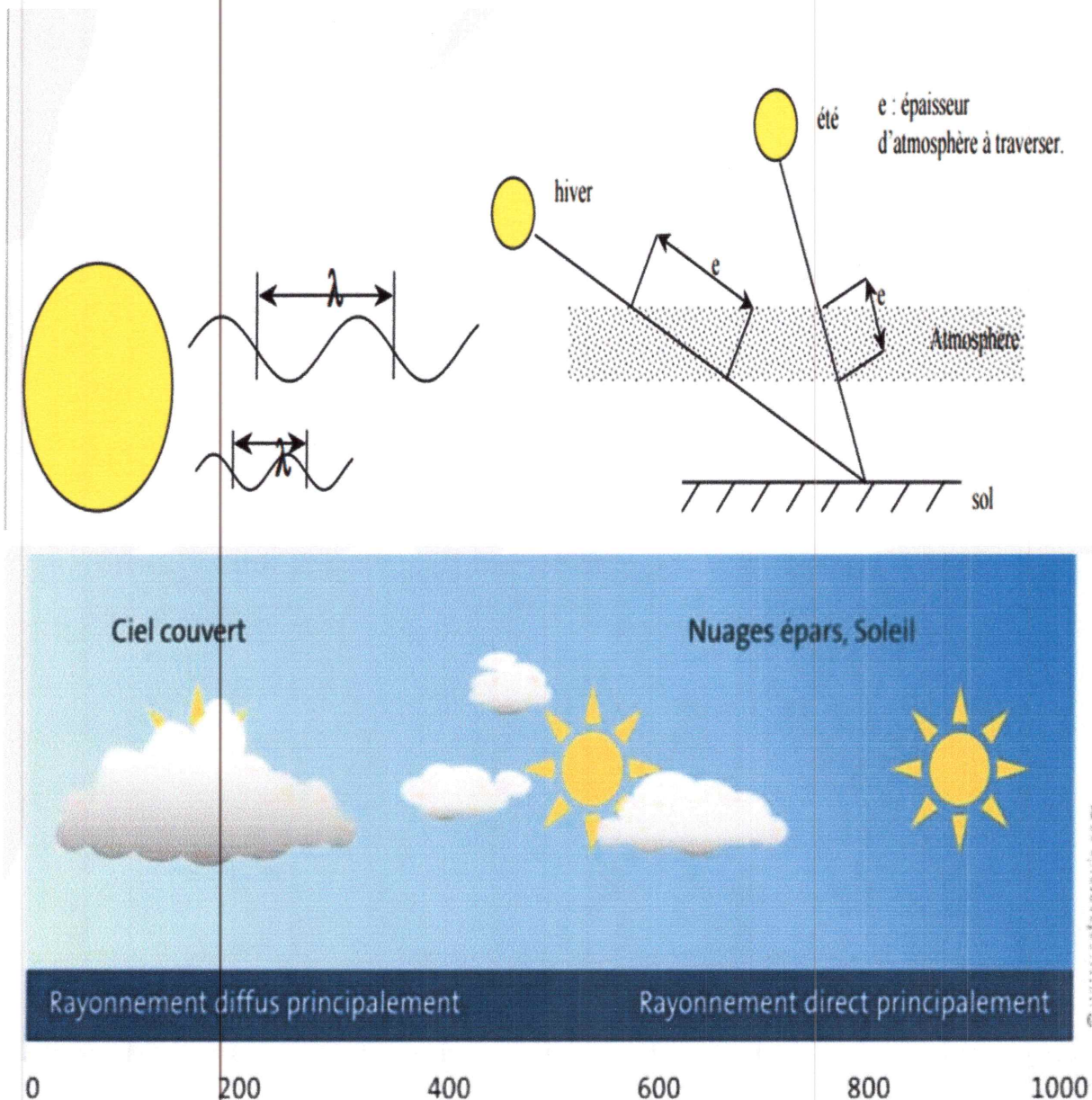
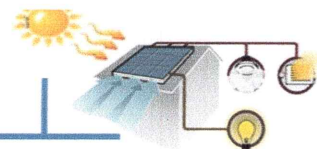


Figure. I.3:La variation de l'irradiation [2]



I.2.2. Les données d'ensoleillement :

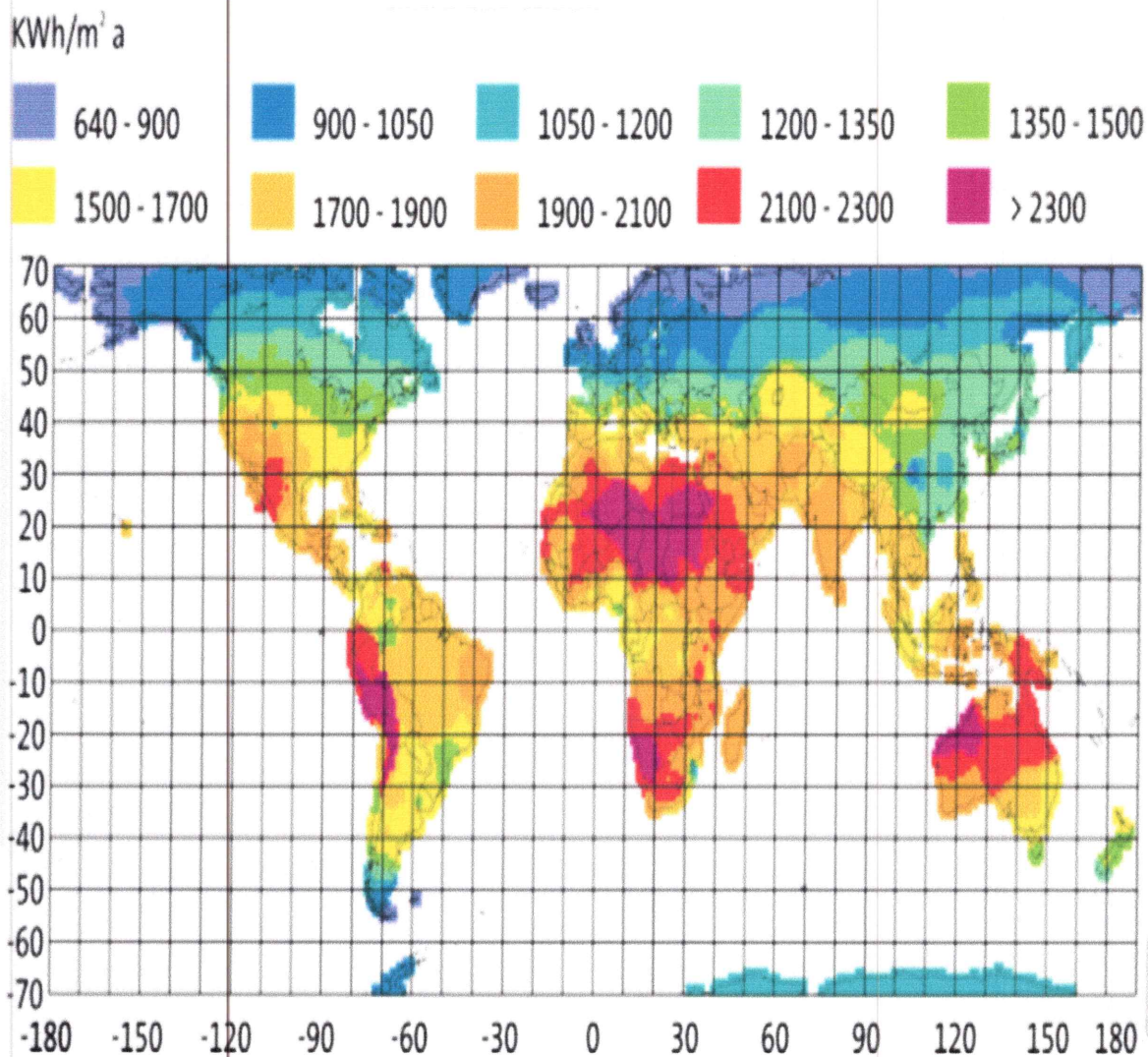


Figure. I.4 : Rayonnement solaire annuel [2]

I.3. Comment mesurer l'ensoleillement :

Le rayonnement solaire est concentré dans une lentille sphérique et vient brunir une bande de papier défilant à vitesse constante. On détermine ainsi le temps d'ensoleillement quotidien, ce qui permet de calculer la fraction solaire. L'élément photosensible situé sous la cloche produit un courant d'intensité proportionnel au rayonnement incident.

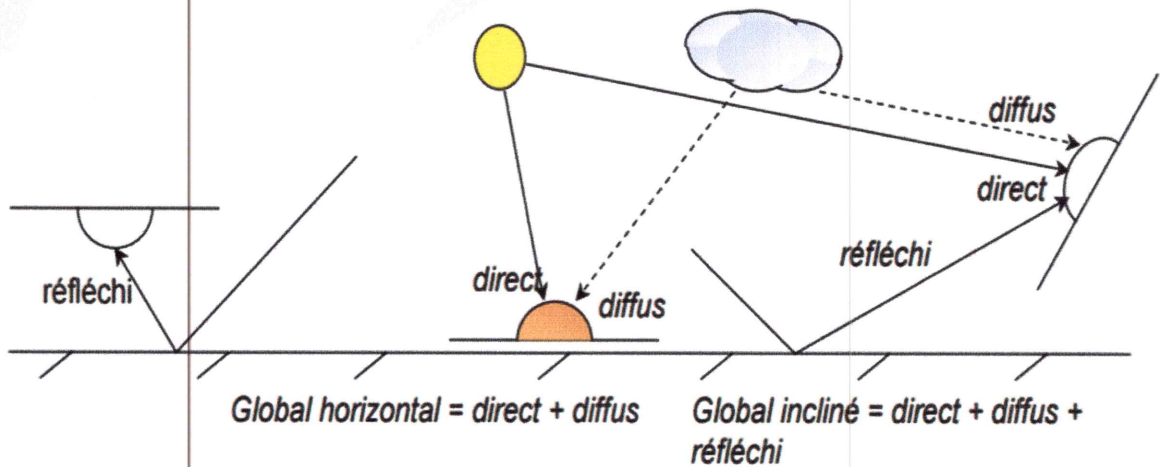
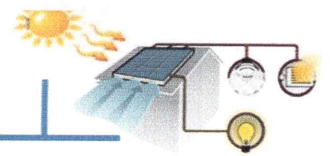


Figure. I.5 : Le rayonnement solaire [2]

➤ **L'angle horaire ω (ou AH) :**

L'angle horaire ω (encore noté AH) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en ° d'angle, $\omega = 15(TSV - 12)$ où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures.

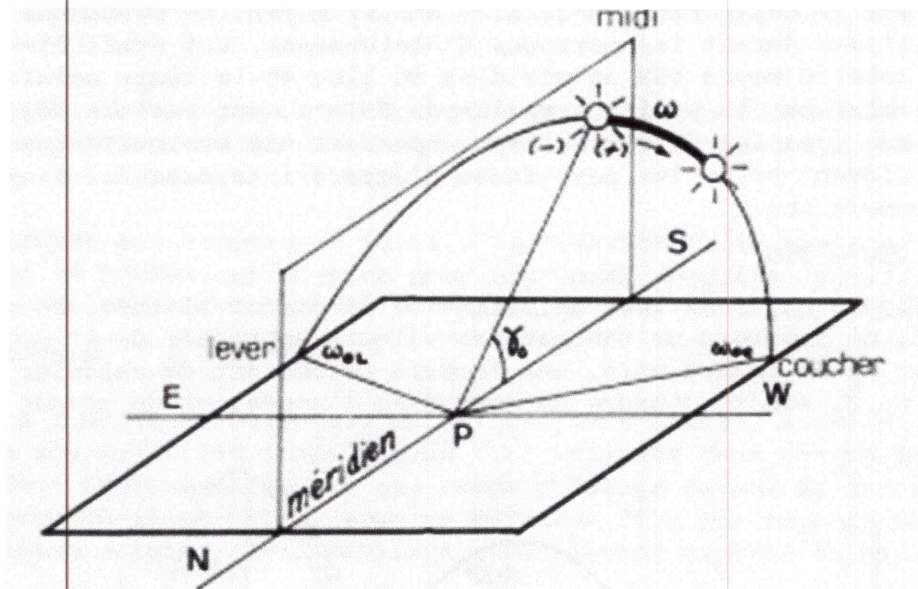
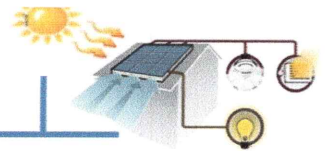


Figure. I.6: angle horaire ω du soleil

➤ **Hauteur angulaire :**

C'est l'angle h formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Il est donné par la relation:

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \tag{I.1}$$



Où ϕ , δ , ω , sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur h , on peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil.

On trouve, en faisant $h=0$,

$$\cos \omega_0 = -\operatorname{tg}\phi \operatorname{tg}\delta \tag{I.2}$$

Et la durée astronomique du jour s'obtient tout aussi facilement en faisant:

$$D_0 = \frac{2}{15} \cdot \arccos(-\operatorname{tg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta) \tag{I.3}$$

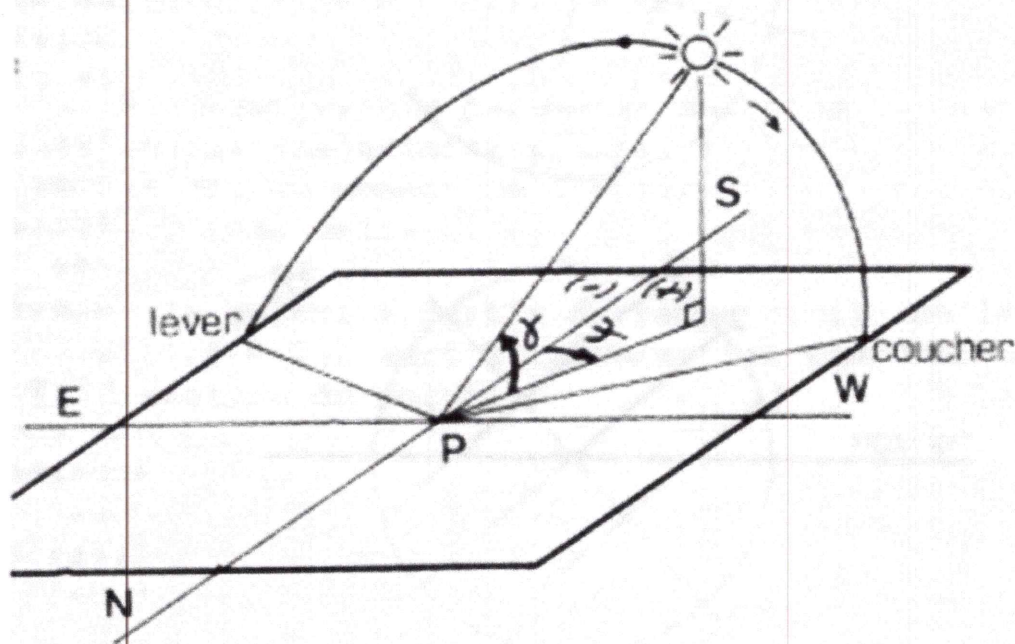


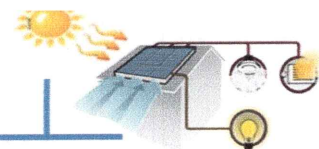
Figure. I.7: hauteur angulaire ($h = \gamma$) et azimut ($a = \psi$) du soleil

➤ **Azimut :**

C'est l'angle a compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil.

La connaissance de l'azimut est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. L'origine des azimuts correspond à la direction du Sud dans l'hémisphère Nord.

L'angle d'azimut est compté positivement vers l'Ouest. L'azimut est relié à l'angle horaire, la



hauteur et la déclinaison par la relation:

$$\text{Sin } a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{I.4})$$

I.4. Le potentiel solaire en Algérie :

Le potentiel solaire algérien figure parmi l'un des plus importants au monde ,il représente dix fois la consommation mondiale en énergie, est à même d'assurer l'énergie nécessaire aux différentes applications industrielles, pour peu que les capacités technologiques dans ce domaine connaissent un accroissement significatif. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays [3].

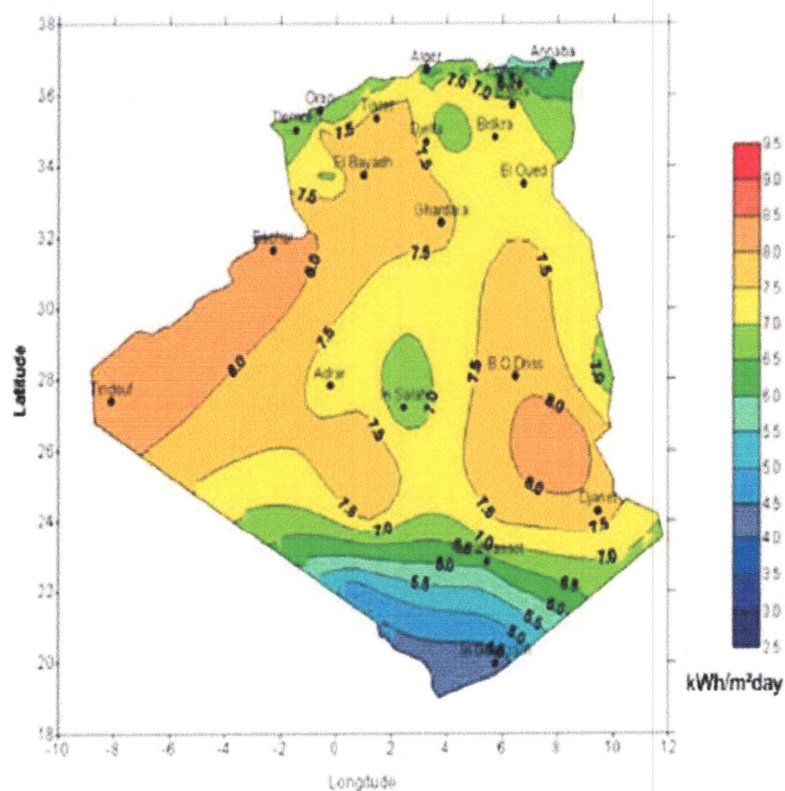


Figure.I.8 : L'irradiation globale journalière reçue sur un plan horizontal au mois de Juillet. [3]



Chapitre II
Caractéristiques des
cellules
photovoltaïques



Caractéristiques des cellules photovoltaïques

II.1. Introduction

Le terme photovoltaïque vient du mot grec photos qui signifie lumière et du nom du physicien italien volta ; ce dernier fut l'inventeur de la pile électrique en 1800. Mais l'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel, qui a mis en évidence la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière .

Notons que l'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs : silicium (Si), tellure de cadmium (CdTe), arséniure de gallium (GaAs), matériau à base de cuivre, ...etc. A la différence d'une pile classique, dont l'énergie est stockée et restituée à volonté, la « photopile » ne produit de l'électricité que si elle est exposée à la lumière. Cette différence est fondamentale. Dans ce chapitre nous allons aborder le phénomène photovoltaïque pour la conversion de la lumière en électricité. [4]

II.2. Le principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'élément de base de l'effet photovoltaïque (ou conversion par photopiles) permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce phénomène implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (qui est la plupart du temps, le silicium). Dans la surface de ce matériau, les photons transfèrent leur énergie aux électrons contenus dans la matière dopée négativement et positivement (jonction p-n). Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique continu I (CC) qui est recueilli par des fils métalliques très fins micro-soudés en surface (voir Figure II.1).

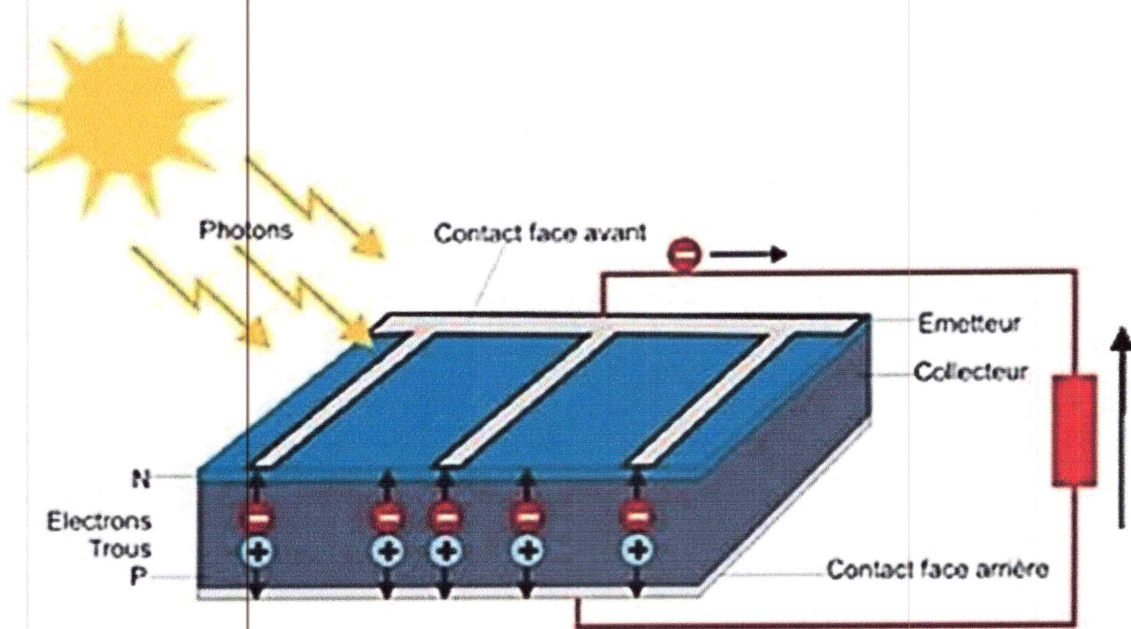
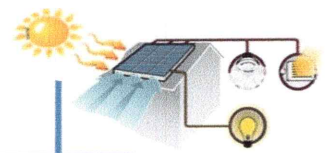


Figure II.1 : La cellule PV en Silicium. [5]

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charge N) et des trous (charge P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I) et dépend fortement d'un niveau d'éclairement.

II.3. Les technologies des cellules solaires

Toutes les technologies relatives à capter l'énergie solaire pour générer l'électricité directe sont décrites comme photovoltaïques. Cependant, cette technologie est subdivisée en couche mince, cristalline, semi-conducteur composé et de la nanotechnologie.



II.3.1. Les cellules en silicium cristallin

Pour la première génération, les cellules PV se composaient d'une structure cristalline, utilisant du silicium (Si) pour produire des cellules solaires qui sont combinées pour créer des modules PV monocristallins ou poly cristallin.

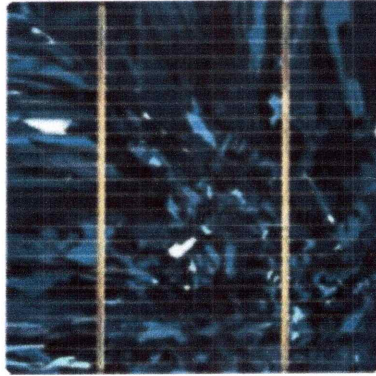


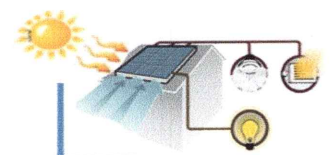
Figure II.2.1 : Cellule en silicium cristallin.

II.3. 2. Les cellules monocristallines

Parmi les nombreux matériaux disponibles pour les cellules solaires, le semi-conducteur le plus largement utilisé est le silicium monocristallin. Ce dernier est le plus prometteur, car il est une matière abondante (27 % de la croûte terrestre), ensuite il possède un potentiel pour des performances élevées. Aujourd'hui, les meilleures cellules solaires sont en Si monocristallin, leur rendement est de l'ordre de 24,7 %. [6].



Figure II.2 .2 : Cellule monocristalline.



II.3. 3. Les cellules poly cristallines

Ces cellules sont fabriquées à partir des déchets provenant du tirage de monocristaux à température et atmosphère contrôlées. Cette technologie est de plus en plus intéressante, car elle est maîtrisée sur le plan industriel et offrant un bon rapport de qualité de prix. Ces cellules sont un peu moins efficaces (15 %) que le monocristallin [7].

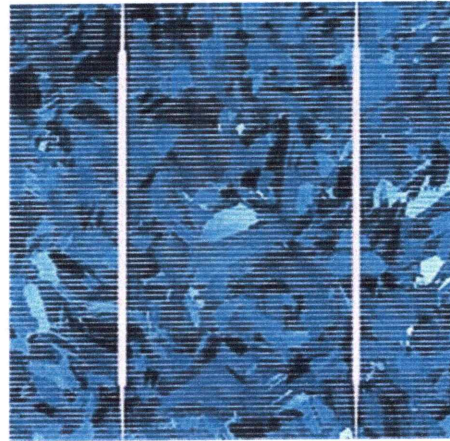


Figure II.2.3 : La cellule poly cristalline.

II.3. 4. Les cellules à couches minces

Contrairement aux formes cristallines où les tranches des semi-conducteurs sont prises en sandwich entre les plaques de verre, les cellules à couches minces sont créées par dépôt de couches minces par plasma de certains matériaux sur un substrat de verre ou acier inoxydable. L'avantage de cette méthode réside dans le fait que l'épaisseur des couches déposées qui sont à peine de quelques micros (inférieur $10\mu\text{ m}$) d'épaisseur par rapport à des plaquettes cristallines qui tendent d'être de plusieurs centaines de microns, en plus il est possible de les déposer sur des feuilles qui permettent la création des modules photovoltaïques souples. L'avantage qui en résulte est un abaissement des coûts de fabrication en raison du processus de dépôt à haut débit ainsi que la baisse du coût des matériaux. Techniquement, parlant du fait que les couches sont beaucoup plus minces, les rendements de ces modules sont moins élevés que ceux cristallins, bien que la possibilité de déposer de nombreux matériaux différents et alliages qui a permis une amélioration considérable sur l'efficacité[7].

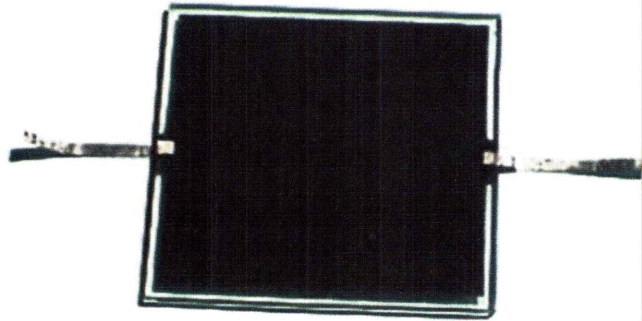
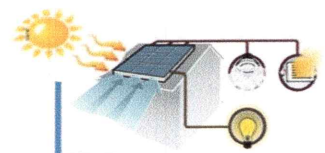


Figure II.2.4 : cellules à couches minces.

II.3. 5. a. Le silicium amorphe

Le silicium amorphe (a-Si) est l'une des premières technologies de couches minces développées, cette technologie est dérivée à partir du silicium cristallin, ce qui permet d'avoir une absorption du rayonnement beaucoup plus que le silicium cristallin à cause de gap qui atteint 1.7eV (Si cristallin 1.1 eV). Il existe plusieurs variantes de cette technologie où les substrats peuvent être en verre rigide ou souple, à jonction tandem double et jonctions triples et chacun a une performance différente[7].

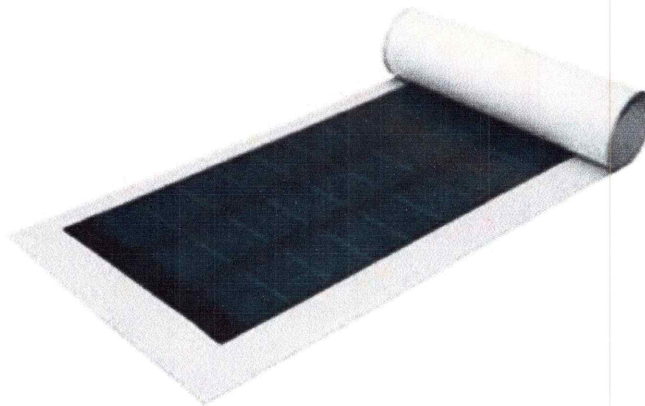


Figure II.2.5.a : le module souple en silicium amorphe.

II.3. 5.b. Le tellure de cadmium ou le sulfure de cadmium

En raison de son coefficient d'absorption élevé et la facilité de faire un dopage de type P pour le tellure de cadmium (CdTe), il est actuellement le matériau le plus populaire pour les cellules solaires en couches minces, de plus il est compatible avec CdS. La toxicité du cadmium (Cd) pose des obstacles pour le développement de ces technologies, surtout après la directive ROHS qui a interdit l'utilisation du cadmium dans les produits électroniques et électriques [8].

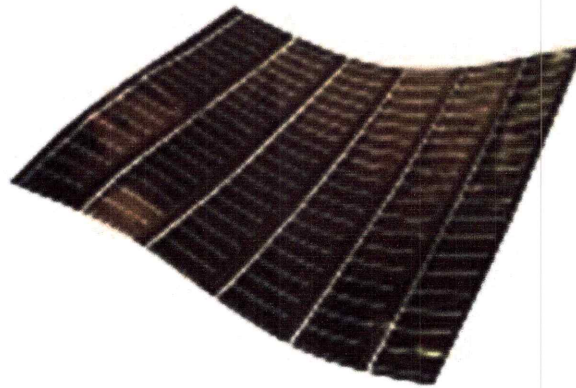
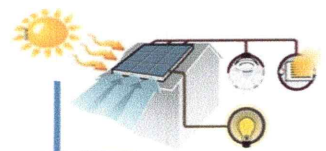


Figure II.2.5.b : cellule de tellurure de cadmium

II.3. 5.c. Les cellules CuInSe_2 (CIS) et CuInGaSe (CIGS)

Le $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ a été découvert en 1974 comme détecteur de lumière photovoltaïque. En 1975, une cellule solaire a été fabriquée avec ces matériaux qui ont montré un rendement comparable aux cellules solaires en silicium à ce moment. En 2000, le rendement des cellules à couche mince CIGS solaires a atteint 19,9 % ce qui le rend comparable avec celui des cellules solaires en silicium poly cristallin. La bande interdite de CuInSe_2 est très proche de la valeur optimale, mais son coefficient d'absorption est d'environ 100 fois plus grandes que le silicium. Par conséquent, bien que les films semi-conducteurs des cellules **CIS** et **CIGS** soient aussi minces que 2 μm , 90 % de la lumière proche au rayon infrarouge et au rayon visible est absorbée [8].

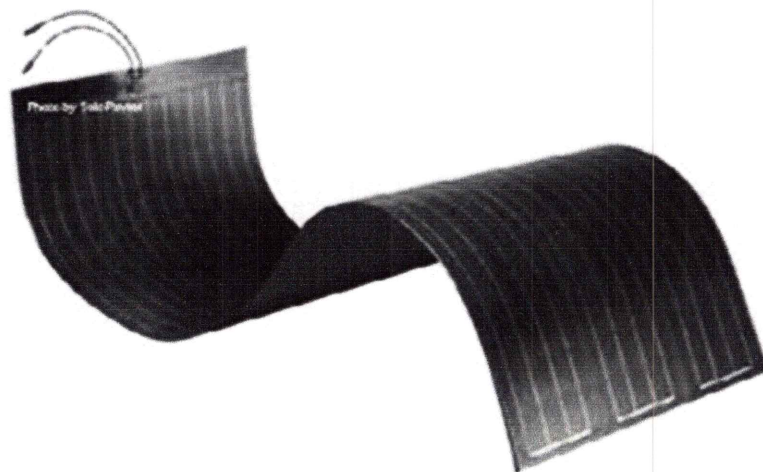
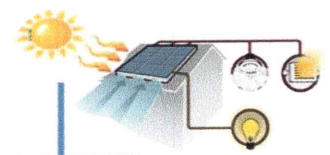


Figure II.2.5.c : La cellule solaire CIGS



II.4. Le module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module (Figure III.3). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même

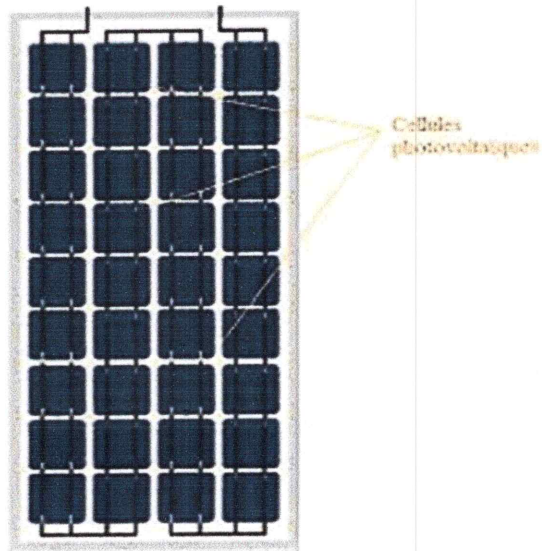
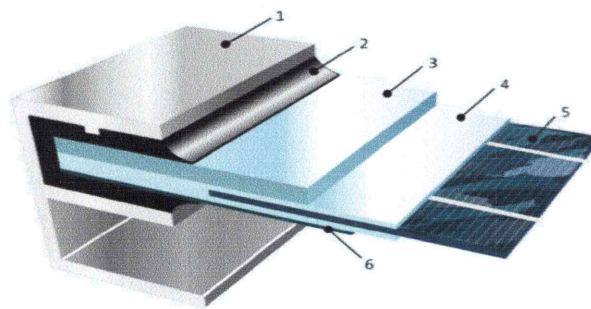


Figure II.3 : Le module photovoltaïque.

courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant et conserve la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par une encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyle-acétate), de plus par l'avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique en suite par l'arrière grâce au tedlar.[5]



- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1. Cadre en aluminium | 4. Support EVA |
| 2. Joint d'étanchéité | 5. Cellule cristalline |
| 3. Verre | 6. Film Tedlar |

Figure II.4 : les couches du module photovoltaïque [5]



II.5. Les éléments du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque se compose généralement de trois éléments : le panneau PV, une batterie et un régulateur, en cas où on veut se connecter au réseau électrique on utilise les onduleurs.

1 - Le panneau PV

Le rôle d'un panneau PV caractérisé par une puissance et un rendement est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité en sous forme d'un courant continu.

2 - La batterie

Généralement, on stocke l'énergie électrique produite par le panneau PV dans des batteries.

3 - Le régulateur

Pour que la batterie dure plus longtemps il faut contrôler l'état de la batterie, pour cela on utilise des régulateurs qui contrôlent la surcharge et la décharge de la batterie.

4 - L'onduleur

Il convertie le courant continu en courant alternatif en cas de connexion du système PV au réseau électrique.

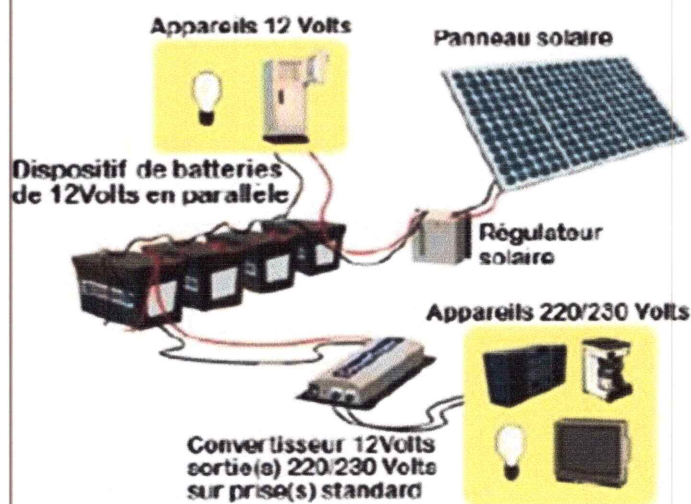


Figure II.5 : Les éléments du système photovoltaïque. [5]



II. 6. Caractéristiques électriques d'une cellule :

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre. Trois points sont importants sur cette courbe :

1. Le point de puissance maximale PMPP - (Maximum Power Point) : c'est quand la charge a une résistance égale à Rechargé (droite verte) que la cellule délivre la puissance maximale.

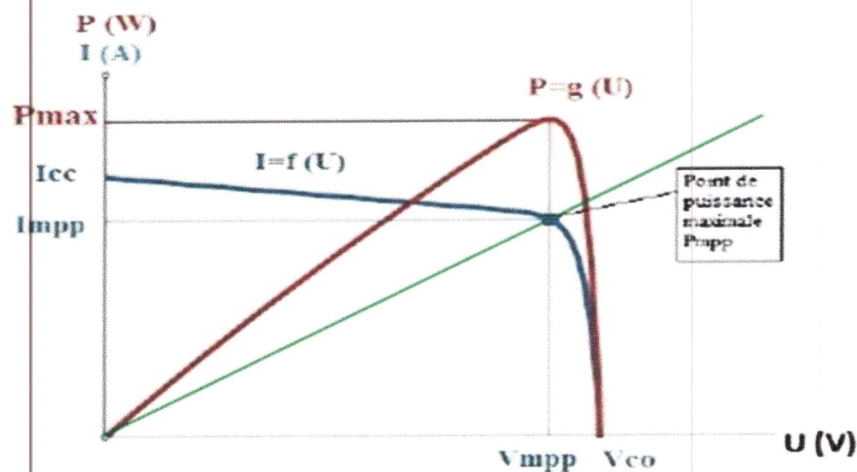


Figure II.6 : Le point de puissance maximale PMPP.

2. Le courant de court-circuit noté I_{cc} : il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.[5]

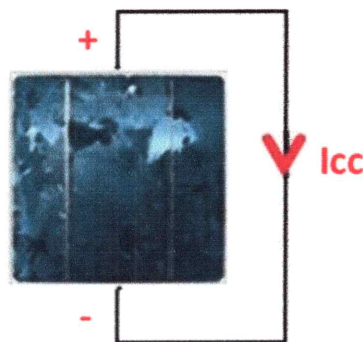
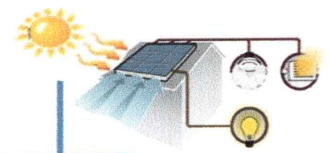


Figure II.7 : Le courant de court-circuit I_{cc} .



3. tension en circuit ouvert notée U_{co} : il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.

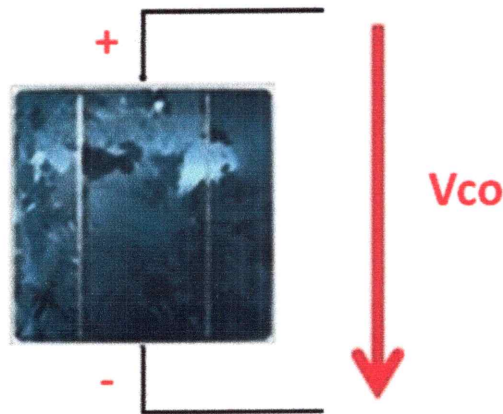


Figure II.8 : tension en circuit U_{co} .

La figure II.9 : représente le schéma équivalent de la cellule solaire, avec deux résistances complémentaire R_s et R_p . c'est le model de Singer [5]

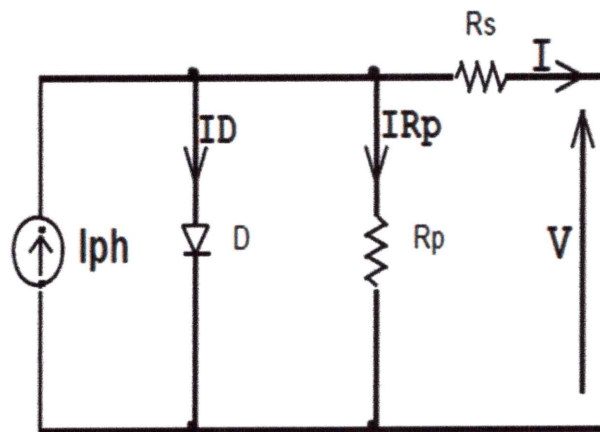
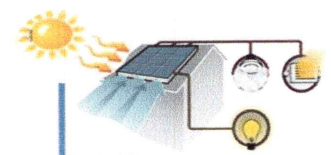


Figure II.9 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque



R_p : est la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour du capteur photovoltaïque ;

R_s : prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque du silicium ;

I_{ph} : est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode D représente la jonction PN de la cellule.

Les cinq paramètres de ce modèle sont donc : I_{ph} , I_0 , R_s , R_p et α .

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{II.1})$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(e \left(\frac{V + I R_s}{\alpha K T} \right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec R_s la résistance série de la cellule (α), R_p la résistance parallèle (α). α facteur d'idéalité, T la température de la cellule (K), (e) la charge élémentaire d'électron ($1.6021 \cdot 10^{-19}$ C), k la constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹).

La caractéristique $I=f(V)$, ainsi que la courbe $P=f(V)$ permet d'obtenir les paramètres fondamentaux suivants :

Courant de court-circuit I_{sc} , c'est le courant maximum généré par la cellule ; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court-circuit avec une tension nulle, puisque $R_s \gg R_p$ on peut mettre $I_{sc} \approx I_{ph}$

Tension à circuit ouvert V_{oc} ; c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré est nul. Elle reflète la tension de seuil de la jonction PN . En négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle R_p , V_{oc} est exprimée comme suit :

$$V_{oc} = \frac{\alpha K T}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{II.3})$$



Où

$V_t = \frac{\alpha k T}{e}$ connue sous le nom de tension thermique et I_0 le courant de saturation de la diode D .

Point de puissance maximale, c'est le point de fonctionnement (V_{mp} , I_{mp}) où la cellule solaire génère sa puissance maximale : $P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$.

Facteur de remplissage FF (Fill Factor en anglais) ; il correspond au rapport de la puissance maximale sur le produit de V_{oc} et I_{sc} : $FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$

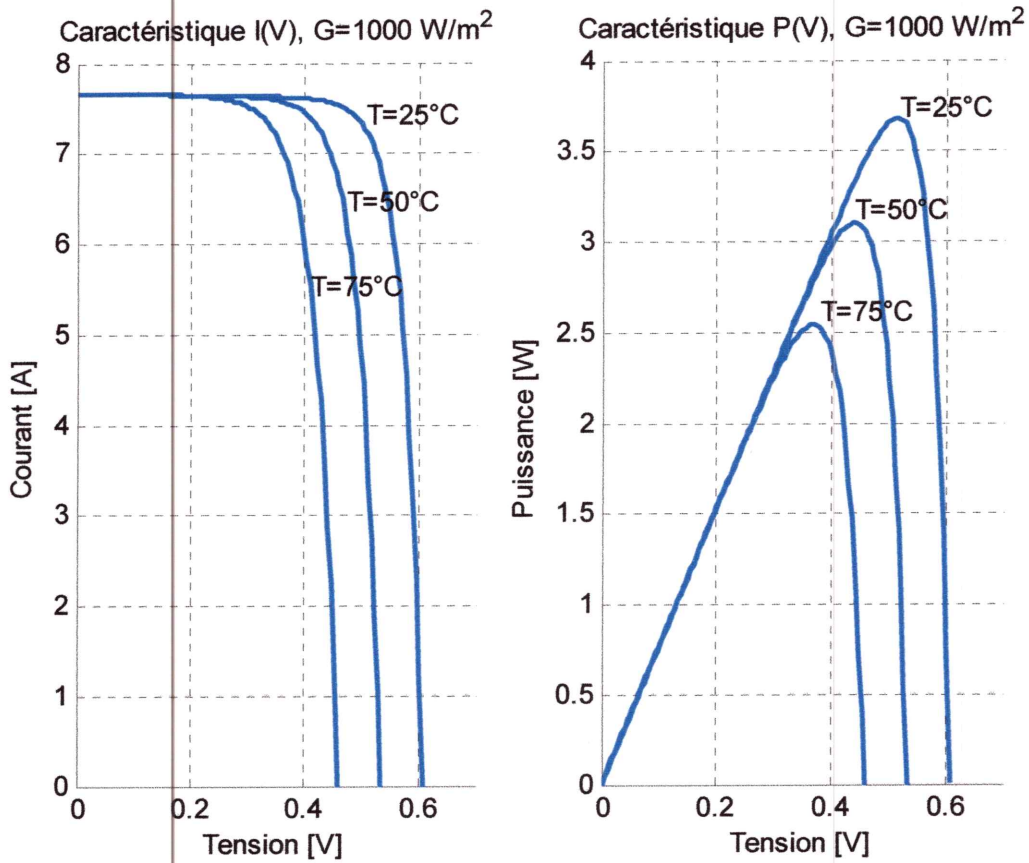
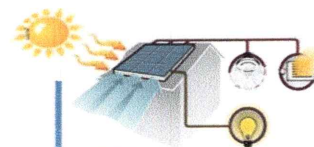


Figure II.10 : Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés.



II. 7. Rendement de la cellule photovoltaïque :

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (II.4)$$

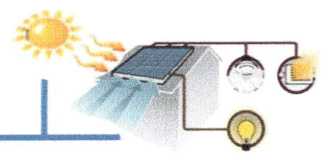
Où P_{in} est la puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur le capteur par unité de surface.



Chapitre III

Recherche

bibliographique



Recherche bibliographique

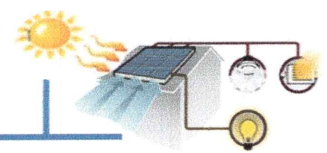
III.1. Introduction

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. 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.

Un module photovoltaïque (PV) classique de technologie silicium cristallin convertit entre 12 et 18 % de l'énergie solaire incidente. Pour arriver à ce résultat, un module PV absorbe en réalité entre 80 et 90% du rayonnement incident, dont la majeure partie est dissipée sous forme de chaleur, augmentant ainsi la température interne du module. Cette augmentation de la température réduit sensiblement les performances électriques du module.

III.2. Capteur solaire hybride PVT:

Une des premières applications des capteurs hybrides PVT à air était dans la maison solaire pilote appelé « Soler One », construite dans 1973/1974 à l'université du Delaware par le professeur **Boer**[9], qui à ce moment-là avait effectué des travaux sur le module photovoltaïque. Dans les façades et sur le toit de cette maison, des capteurs à air ont été intégrés, et quatre des 24 capteurs placés sur le toit ont été équipés des cellules de CdS/Cu₂S [10]. Après le travail pilote du professeur Boer, vers la fin des années 70 et du début des années 80, les principaux travaux de recherches sur les capteurs PVT à air ont été effectués par l'équipe de **Hendrie** [11] et également à Sandia et à



l'université de Brown, la recherche a été effectuée dans l'effet de la température sur les performances électriques [12]

En Algérie, le premier prototype du capteur hybride PVT a été étudié et réalisé à l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables à Ghardaïa par **Touafek et al.** [13].

Il s'agit de capteurs PVT de type eau avec un absorbeur en serpentin en cuivre. Les études portaient sur la simulation numérique et des expérimentations sur site de plusieurs configurations (sans vitre et avec une, puis deux vitres supplémentaires).

En 2008, Ben Cheikh El Hocine et al [13] : ont étudié le capteur hybride PVT à eau, 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 débit massique et différents valeurs de radiation solaire. 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.

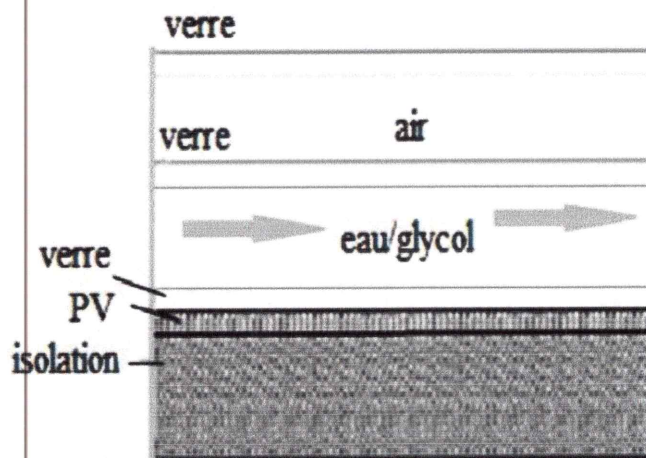
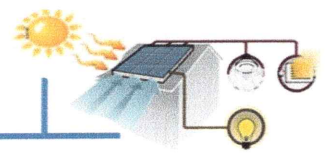


Figure III.1: Schéma descriptif prototype hybride PV/T à eau [13]



Tripanagnostopoulos et al : [14] ont présenté des mesures expérimentales sur des capteurs PVT type liquide et air contenant des cellules en silicium cristallin et amorphe. Ils ont trouvé qu'à la température réduite zéro, pour son capteur PVT liquide, un rendement de 55% pour le prototype de capteur PVT en Silicium cristallin et 60% pour l'amorphe, alors que pour son capteur PVT à air, le prototype en Silicium cristallin a un rendement de 38% et en silicium amorphe de 45%. Cependant, le rendement électrique pour les capteurs en silicium cristallin est de 12% et pour l'amorphe, il est de 6%.

Tiwari et sodha [15] : ont proposé quatre conceptions différentes sur les capteurs HPVT à air, ils ont réalisé dans les conditions climatique de New Delhi, les conceptions (a),(b),(c),(d) qui présentent des capteurs HPVT non vitré avec -tedlar r, non vitré sans -tedlar , vitré avec -tedlar et vitré sans -tedlar respectivement, la comparaison entre les quatre conception montre que le modèle vitré et sans -tedlar donne la meilleur performance thermique et électrique, et d'autre part il n'y aucune différence dans la température de module PV non vitré avec -tedlar et vitré sans -tedlar.

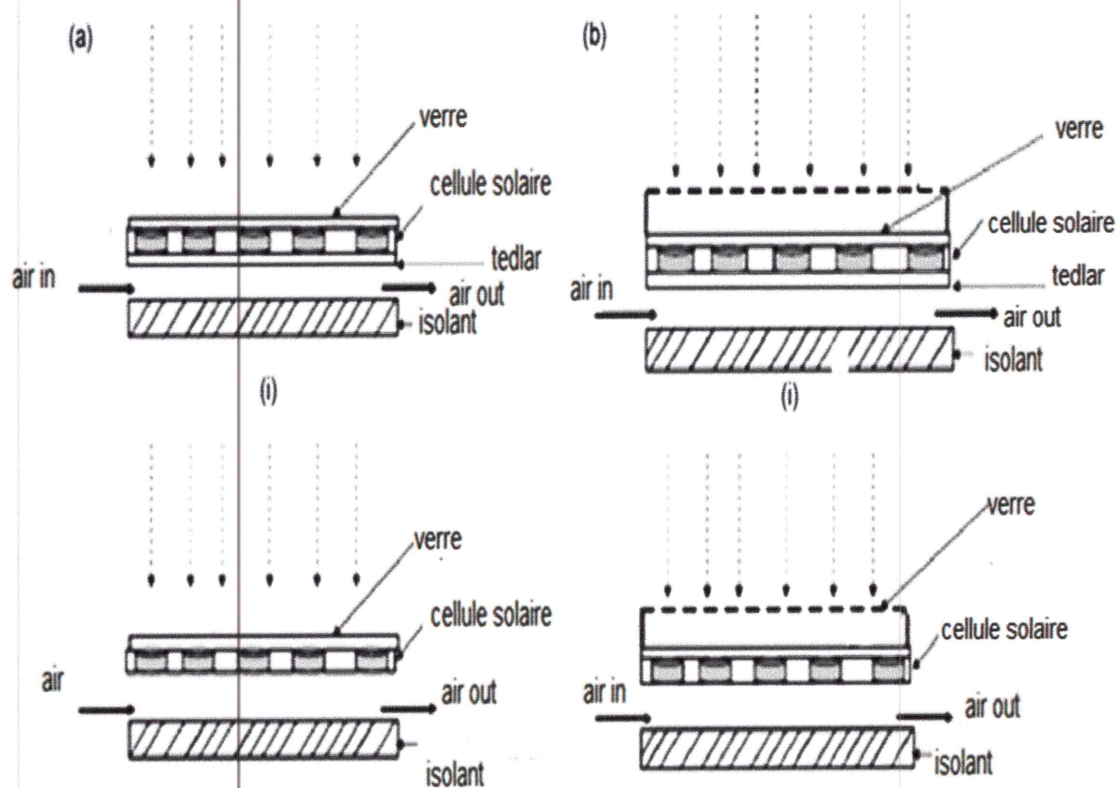
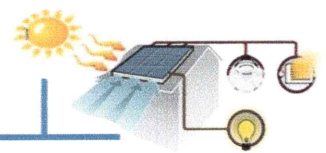


Figure III.2. Une vue en coupe transversale collecteur

hybride PV/T (verre-tedlar)



Tiwari et al : [16] ont développé un modèle thermique d'un système intégrant des cellules photovoltaïques et capteurs thermiques (IPVTS) pour le chauffage de l'eau et de l'air. Le modèle décrit est en fonction des paramètres météorologiques et des composants du système.

Une étude d'un système à base de capteurs hybride PVT a été appliquée par **Dubey et al**. [15] pour le chauffage de 200 litres d'eau. Ce système a été testé dans les conditions externes du climat de New Delhi.

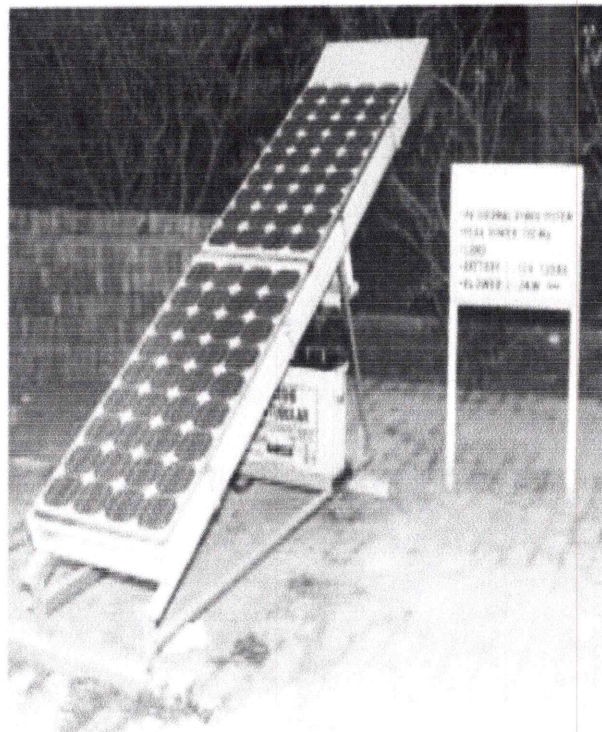
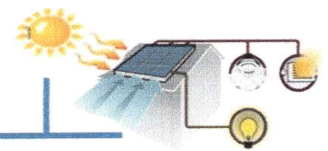


Figure III.3: Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air.

En 2012, B. Bouzidi : [17] a étudié l'Effet de la variation de l'angle d'inclinaison du générateur sur le rendement des systèmes photovoltaïques appliqué aux systèmes de pompage de l'eau. Les systèmes photovoltaïques de pompage de l'eau sont utilisés principalement dans deux types d'application: l'approvisionnement en eau des villageois et l'irrigation de petits périmètres. La majorité des systèmes installés tombent dans la première catégorie, bien qu'une nette tendance soit perceptible vers l'implantation de systèmes appartenant à la seconde catégorie. De nombreuses installations produisent de l'eau qui est utilisée pour ces deux fins. Afin de satisfaire les besoins en eau des consommateurs des régions isolées, le système photovoltaïque de pompage, similaire à



celui de (Figure III.4) est proposé. Il se compose d'un champ de modules photovoltaïques, dont l'angle d'inclinaison est ajusté manuellement, un bloc onduleur PWM (avec MPPT inclus) transforme chaque point de fonctionnement de la charge (I, V), au point du générateur photovoltaïque (I_{mp} , V_{mp}) et convertit la tension continue en une tension triphasée pour alimenter correctement le groupe motopompe. Le groupe motopompe du type submersible est défini selon les exigences du débit et de la hauteur manométrique totale. Et enfin le réservoir de stockage dont la capacité nominale dépend des besoins journaliers et de la fiabilité du système.

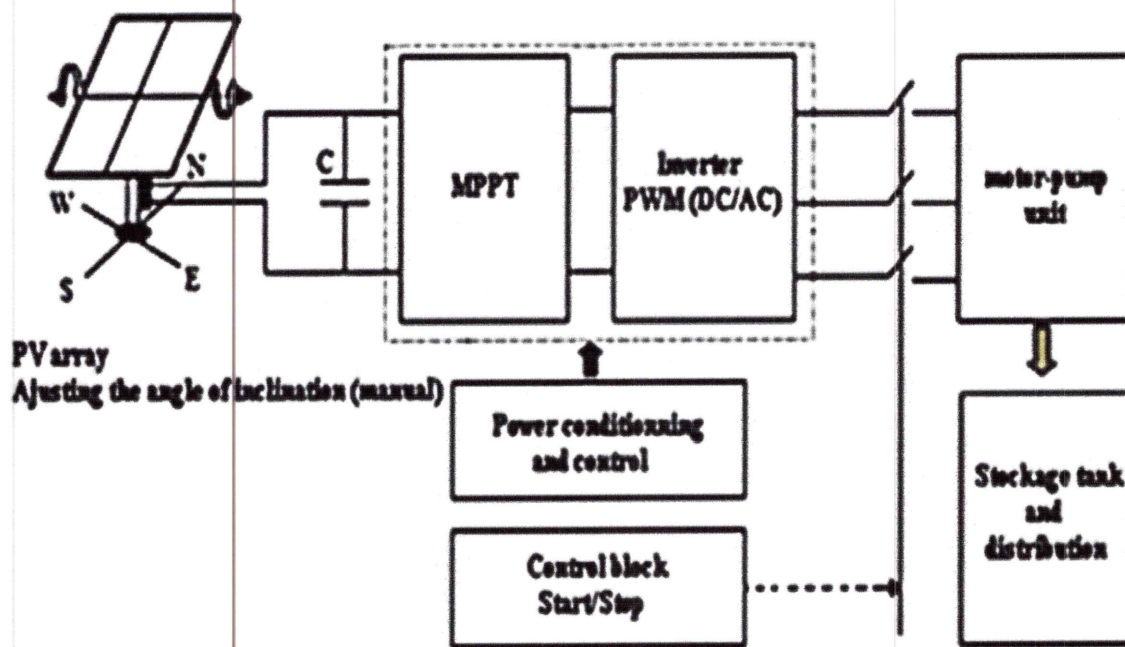


Figure III.4 : schéma synoptique d'un système photovoltaïque de pompage d'eau

En 2010, f. sarhaddi :[18] a fait une étude sur les performances d'un capteur HPVT à air. Les modèles thermique et électrique sont développés et un programme de simulation a été réalisé pour calculer les paramètres de ce capteur. Les résultats de la simulation numérique sont en bon accord avec les mesures expérimentales, et aussi les valeurs des efficacités thermiques, électriques et énergétiques de capteur HPVT sont environ 17,18%,10,01% et 45% respectivement selon le modèle électrique utilisé, donc on remarque de cette expression l'intensité du rayonnement n'est pas linéaire, l'efficacité thermique et énergétique d'un capteur HPVT varie inversement avec la température d'entrée d'air, la vitesse du vent et la longueur de la conduite.



En 2008, A. Malek et al [19] : ont fait une simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique Les capteurs solaires thermiques peuvent servir au chauffage des habitations, ainsi qu'au chauffage de l'eau. L'installation servant au chauffage de l'eau est appelée 'chauffe-eau solaire'. Le chauffage de l'eau (Figure. III.5) pour les douches, le lavage de la vaisselle et la lessive est l'une des utilisations les plus rentables de l'énergie solaire. Des milliers de nouveaux chauffe-eau solaires sont installés chaque jour dans le monde.

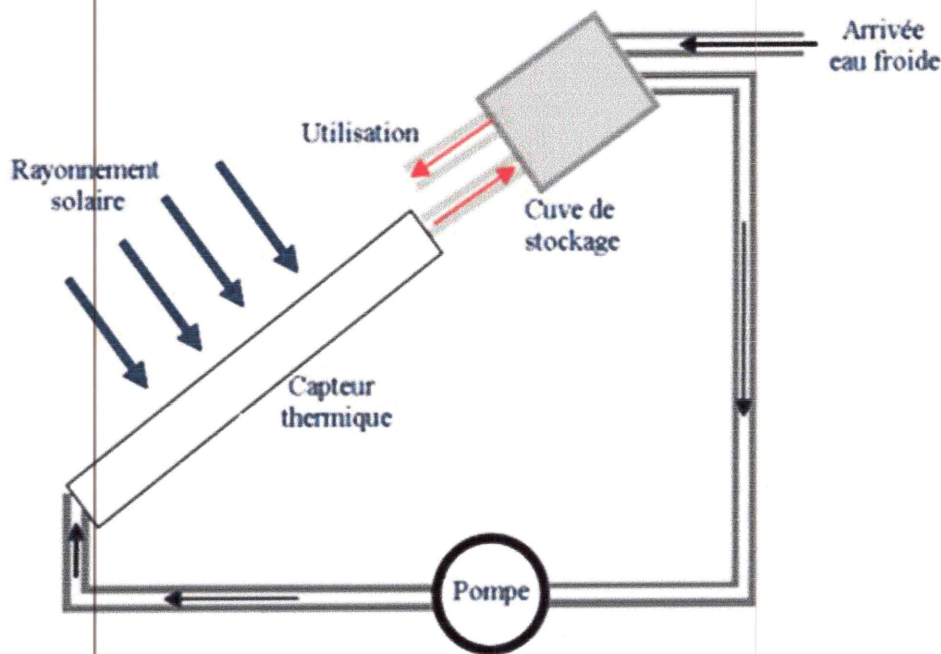


Figure III.5 : schéma synoptique d'un chauffe-eau solaire

N.Moumimi et al[20], leur travail s'est intéressé aux capteurs plans à air avec des chicanes rectangulaires placées perpendiculairement sur le plan d'écoulement dans la veine fluide mobile du conduit, ce qui a permis de produire au sein de la lame un courant d'air plus turbulent entre l'absorbeur et la plaque arrière en bois, ce qui a aboutit à une amélioration du rendement de ces capteurs solaires et le coefficient du transfert. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus avec un capteur solaire sans chicanes(Figure. III.6), en utilisant deux types d'absorbeurs sélectifs et non sélectifs en aluminium peint en noir.

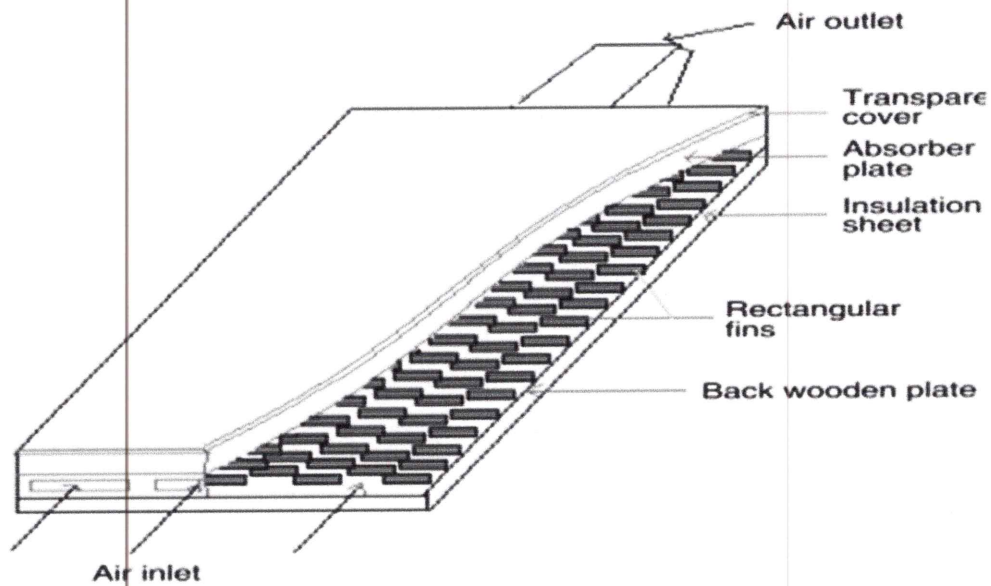
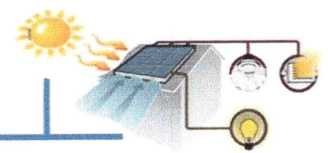


Figure III.6 : Capteur avec des chicane rectangulaire sur la plaque inférieure en bois.

A.Fudholi et al [21], ont mené une étude expérimentale sur un capteur solaire à air double passage avec des ailettes disposées en quinconces dans le bas de canal,(Figure III.7) ils ont analysé l'influence de divers paramètres, tels que le débit massique du fluide caloporteur et le rayonnement solaire sur le comportement thermique du capteur.

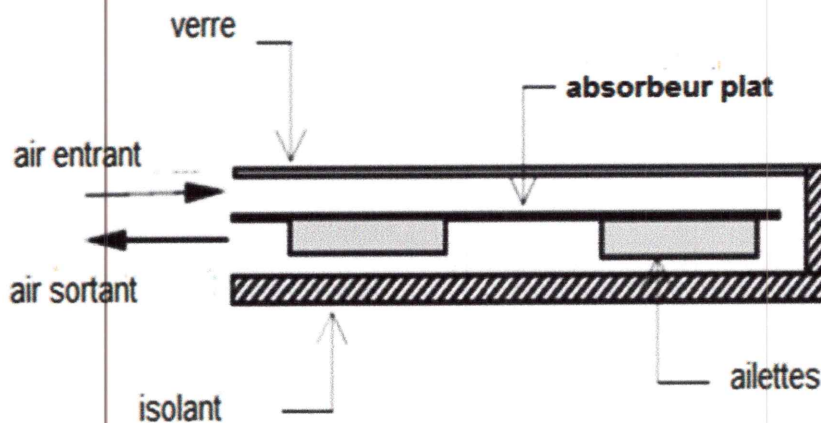


Figure III.7 : schéma d'un capteur solaire à air double passage



Chapitre IV

*Bilan thermique d'un
capteur solaire
hybride PV/T à air*



Bilan thermique d'un capteur solaire hybride PV/T à air

IV.1. Introduction

Les capteurs solaires hybrides PV/T sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique et thermique, ceci permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire captée par ce capteur. La production de cette énergie électrique et thermique dépend de plusieurs paramètres d'entrées et de sorties : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante d'air. Le but de ce chapitre est de prévoir les températures dans chaque élément de HPV/T à air, pour cela, on applique la première loi de la thermodynamique sur chaque couche puis nous découpons en tranches fictives égales (mailles), cette méthode nous permet de prendre en compte l'évolution des températures de tous les éléments du capteur dans le temps et l'espace. Pour pouvoir déterminer le bilan énergétique entre les nœuds, il serait commode d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et les lois de l'électricité. La représentation des échanges de chaleur par des schémas électriques permet d'appliquer la loi d'OHM et de Kirchhoff. Finalement, la résolution du système est effectuée par la méthode itérative de Gauss Seidel.

IV.2. La description d'un capteur HPV/T à air

Le capteur HPV/T à air se compose de :

- **Un panneau photovoltaïque**
- **Un canal d'air**
- **Un absorbeur**
- **Une plaque métallique arrière**
- **Un isolant**

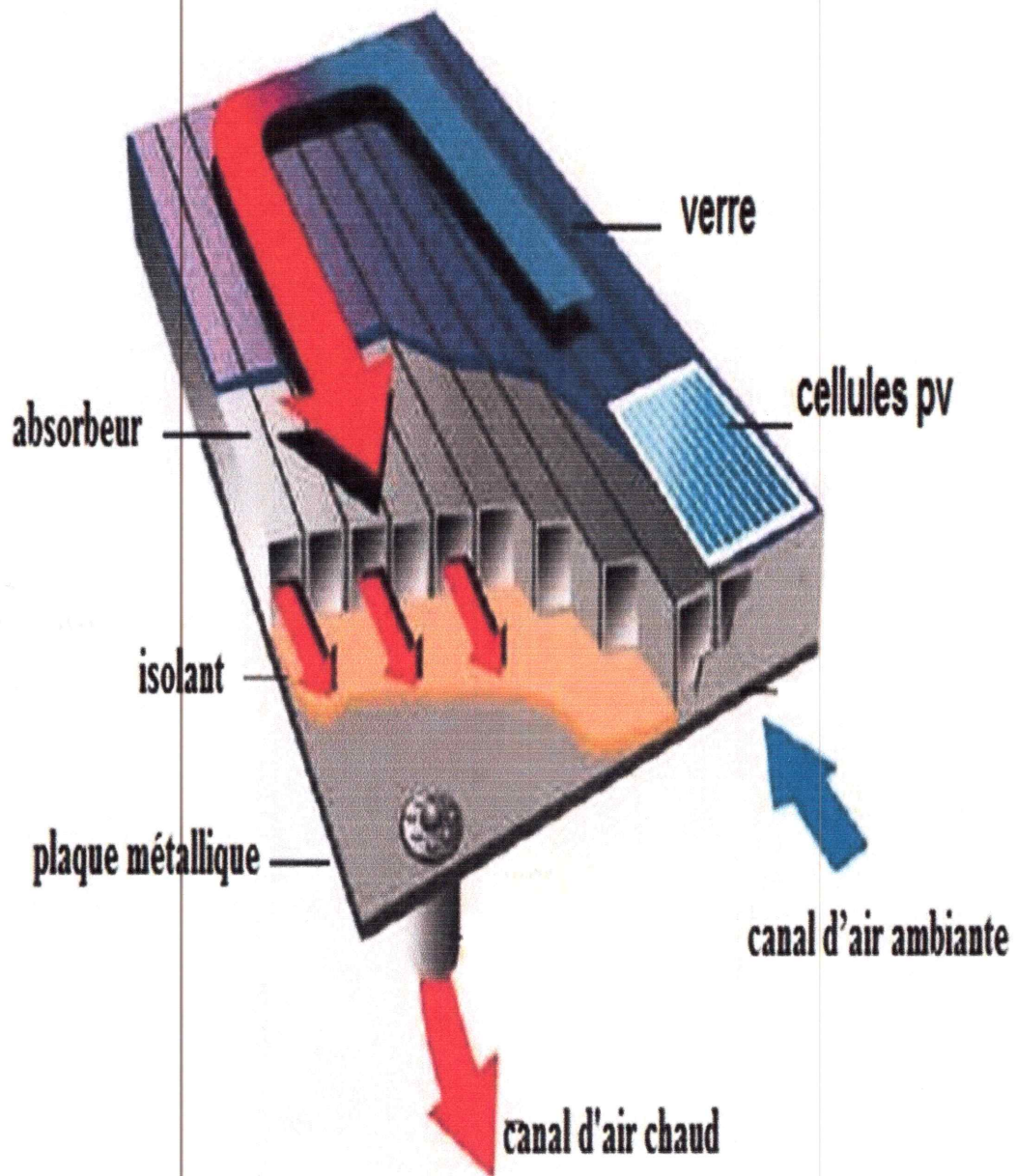
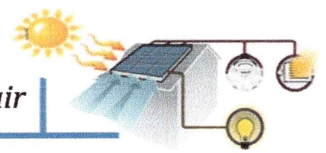
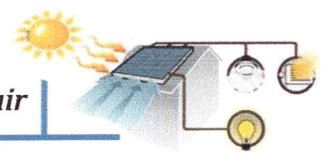


Figure IV.1 : un capteur HPV/T à air [22]



Le panneau photovoltaïque

Le rôle du panneau PV est de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique, il se compose en trois couches principales :

- 1) **Verre trompe** : une couche protectrice qui minimise les pertes optiques.
- 2) **EVA** :Éthylène Acétate de Vinyle, c'est un matériau thermoplastique transparent qui résiste contre les rayons UV et les forces mécaniques, il sert à encapsuler les cellules PV sous vide entre deux films.
- 3) **Tedlar** :Poly-vinyle-fluoride(PVF) c'est un matériau thermoplastique, il possède une résistance élevée contre les conditions météorologiques, les produits chimiques et les huiles. Il est utilisé généralement pour l'emballage des équipements électriques.

b) Le canal d'air

C'est à travers ce canal l'air s'écoule, de plus sa forme géométrique est très importante pour l'échange de chaleur ce qui influe directement sur le rendement global.

c) L'absorbeur

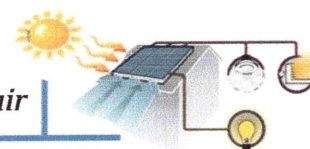
C'est une plaque métallique, qui a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire ensuite le transformer en chaleur qui sera cédée au fluide caloporteur. De plus, il doit avoir un coefficient d'absorption très élevé (d'ordre de 0.95) qui sera pour les couleurs foncées (le noir), et son émissivité superficielle doit être la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15) ce qui lui rend sélectif.

d) L'isolant

L'isolant est pour rôle de minimiser les pertes thermiques vers l'arrière.

e) Plaque métallique arrière

C'est un plaque métallique au aluminium qui conserver et protège les composant du capteur .



IV.3. La modélisation du système

La figure ci-dessous représente une coupe transversale dans un capteur PV/T à air :

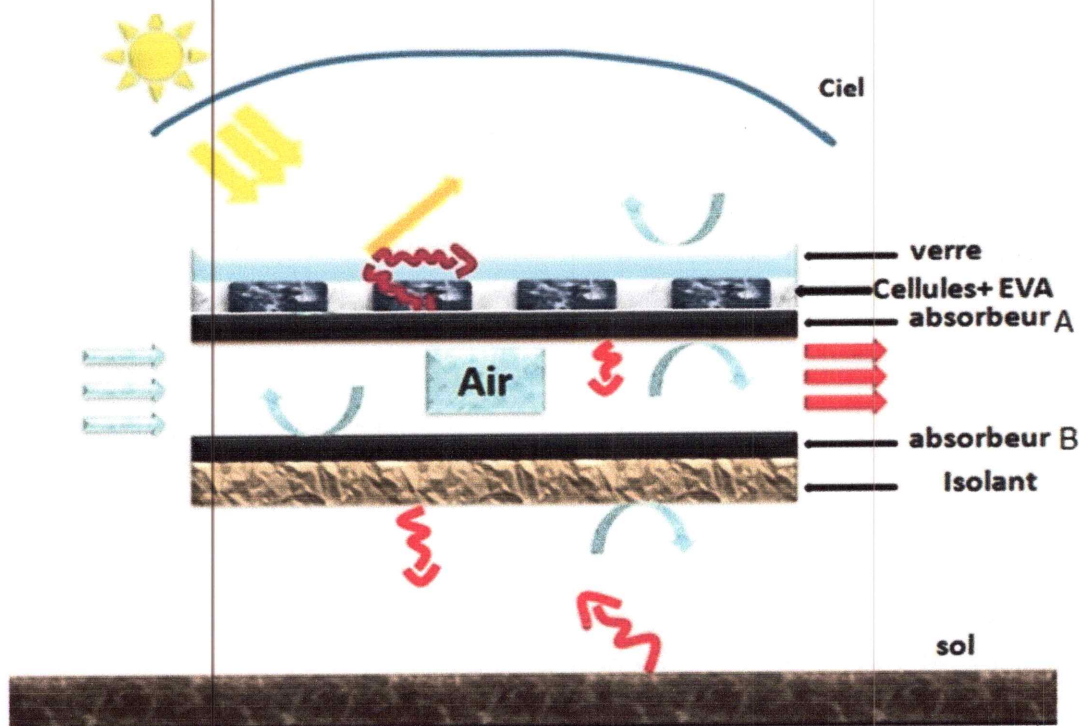


Figure IV.3 : La coupe transversale dans un capteur PV/T à air.

IV.4. Le tableau d'analogie électrique

Tableau IV.1 : L'analogie entre le transfert thermique et l'électricité.

| <i>Grandeurs thermiques</i> | <i>Symboles</i> | <i>Grandeurs électriques</i> | <i>Symboles</i> |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------|
| Flux thermique | Q [W] | Intensité du courant électrique | I [A] |
| Différence de température | ΔT [°C] | Différence de potentiel | ΔE [v] |
| Résistance thermique | R_{th} [K/W] | Résistance électrique | R [Ω] |
| Capacité thermique | C [J/K] | Capacité électrique | C [F] |



IV.5. Les hypothèses de simplification

Avant de faire une simulation approchée du système, il est nécessaire de supposer quelques hypothèses :

- Le ciel peut être assimilé à un corps noir de température équivalente calculée.
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiante.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- Le rayonnement atmosphérique diffus est isotrope.
- La conductivité de l'air est négligeable.
- Le coefficient de transmission d'EVA est 100 %.

IV.6. Le bilan énergétique

Le bilan au nœud (i) :

$$\frac{M_i C_{p_i}}{S_i} \times \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^N H_{ij} (T_j - T_i) + P_i \quad (\text{V.1})$$

M_i : La masse du milieu i du système (Kg).

C_{p_i} : La chaleur spécifique (J/Kg .K).

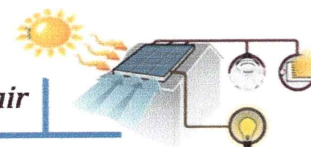
S_i : La section (m²).

N: L'ensemble des nœuds j pour lesquels T_j est un potentiel connecté à T_i .

P_i : Facteur de puits ou de source (W/m²).

$\frac{\Delta t}{dt}$: Variation par rapport au temps.

ΔT : La variation de la température.



$H_{rveciel}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de la vitre et le ciel.

$H_{vvea}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par convection entre la face externe de la vitre et l'ambiance.

$H_{cv}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la face externe et la face interne de la vitre.

$H_{cvic}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la face interne de la vitre et la cellule solaire.

$H_{ccaba}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la cellule solaire et le l'absorbeur A.

$H_{vtf}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par convection entre le l'absorbeur A et l'air (fluide caloporteur).

$H_{vfabb}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par convection entre l'air et l'absorbeur B.

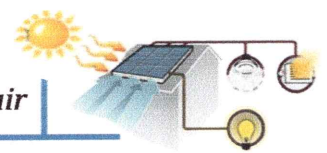
$H_{rabaabb}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le l'absorbeur A et l'absorbeur B.

$H_{cabbisi}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par conduction entre l'absorbeur B et la face interne de l'isolant.

$H_{cis}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par conduction entre la face interne et externe de l'isolant.

$H_{visea}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par convection entre la face externe de l'isolant et l'ambiance.

$H_{rises}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la face externe de l'isolant et le sol.



IV.7. Le schéma électrique

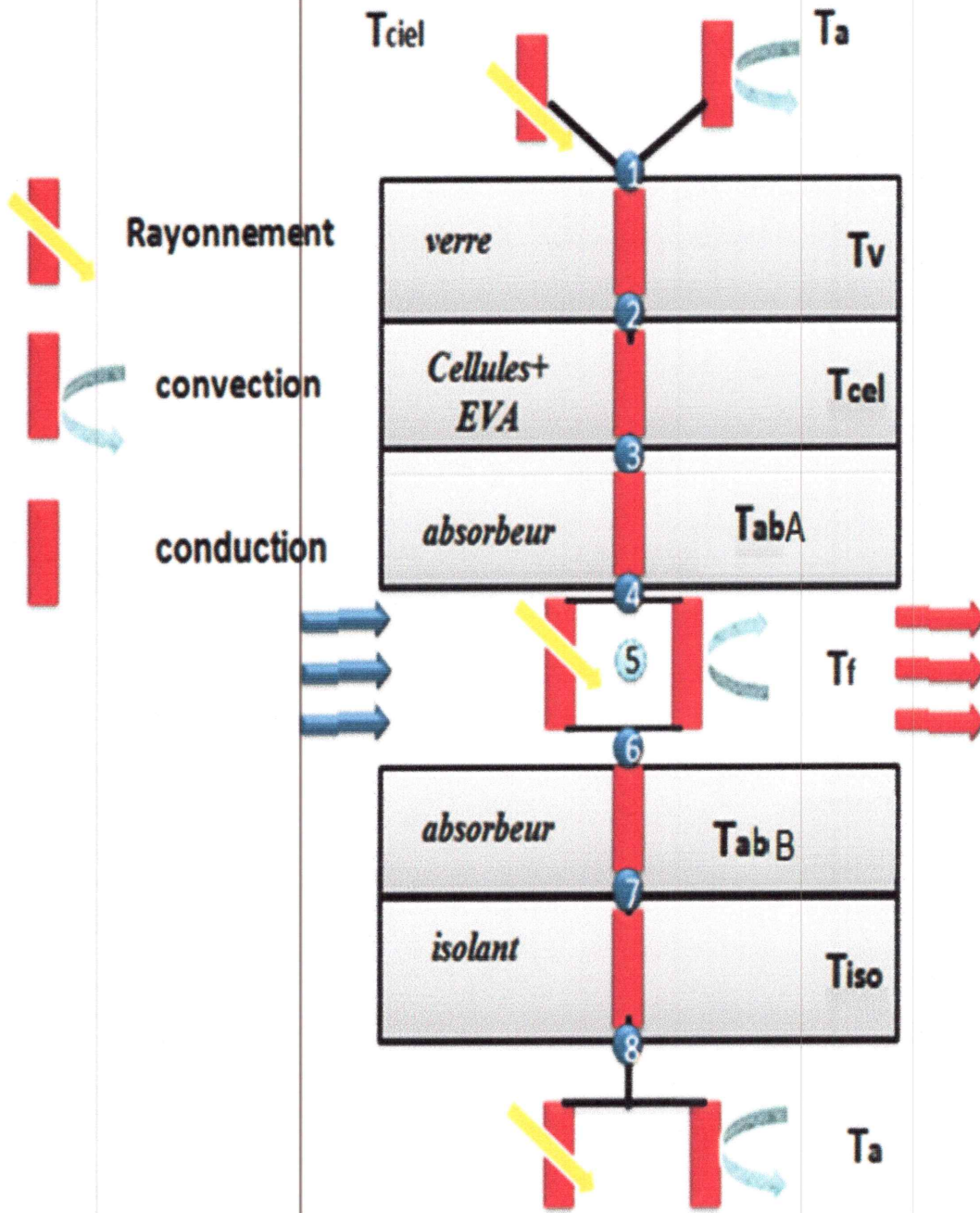
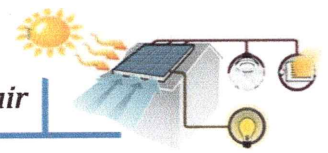


Figure IV.4 :L'analogie électrique.



IV.8. La mise en équation du système

Selon le schéma électrique montré dans la figure V.4, on applique la loi d'OHM au nœud de chaque maille, nous allons avoir les équations suivantes :

Nœud 1 : (la face externe de la vitre)

$$\frac{M_v C p_v}{2 S_v} \left(\frac{dT_{ve}}{dt} \right) = \frac{P_v}{2} + H_{rveciel}(T_{ciel} - T_{ve}) + H_{vvea}(T_a - T_{ve}) + H_{cv}(T_{vi} - T_{ve}) \quad (V.3)$$

Nœud 2 : (la face interne de la vitre)

$$\frac{M_v C p_v}{2 S_v} \left(\frac{dT_{vi}}{dt} \right) = \frac{P_v}{2} + H_{cv}(T_{ve} - T_{vi}) + H_{cvic}(T_c - T_{vi}) \left(\frac{S_c}{S_v} \right) \quad (V.4)$$

Nœud 3 : (la cellule)

$$\frac{M_c C p_c}{S_c} \left(\frac{dT_c}{dt} \right) = P_c + H_{cvic}(T_{vi} - T_c) \left(\frac{S_c}{S_v} \right) + H_{cct}(T_{aba} - T_c) \left(\frac{S_{aba}}{S_c} \right) - \frac{Q_{éle}}{S_c} \quad (V.5)$$

Nœud 4 : (l'absorbeur A)

$$\begin{aligned} \frac{M_{aba} C p_{aba}}{S_{aba}} \left(\frac{dT_{aba}}{dt} \right) = & P_{aba} + H_{rtaba}(T_{abb} - T_{aba}) + H_{vfaba}(T_f - T_{aba}) \\ & + H_{cct}(T_c - T_{aba}) \left(\frac{S_{aba}}{S_c} \right) \end{aligned} \quad (V.6)$$

Nœud 5 : (l'air ou fluide caloporteur)

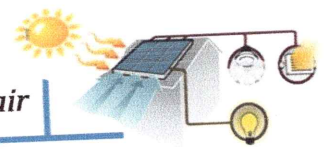
$$\frac{G_f C p_f}{S_f} (T_f - T_f^*) = H_{vfaba}(T_{aba} - T_f) + H_{vfabb}(T_{abb} - T_f) \quad (V.7)$$

Nœud 6 : (l'absorbeur B)

$$\begin{aligned} \frac{M_{abb} C p_{abb}}{S_{abb}} \left(\frac{dT_{abb}}{dt} \right) = & P_{abb} + H_{rtaba}(T_{aba} - T_{abb}) + H_{vfabb}(T_f - T_{abb}) \\ & + H_{cabisi}(T_{isi} - T_{abb}) \end{aligned} \quad (V.8)$$

Nœud 7 : (la face interne de l'isolant)

$$\frac{M_{is} C p_{is}}{2 S_{is}} \left(\frac{dT_{isi}}{dt} \right) = H_{cabisi}(T_{abb} - T_{isi}) + H_{cis}(T_{ise} - T_{isi}) \quad (V.9)$$



Nœud 8 : (la face externe de l'isolant)

$$\frac{M_{is} C p_{is}}{2 S_{is}} \left(\frac{dT_{ise}}{dt} \right) = H_{cis} (T_{isi} - T_{ise}) + H_{visea} (T_a - T_{ise}) + H_{rises} (T_s - T_{ise}) \quad (V.10)$$

V.9. La discrétisation des équations

Nœud 1 :

$$\begin{aligned} \frac{M_v C p_v}{2 S_v \Delta t} \left(T_{ve}^t(j) - T_{ve}^{t-\Delta t}(j) \right) &= \frac{P_v}{2} + H_{rveciel} (T_{ciel} - T_{ve}^t(j)) + H_{vvea} (T_a - T_{ve}^t(j)) \\ &+ H_{cv} (T_{vi}^t(j) - T_{ve}^t(j)) \end{aligned} \quad (V.11)$$

Nœud 2 :

$$\frac{M_v C p_v}{2 S_v \Delta t} \left(T_{vi}^t(j) - T_{vi}^{t-\Delta t}(j) \right) = \frac{P_v}{2} + H_{cv} (T_{ve}^t(j) - T_{vi}^t(j)) + H_{cvic} (T_c^t(j) - T_{vi}^t(j)) \left(\frac{S_c}{S_v} \right) \quad (V.12)$$

Nœud 3 :

$$\begin{aligned} \frac{M_c C p_c}{S_c \Delta t} \left(T_c^t(j) - T_c^{t-\Delta t}(j) \right) &= P_c + H_{cvic} (T_{vi}^t(j) - T_c^t(j)) \left(\frac{S_c}{S_v} \right) \\ &+ H_{cct} (T_{aba}^t(j) - T_c^t(j)) \left(\frac{S_{aba}}{S_c} \right) - \frac{Q_{éle}}{S_c} \end{aligned} \quad (V.13)$$

Nœud 4 :

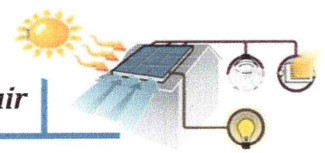
$$\begin{aligned} \frac{M_{aba} C p_{aba}}{S_{taba} \Delta t} \left(T_{aba}^t(j) - T_{aba}^{t-\Delta t}(j) \right) &= P_{aba} + H_{cct} (T_c^t(j) - T_{aba}^t(j)) \left(\frac{S_{aba}}{S_c} \right) \\ &+ H_{vfaba} (T_f^t(j) - T_{aba}^t(j)) + H_{rtaba} (T_{abb}^t(j) - T_{aba}^t(j)) \end{aligned} \quad (V.14)$$

Nœud 5 :

$$\frac{G_f C p_f}{S_f} \left(T_f^t(j) - T_{f*}^t(j-1) \right) = H_{vfaba} (T_i^t(j) - T_f^t(j)) + H_{vfabb} (T_{abb}^t(j) - T_f^t(j)) \quad (V.15)$$

Nœud 6 :

$$\begin{aligned} \frac{M_{abb} C p_{abb}}{S_{abb} \Delta t} \left(T_{abb}^t(j) - T_{abb}^{t-\Delta t}(j) \right) &= P_{abb} + H_{rtaba} (T_{aba}^t(j) - T_{abb}^t(j)) \\ &+ H_{vfabb} (T_f^t(j) - T_{abb}^t(j)) + H_{cabisi} (T_{isi}^t(j) - T_{abb}^t(j)) \end{aligned} \quad (V.16)$$



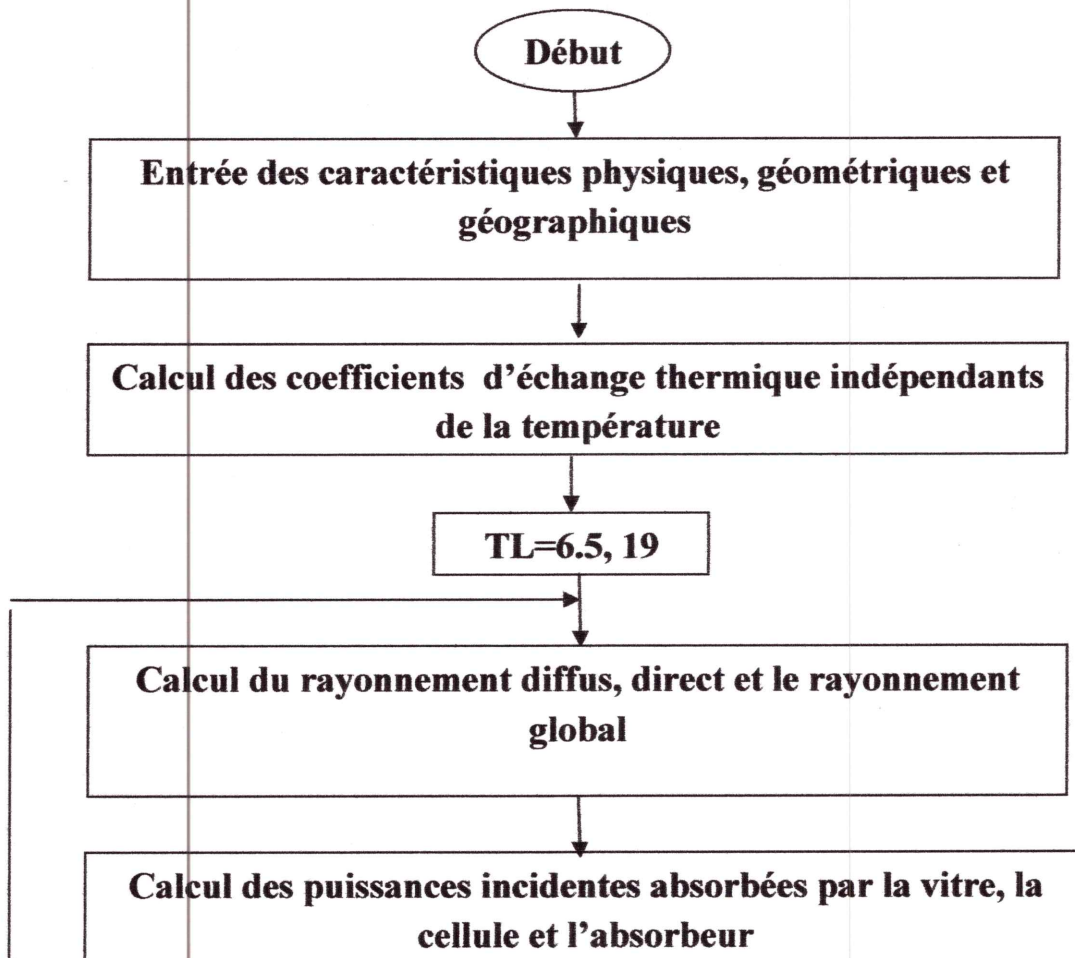
Tel que :

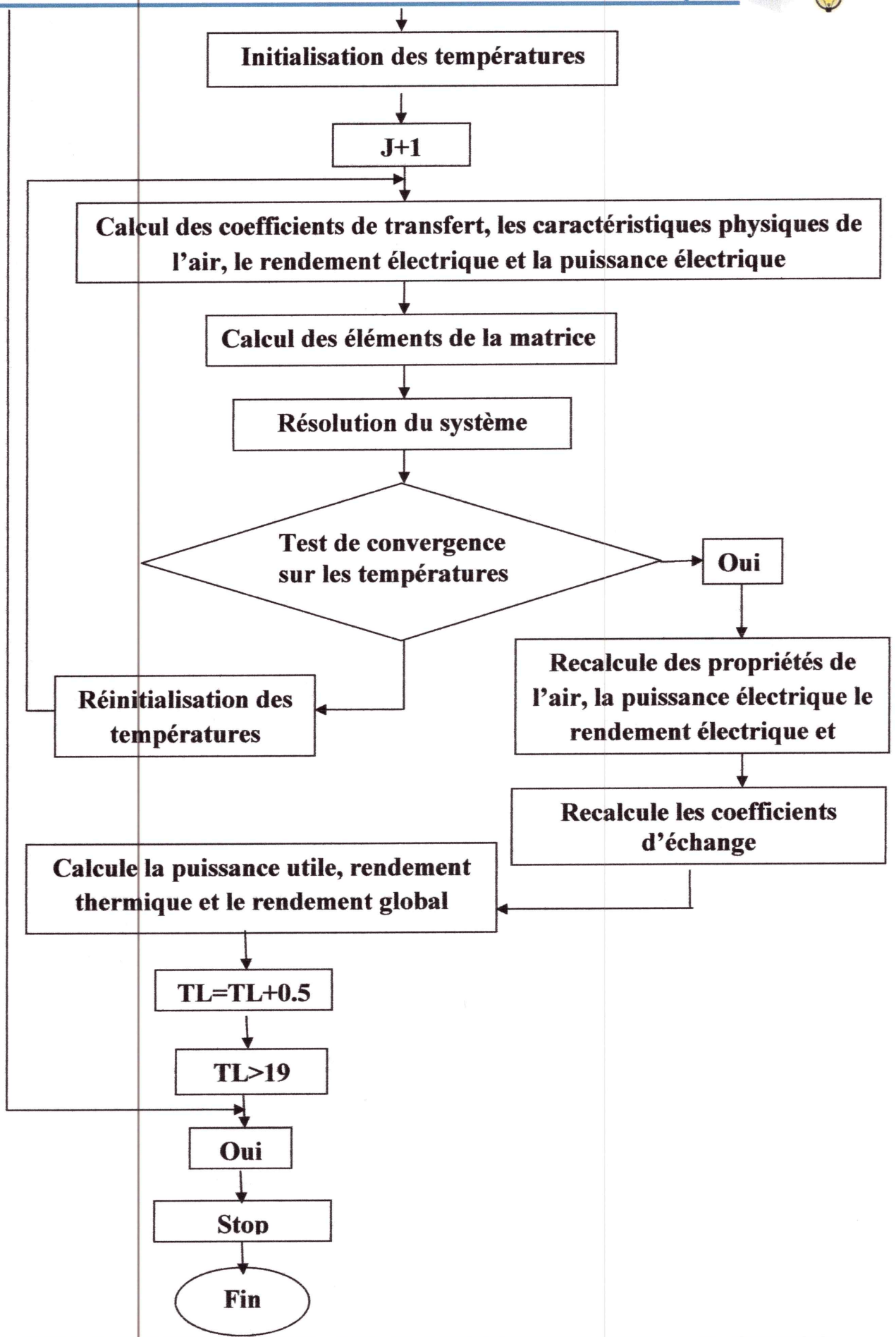
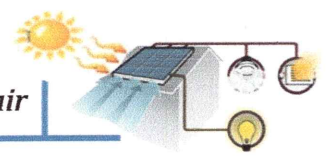
$T_{ve}, T_{vi}, T_c, T_{aba}, T_f, T_{abb}, T_{isi}, T_{ise}$: sont respectivement les températures inconnues de : la face externe du verre, la face interne du verre, la cellule, l'absorbeur coté haut, l'air et l'absorbeur coté bas et l'isolant.

IV.10. La résolution du système d'équations

Nous allons initialiser les températures des différents nœuds à l'instant $t = 0$ et avec l'algorithme de calcul (voir organigramme), puis nous évaluons les différents coefficients des transferts thermiques, ainsi pour chaque pas de temps et pour chaque maille, nous allons obtenir un système d'équations dont sa résolution permettra de calculer inconnues.

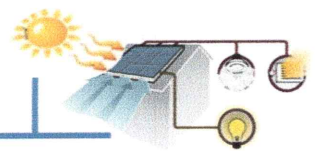
IV.11. L'organigramme développé pour le calcul numérique des paramètres inconnus







Chapitre V
Interprétations et
discussions des
résultats



Interprétations et discussions des résultats

V.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, on a étudié le capteur solaire hybride PV/T à air, en plus on a élaboré un code de calcul en langage **MATLAB 2014**. Dans ce chapitre, on va exposer les résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps dans les différentes couches du capteur, l'irradiation global, la température ambiante, la production d'énergie thermique et enfin le rendement électrique et thermique du capteur, en prenant **JJEL** comme région d'étude.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte des considérations suivantes :

- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial " t_0 " pour chaque composant du capteur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à demi-heure.
- Les données météorologiques de la région de **JJEL** sont :
 - Latitude = $36^{0}43'$ N.
 - Longitude = $5^{0}53'$ E.
 - Albédo du sol = 0.2.



Nous avons choisi le **17 juillet** comme jour de calcul pour le capteur.

V.2. La variation du rayonnement global

La **figure VI.1**: montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global en fonction du temps, on constate que la puissance incidente reçue par un mètre carré de la surface de l'isolateur atteint la valeur maximale entre 12 h et 14 h, car le flux de chaleur est important à ce moment.

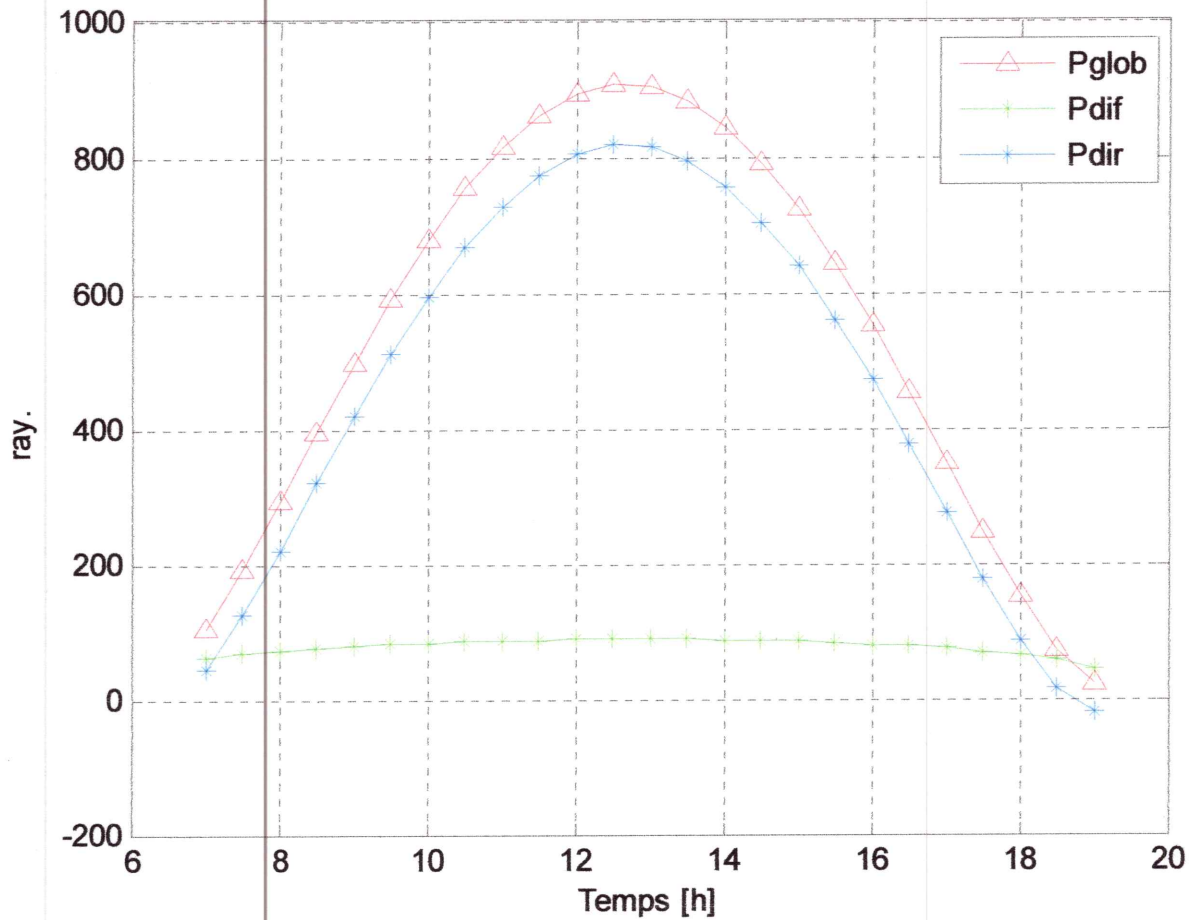


Figure V.1 : La variation temporelle du rayonnement solaire global.

V.3. La variation de la température ambiante et la température du ciel

La figure VI.2 : représente la variation de la température ambiante et la température du ciel en fonction du temps, on remarque qu'elles ont la même allure et atteignent le maximum est en 14 h, ce comportement peut s'expliquer par la relation dont la température du ciel dépend de la température ambiante.

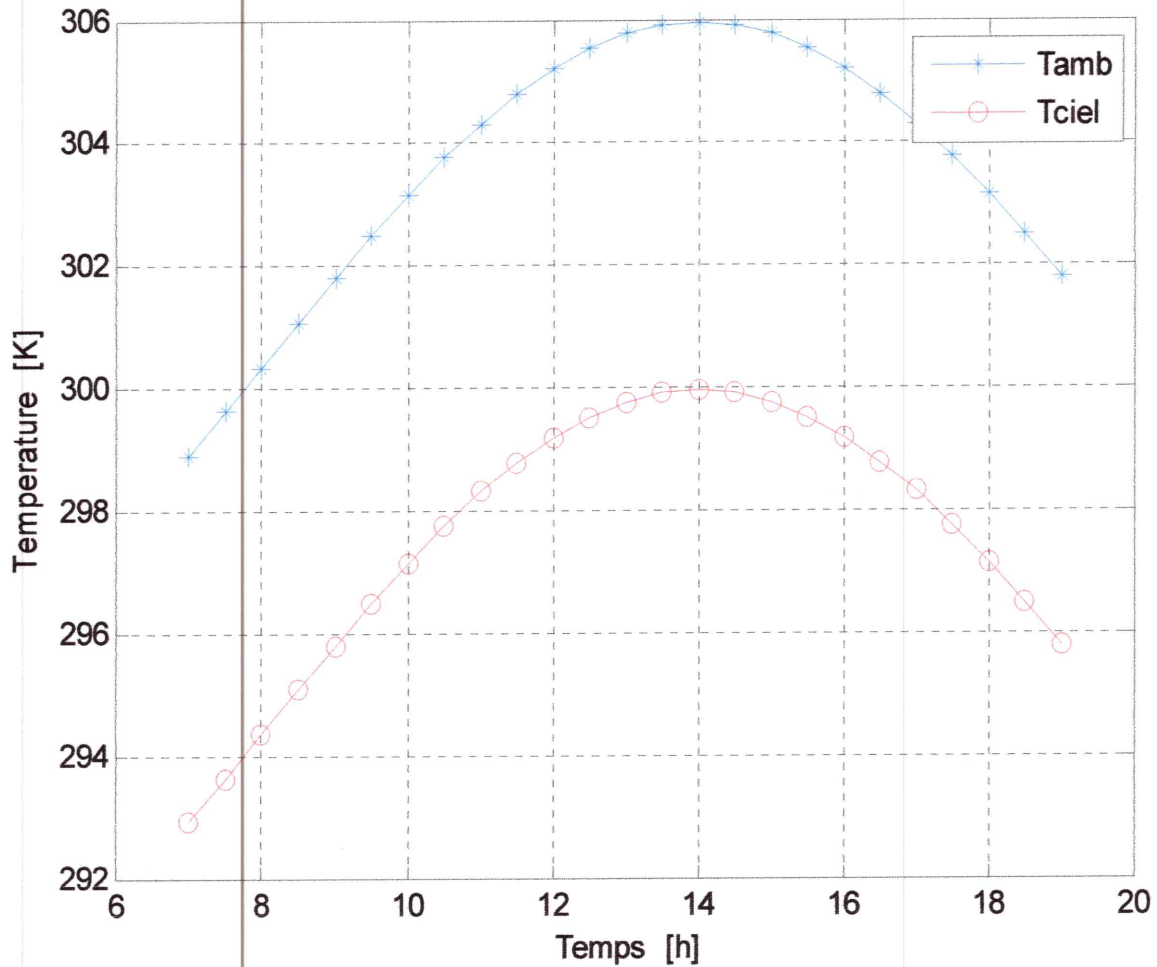
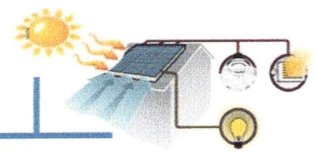
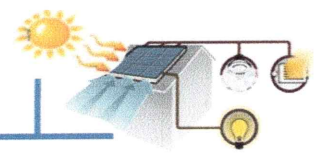


Figure V.2 : La variation temporelle de la température ambiante et la température du ciel.

VI.4. La variation temporelle des puissances absorbées par les couches du capteur

La figure VI.3 : montre l'évolution temporelle des puissances absorbées par la cellule, la puissance absorbée par l'absorbeur en fonction du temps.

On remarque que les puissances atteignent leur maximal entre 12 h et 14 h, et que la puissance absorbée par la cellule est la plus élevée puisque cette dernière est couverte par une couche anti reflet EVA, on voit aussi que cette puissance reste toujours inférieure à celle du rayonnement global ceci est due aux caractéristiques géométriques (épaisseur) et optiques (coefficient d'absorption et de transmission), de plus l'espacement entre les cellules.



On peut remarquer aussi que la puissance absorbée par l'absorbeur A est supérieure à celle de l'absorbeur B cela revient essentiellement au rayonnement qui passe depuis l'espace entre les cellules et celui non converti en électricité par ces dernières.

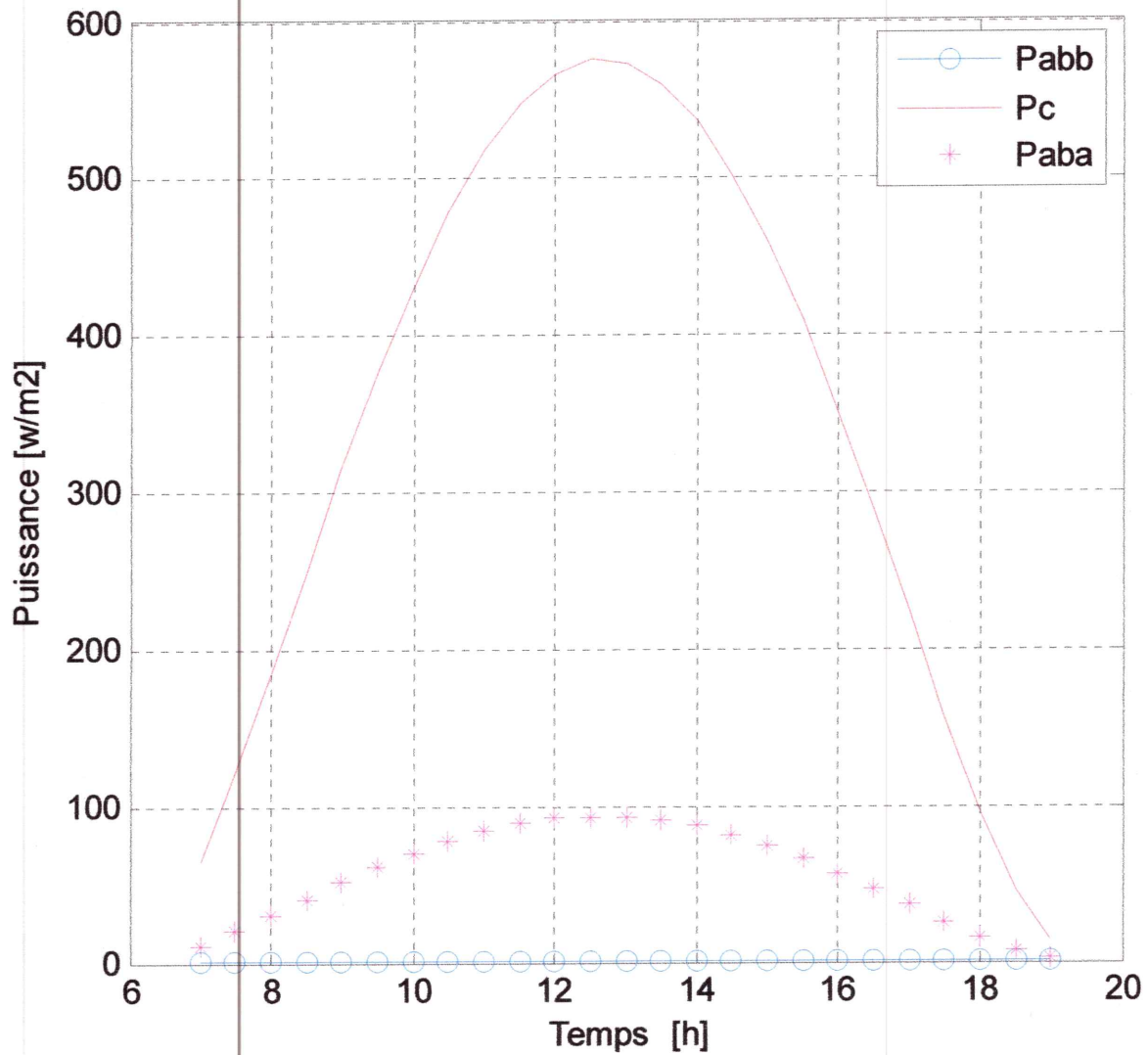


Figure V.3 : La variation temporelle des puissances absorbées par les couches du capteur.



V.5. La variation des températures

la figure V.4 : permet de remarquer que l'allure des courbes dans chaque composant du notre capteur est la même, en outre, les températures les plus élevées sont celles de la cellule solaire, la face interne de la vitre et l'absorbeur A.

On remarque donc une faible différence entre les températures des cellules solaires, la face interne de la vitre et l'absorbeur A qui sont plus importants que celles de la face externe de la vitre, du fluide caloporteur, de l'absorbeur B et de la face interne de l'isolant, notant que la température la plus basse est celle de la face externe de l'isolant.

L'élévation de la température de la cellule est principalement grâce à la puissance absorbée voire au rayonnement non converti en électricité qui reste emprisonné entre la cellule et la vitre, donc cet échauffement supplémentaire est causé par l'effet de serre.

L'augmentation des températures de la face interne de la vitre et l'absorbeur A résulté d'abord de la puissance absorbée par eux et de la chaleur cédée par la cellule solaire par rayonnement et par conduction.

La température de la face externe de la vitre est légèrement inférieure à celle de la face interne, ceci s'explique par l'action du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant.

La température du fluide caloporteur qui atteint une valeur maximale de 316 K, revient à l'échange de chaleur par convection entre ce fluide d'un côté et l'absorbeur A et l'absorbeur B de l'autre côté.

Ainsi l'élévation de la température de la face interne de l'isolant est due essentiellement à son emplacement au-dessous de l'absorbeur B qui a une conductivité thermique élevée, par contre on remarque que la température de la face externe de l'isolant est la plus basse de tous les composants du capteur, ceci s'explique d'une part par la faible conductivité thermique de l'isolant lui-même et d'autre part à son exposition au vent.

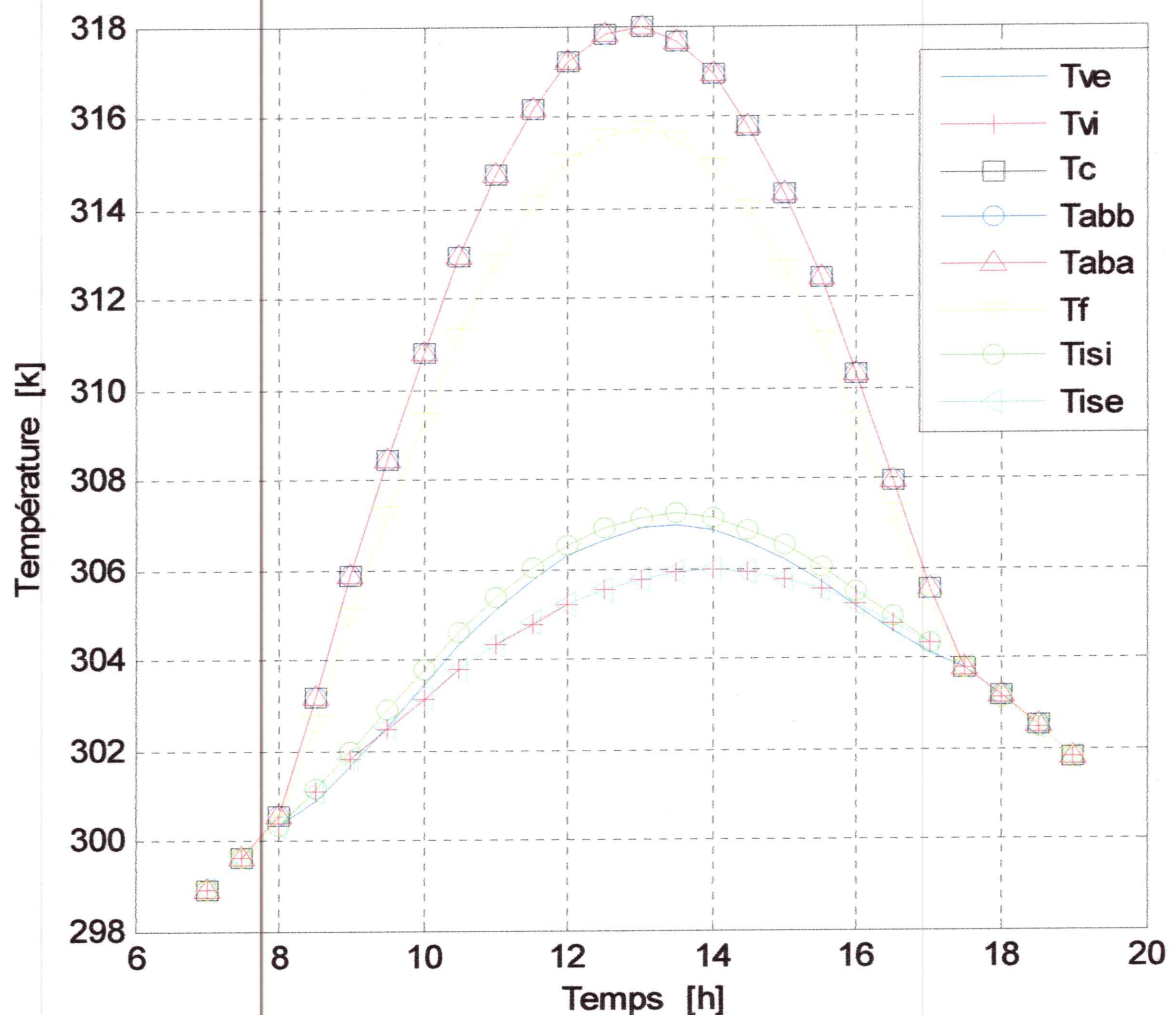
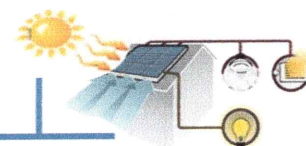


Figure V.4 : La variation temporelle des températures de chaque composant du capteur.

V.6. La variation de la puissance électrique

La figure V.5 : représente l'évolution temporelle de la puissance électrique générée par la cellule en fonction du temps.

D'après cette figure, la puissance électrique produite par les cellules atteint son maximum entre 12 h et 14 h là où le rayonnement est meilleur possible, donc on peut conclure que la variation de la puissance électrique est proportionnelle au rayonnement global.

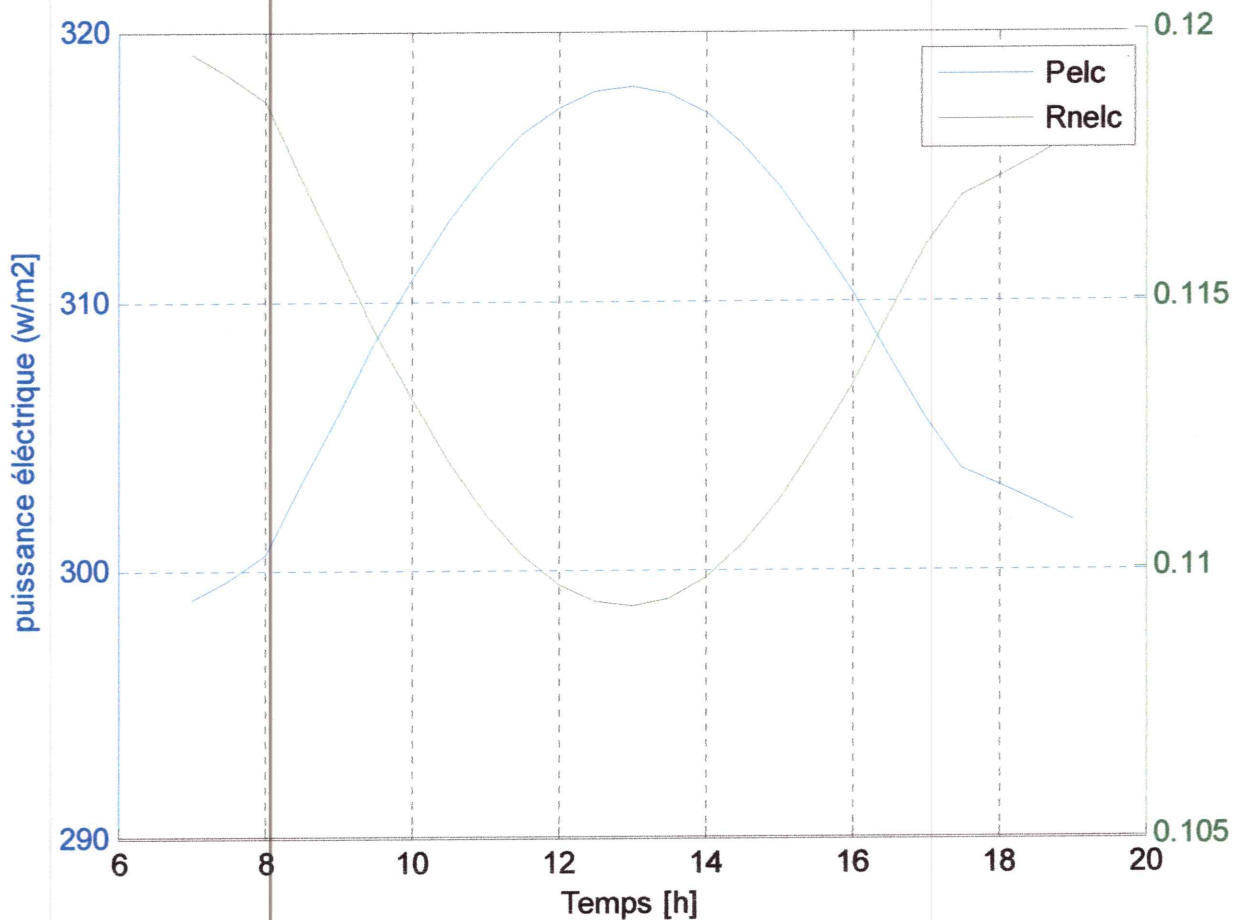
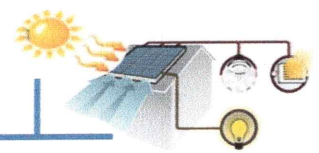


Figure V.5 : La variation de la puissance électrique.

V.7. La variation du rendement électrique

La figure V.6 : illustre la variation temporelle du rendement électrique et la température de la cellule en fonction du temps.

La remarque que peut être faite est que l'augmentation de la température des cellules est néfaste au rendement électrique, sauf que pour une température égale à 25 °C où le rendement est maximal et qui est de l'ordre de 0.12.

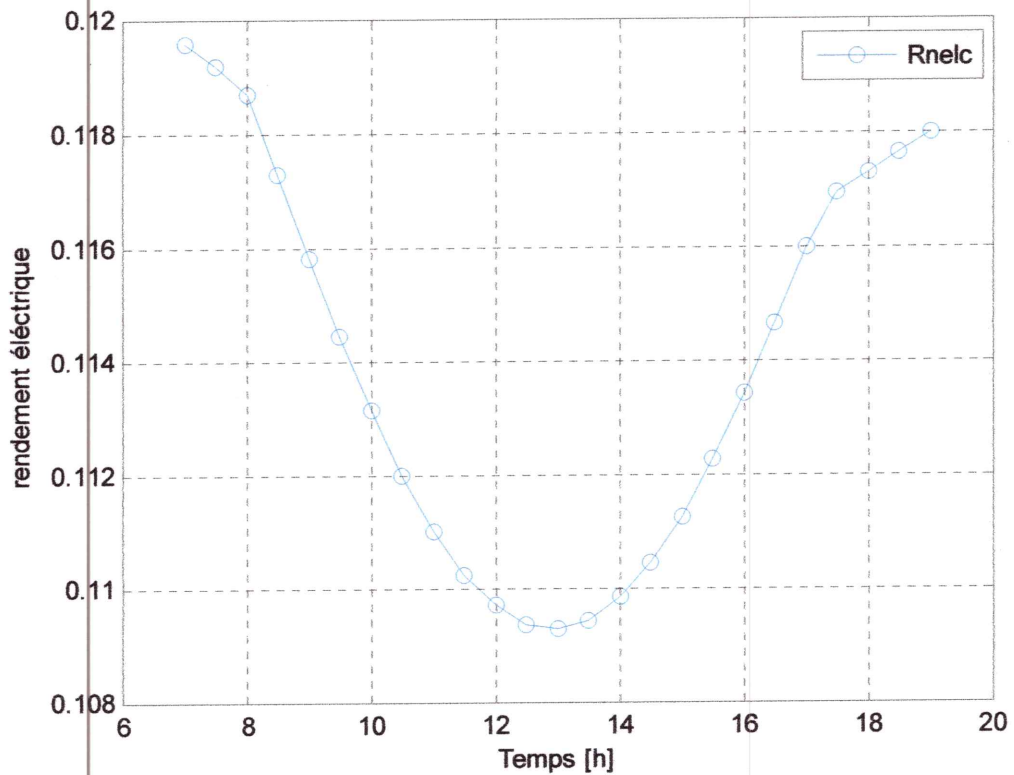
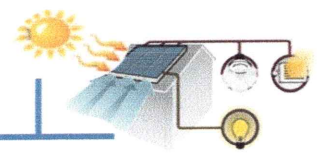


Figure V.6 : La variation du rendement électrique.

V.8. La variation temporelle du rendement thermique

La figure V.7 : montre l'évolution temporelle du rendement thermique en fonction du temps.

D'après cette figure, on constate que le rendement thermique est minimal au début et à la fin de la journée, c'est évident parce que le flux de chaleur est minimal ce qui rend les températures des composants du capteur faibles, ces dernières influent négativement sur le gain énergétique, qui à son tour a la même influence sur le rendement thermique qui sera faible.

Par contre de 12 h jusqu'à 16 h, le flux de chaleur important résulte des températures qui sont les plus élevés au cours de la journée, donc le gain de chaleur est le plus important, ce qui rend le rendement meilleur possible.

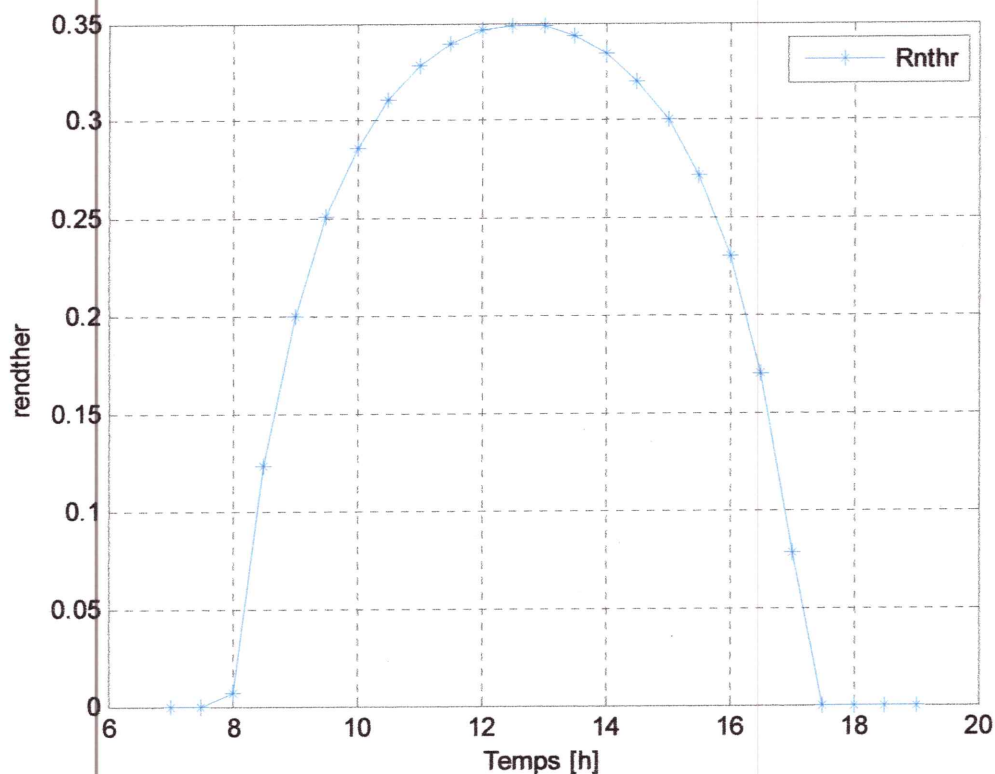


Figure V.7 : La variation du rendement thermique.

V.9. Variation temporelle du rendement global

La figure V.8 : montre l'évolution temporelle du rendement global en fonction du temps.

On remarque que la variation du rendement global dépend aux évolutions du rendement thermique et électrique durant la journée. Ces derniers sont en fonction du flux de chaleur qui est maximal entre 12 h et 14 h, pour cet intervalle même le rendement électrique est minimal par contre celui thermique est maximal, pour la cogénération, le rendement global diminue légèrement puisque l'augmentation du rendement thermique ne compense pas vraiment la diminution le rendement électrique, par contre il est relativement maximal à 12 h 30.

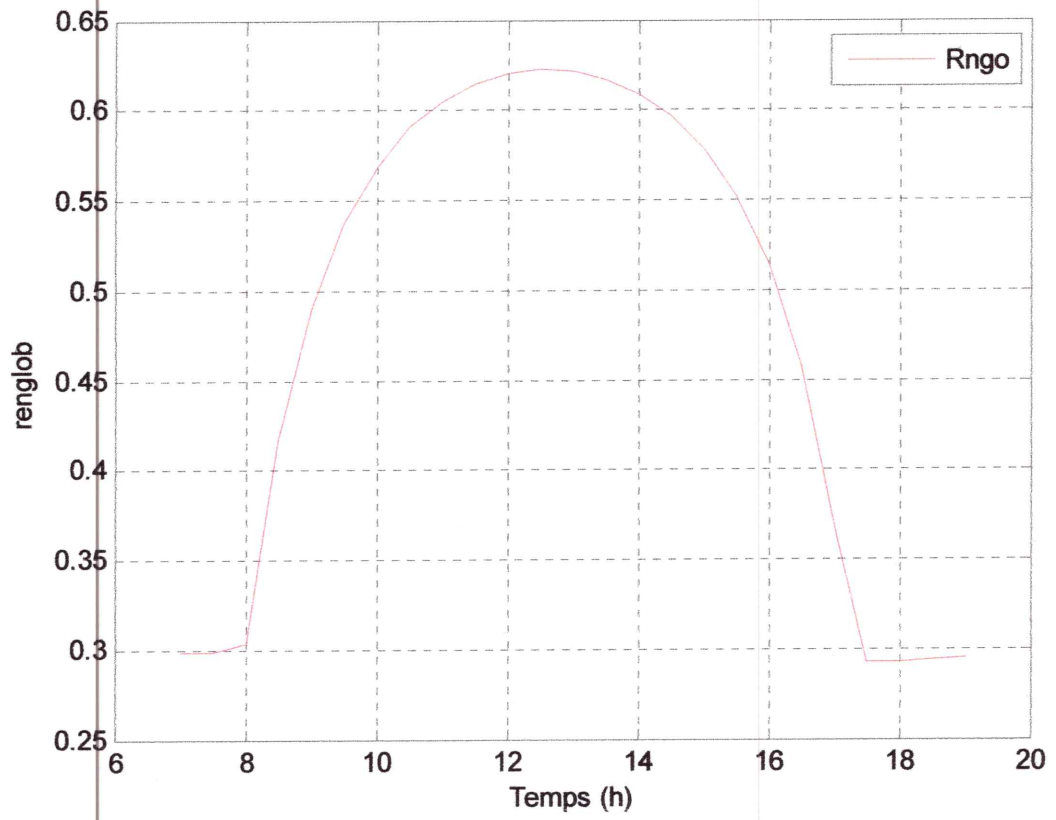
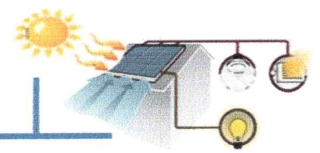

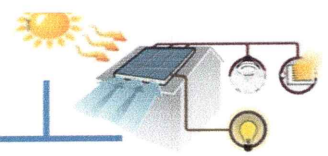


Figure V.8 : La variation temporelle du rendement global.



***Conclusion
générale***



Conclusion générale

Afin de gagner l'énergie électrique et thermique simultanément on fait appel à un capteur solaire hybride PV/T perfectionné au lieu d'utiliser séparément un capteur solaire PV et un système thermique, de sorte qu'on ne va pas minimiser seulement la surface occupée, mais aussi les dépenses.

Dans le cadre de ce mémoire, on a effectué une étude théorique et numérique d'un capteur solaire hybride PV/T où on s'est intéressé à la distribution de la température dans chaque couche du capteur ainsi à l'influence des différents paramètres sur les performances du capteur de manière à tirer les épaisseurs optimales des différentes couches en tenant compte des coûts.

Notre travail été schématisé par les étapes suivantes :

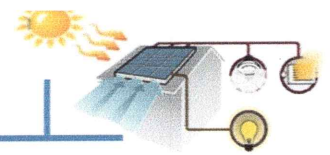
Une étude du gisement solaire qui nous a permis d'estimer la quantité d'énergie incidente dans un lieu et un temps quelconque, suivie d'une étude bibliographique sur les capteurs PV et les types des systèmes hybrides PV/T permettant de savoir le plus performant.

Un bilan énergétique a été établi au niveau de chaque couche du capteur où on a utilisé la méthode itérative de Gauss Seidel pour la résolution de système des équations qui régissent le fonctionnement du capteur en langage MATLAB 2014.

Les résultats obtenus par la simulation nous ont permis d'évaluer l'influence des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du capteur. Ils sont représentés sous :

L'augmentation de la température de la cellule influe négativement sur le rendement électrique ainsi que le rendement global.

Qualitativement, le capteur hybride présente un grand avantage concernant le rendement électrique et global, du fait que la circulation du fluide caloporteur extrait la majorité de la chaleur que le système ne peut la convertir.



Annexe A

A. La méthode de Gauss Seidel

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les grands systèmes linéaires ($A \times T = B$). Plusieurs méthodes itératives appropriées sont utilisées pour la résolution de ces systèmes, dans notre étude on a utilisé celle de Gauss Seidel, puisqu'elle converge rapidement par rapport aux autres.

A.1. Principe de la méthode de Gauss Seidel

Soit le système linéaire suivant :

$$A \times T = B \quad (A.1)$$

Où :

A: Une matrice carrée d'ordre ($n \times n$).

B: La matrice colonne du deuxième membre d'ordre (n).

T: Le vecteur des inconnus d'ordre (n).

La matrice "**A**" s'écrit sous la forme suivante :

$$A = M - N \quad (A.2)$$

Où :

$$M = D - L \quad (A.3)$$

$$N = U \quad (A.4)$$

Avec :

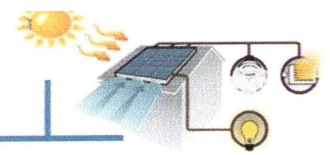
D : La matrice diagonale.

L : La matrice inférieure.

N : La matrice supérieure.

Alors le système (A.1) peut s'écrire ainsi :

$$(M - N) \times T = B \quad (A.5)$$



Dans la méthode de *Gauss-Seidel*, on réécrit (A.5) à partir d'un vecteur initial T^0 , de la manière suivante :

$$T^{(1)} = (D - L)^{-1} \times U \times T^{(0)} + (D - L)^{-1} \times B \quad (A.6)$$

Comme l'inverse de $(D - L)$ peut être compliqué à calculer, il est préférable d'écrire le système comme suit :

$$(D - L) \times T^{(1)} = U \times T^{(0)} + B \quad (A.7)$$

Soit encore :

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^{(0)} + B \quad (A.8)$$

Où :

$$T^{(1)} = D^{-1} \times L \times T^{(1)} + D^{-1} \times U \times T^{(0)} + D^{-1} \times B \quad (A.9)$$

Ce qui est équivalent à :

$$T^{(k+1)} = D^{-1} \times L \times T^{(k+1)} + D^{-1} \times U \times T^{(k)} + D^{-1} \times B \quad (A.10)$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient :

$$T_1^{(k+1)} = (b_1 - a_{12} \times T_2^{(k)} - a_{13} \times T_3^{(k)} \dots \dots \dots - a_{1n} \times T_n^{(k)}) / a_{11}$$

$$T_2^{(k+1)} = (b_2 - a_{21} \times T_1^{(k+1)} - a_{23} \times T_3^{(k)} \dots \dots \dots - a_{2n} \times T_n^{(k)}) / a_{22}$$

$$T_n^{(k+1)} = (b_n - a_{n1} \times T_1^{(k+1)} - a_{n2} \times T_2^{(k+1)} \dots \dots \dots - a_{nn-1} \times T_{n-1}^{(k+1)}) / a_{nn}$$

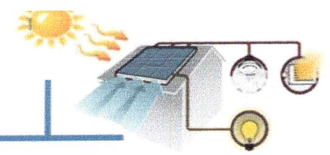
A.2. La condition de convergence

Pour, $k = 1$ jusqu'à k_{max} , ce système d'équations converge si :

$$|T^{(k+1)} - T^{(k)}| < eps$$

Où bien :

$$\frac{|T^{(k+1)} - T^{(k)}|}{|T^{(k+1)}|} < eps$$



Annexe B

B.1. Les caractéristiques physiques appliquées au capteur ($S=1m^2$)

B.1.1. La vitre

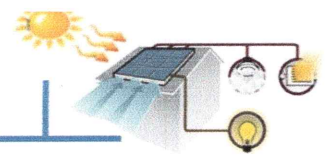
$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_v = 2530 \text{ kg/m}^3 \\ C p_v = 836 \text{ J/kgK} \\ \lambda_v = 0.93 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \varepsilon_v = 0.88 \end{array} \right.$$

B.1.2. L'isolant (Laine de verre)

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_i = 24 \text{ kg/m}^3 \\ C p_i = 919 \text{ J/kgK} \\ \lambda_i = 0.039 \text{ W/m}^2\text{K} \\ \varepsilon_i = 0.11 \\ e_i = 0.04 \text{ m} \end{array} \right.$$

B.1.3. La cellule (Monocristalline)

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_c = 2330 \text{ kg/m}^3 \\ C p_c = 836 \text{ J/kgK} \\ \lambda_c = 0.036 \text{ W/m}^2\text{K} \\ e_c = 0.0003 \text{ m} \\ \alpha_c = 0.85 \\ \varepsilon_c = 0.95 \\ B_c = 0.83 \\ \eta_{el\ ref} = 0.12 \end{array} \right.$$



B.1.4. Le tedlar

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_t = 1390 \text{ kg/m}^3 \\ C_{p_t} = 1400 \text{ J/kgK} \\ \lambda_t = 0.033 \text{ W/m}^2\text{K} \\ e_t = 0.0005 \text{ m} \\ \alpha_t = 0.5 \\ \varepsilon_t = 0.88 \end{array} \right.$$

B.1.5. L'absorbeur

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{ab} = 8000 \text{ kg/m}^3 \\ C_{p_{ab}} = 38 \text{ J/kgK} \\ \lambda_{ab} = 389 \text{ W/m}^2\text{K} \\ e_{ab} = 0.002 \text{ m} \\ \alpha_{ab} = 0.75 \\ \varepsilon_{ab} = 0.04 \end{array} \right.$$

B.2. Le calcul de la température ambiante

La variation de la température ambiante au cours de la journée est une fonction sinusoïdale, où la référence est l'Atlas Solaire Algérien, sachant que l'étude est faite juste pour l'intervalle dans lequel le soleil arrive sur la surface du capteur.

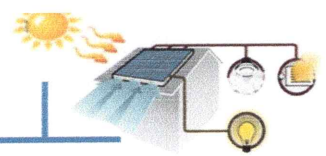
$$T_a = \left[\frac{T_{a \max} - T_{a \min}}{2} \right] \cdot \sin \left[\frac{(TL - 8) \cdot \pi}{12} \right] + \left[\frac{T_{a \max} - T_{a \min}}{2} \right] \quad (B.1)$$

Avec :

$T_{a \max}$: La température maximale journalière moyenne du mois considéré.

$T_{a \min}$: La température minimale journalière moyenne du mois considéré.

TL : Le temps local.



B.3. Les caractéristiques thermo-physiques de l'air [27]

Dans ce qui suit, nous avons exprimé les caractéristiques thermo-physiques de l'air en fonction de la température prise en C °.

B.3.1. La conductivité thermique ($W.m^{-1}.c^{-1}$) :

$$\lambda = 7.57 \times 10^{-5} \times T + 0.0242 \quad (B.2)$$

B.3.2. La viscosité dynamique (Pa.s) :

$$\mu = 10^{-5} \times (0.0046 \times T + 1.7176) \quad (B.3)$$

B.3.3. La viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$) :

$$\alpha = 10^{-5} \times (0.0146 \times T + 1.8343) \quad (B.4)$$

B.3.4. Le nombre de Prandtl :

$$\rho_r = 10^{-4} \times (-2.54 \times T) + 0.7147 \quad (B.5)$$

B.3.5. Le coefficient de dilatation (K^{-1}):

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (B.6)$$

B.3.6. La masse volumique ($kg.m^{-3}$):

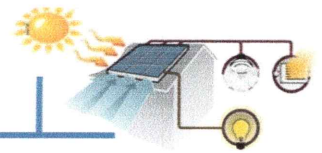
$$\rho = \frac{353}{T + 273} \quad (B.7)$$

B.3.7. La chaleur spécifique (J/kg.K) :

$$C_p = 1008$$

C_p : La chaleur spécifique des l'air.

T : La température de l'air.



Bibliographie

- [1]: **KHELIFA Abdelkrim** , Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV/T ,2011.
- [2]: **CNFPT** , Noémie Poize – Rhônalénergie-Environnement, 2007.
- [3] : **Guide des Energies Renouvelables**, Ministère de l'Energie et des Mines. Edition 2007.
- [4] : **BENBOUZA CHAOUKI** , roduction et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés, UNIVERSITE DE CONSTANTINE1 2014.
- [5]**Synthese_Production_photovoltaique** , Science et technologies de l'industrie et du développent durable CI 9 2013 .
- [6] **L. EL CHAAR**, Review of photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol 15. p 2165–2175. 2011 Elsevier Ltd.
- [7] **A. LABOURET & M. VILLOZ**, *Energie solaire photovoltaïque*. 3^e édition 2003. DUNOD
- [8] **C. JULIAN CHEN**, *Physics of Solar Energy*. 2011 John Wiley & Sons, Inc.
- [25]: **N.ASTE et al**, Design, development and performance monitoring of a photovoltaic/thermal (PVT) air collector. Renewable Energy . Vol 33.p 914–927. 2007 Elsevier Ltd.
- [9] : **Boer**, «Solar conversion under consideration of energy and entropy», Sol Energy 2003; 74:525–8.
- [10] : **Hendrie**, «Photovoltaic/thermal collector development program», final report. Report, MIT, 1982.
- [11] : **Touafek et al**, « Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride photovoltaïque Thermique », Revue des Energies Renouvelables 2008 ; 11(1) : 153-165.



- [12] : **Ben Cheikh El Hocine et al**, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°2 (2013) 257,268 .
- [13] : Centre de recherche et de développement de l'ECAM –CERDECAMz.
- [14] : **Tripanagnostopoulos et al** , «Application aspects of hybrid PV/T solar systems», In: ISES Solar World Congress, Goteborg, 2003.
- [15] : **Tiwari et sodha**, «Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model», Sol Energy Mater Sol Cells 2007.
- [16] : **Tiwari et al** , «Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system», International Journal of Thermal Sciences 2009; 48: 154–164.
- [17] : **B.Bouzidi** , Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 521 -531.
- [18] : **f.sarhaddi** , Exergetic performance evaluation of a solar photovoltaic (PV) array. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, vol. 4, no. 3, p. 502-519.
- [19] : **malek et al** , Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2 (2012) 249 – 264.
- [20] : **N.moummi** , Ferdjani Ahmed Taha Soutenu publiquement le 07/02/2013 .
- [21] : **A.Fudholi et al** [13] : Ferdjani Ahmed Taha Soutenu publiquement le 07/02/2013.
- [22]:**Miroslav Bosanac et al**, Photovoltaic/Thermal Solar Collectors and Their Potential in Denmark , Danish Technological Institute, , EFP project 1713/00-0014 ,2013.

Résumé

P our but d'exploiter l'énergie solaire qui est gratuite et inépuisable, on a étudié les capteurs solaires hybrides PV/T à air qui possèdent l'avantage de produire à la fois l'électricité par le biais des PV et l'énergie thermique via l'absorbeur.

Ce projet contient une étude économique, d'où on a évalué les températures dans chaque couche du capteur , on a aussi utilisé deux absorbeur dans la configuration du system, pour augmenter le rendements. Comme on a traité l'évolution de la fonction coût.

Mots clés : capteur solaire, hybride, photovoltaïque ,thermique.