

République Algérienne Démocratique et Populaire
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



UNIVERSITE DE JIJEL
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique

جامعة جيجل
مكتبة العلوم والتكنولوجيا
رقم المجلد : M 2163



Projet de Fin d'Études

*Pour l'Obtention du Diplôme
De Master 2 en Génie Mécanique
Option : Energétique*

Thème

MODELISATION DES TRANSFERTS THERMIQUES
COUPLÉS DANS UNE CELLULE
PHOTOVOLTAÏQUE

Les membres du jury :

*Président : Beicha.R
Examineur : Ghelab.A
Encadreur : Saadi.S*

Présenté par :

*KEDJA SAMIR
BEDOUD AHMED*

Promotion 2015

Université de Jijel

Remerciement

Je remercie Dieu tout puissant qui m'a accordé la chance de vivre ce jour pour voire le fruit de mes études et de passer les meilleurs moments de cette joie ; celle du succès avec ma famille qui m'a porté toujours au chaud de leurs cœurs qui a toujours fait le possible pour moi

Je tiens à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire plus particulièrement :

*Mon encadreur **M^{me} SAADI.S** a proposé ce sujet de recherche, et qui m'a encadré et soutenu par ses conseils, sa compréhension et ses encouragements*

*Je tiens aussi à présenterons remerciements aux **membres de jury** qui ont accepté de juger mon modeste travail. Et je n'oublie pas tous les enseignants du département **génie mécanique**.*

Dedicace

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL

À MES CHERS PARENTS

À MES CHERS FRÈRES

À TOUTE LA FAMILLE **KEDJA**

À MON ENCADREUR MME **SAADIS**

À TOUS MES COLLÈGUES ET MES AMIS PARTOUT

À TOUS CEUX QUI ONT SACRIFIÉ LEUR TEMPS POUR LA SCIENCE

ET À TOUS CEUX QUI UTILISENT LA SCIENCE POUR LE BIEN

ET LA PROSPÉRITÉ DE L'HUMANITÉ

"SAMIR"

Dedicace

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL

À MES CHERS PARENTS

À MES CHERS FRÈRES

À TOUTE LA FAMILLE **BEDOUD**

À MON ENCADREUR MME **SADIS**

À TOUS MES COLLÈGUES ET MES AMIS PARTOUT

À TOUS CEUX QUI ONT SACRIFIÉ LEUR TEMPS POUR LA SCIENCE

ET À TOUS CEUX QUI UTILISENT LA SCIENCE POUR LE BIEN

ET LA PROSPÉRITÉ DE L'HUMANITÉ

"AHMED"

Liste des Figures

Figure I.1 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.	4
Figure I.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.	5
Figure I.3 : coupe d'un module photovoltaïque.	6
Figure I.4 : jonction de type NP.	8
Figure I.5 : différents types des cellules en silicium.	9
Figure I.6 : Cellule solaire organique.	11
Figure I.7: La distribution de la température dans les cellules photovoltaïques pour le panneau (a) sans refroidissement, (b) avec un refroidissement.....	12
Figure I.8: Rendement électrique fonction de la température de la cellule.....	13
Figure I.9: Rendement électrique en fonction du débit d'air.....	13
Figure I.10: Les vues schématiques des canaux.....	14
Figure I.11: Variation de la température moyenne de la cellule photovoltaïque par rapport à la température de référence à deux canaux.....	15
Figure I.12 : Les mesures de conversion de PV à différentes profondeurs.....	15
Figure I.13 : Le rendement électrique en fonction le débit d'air: simple passe.....	16
Figure I.14 : Le rendement électrique en fonction du débit d'air: double passe.....	16
Figure I.15 : (a) Vue en coupe du module PVT de type A , (b) vue en coupe du module PVT de type B.....	17
Figure I.16 : Variation horaire de la température de la cellule et l'efficacité de PV Pour le type A et B.....	18
Figure I.17 : les valeurs de température expérimentales et simulé du module PV.....	19
Figure II.1 : Le schéma électrique équivalent a étudié.....	19
Figure II.2 : schéma de mode de transfert de chaleur par conduction.....	20

Figure II.3: schéma de mode de transfert de chaleur par convection.....	21
Figure II.4 : schéma de mode de transfert de chaleur par convection naturelle.....	22
Figure II.5 : schéma de mode de transfert de chaleur par convection forcé.....	23
Figure II.6 : schéma de mode de transfert de chaleur par rayonnement.....	24
Figure II.7 : Le schéma électrique des différentes couches.....	27
Figure II.8: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	33
Figure III.1 : La variation temporelle de rayonnement solaire global.....	38
Figure III.2 : Variation temporelle des températures de chaque composant du capteur.....	38
Figure III.3 : Variation temporelle de la température de cellule et le rendement électrique.....	39
La Figure III.4 : La variation temporelle de la puissance : (a) électrique. (b) absorbé par la cellule ; (c) dissipée par la cellule.....	40
Figure III.5 : L'influence de la vitesse du vent sur la température de la cellule.....	41
Figure III.6 : L'influence de la vitesse du vent sur le rendement électrique.....	42
Figure III.7 : L'influence de la vitesse du vent sur la chaleur dissipé.....	42
Figure III.8 : variation temporelle de la température de la cellule en fonction de l'épaisseur du verre.....	43
Figure III.9 : variation temporelle de la température de la cellule en fonction de l'épaisseur du tedlar.....	44
Figure III.10 : variation de rendement électrique en fonction de l'épaisseur du verre.....	44
Figure III.11 : variation du rendement électrique en fonction de l'épaisseur du tedlar.....	45
Figure III.12: variation temporelle de la chaleur dissipé en fonction de l'épaisseur du verre.....	46
Figure III.13 : L'influence du coefficient d'échange par convection sur le rendement électrique.....	47
Figure III.14 : La variation temporelle du rendement électrique.....	47
Figure III.15 : Caractéristiques $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différents ensoleillements à une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$	49

Figure III.16:Caractéristiques $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différent sensoleillements à une température constante $T=25^{\circ}C$49

Figure III.17: Caractéristique $I = f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures T à ensoleillement constant $G =1000W/m^2$50

Figure III.18:Caractéristique $P = f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures T à ensoleillement constant $G =1000W/m^2$50

*Sommaire***Nomenclature**

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1- Introduction	03
--------------------------------	----

I.2- Généralités sur les cellules photovoltaïques	04
--	----

I.2.1- Principe de fonctionnement d'une cellule	04
--	----

I.2.2- L'effet photovoltaïque	05
--	----

I.2.3- Le module photovoltaïque	05
--	----

I.2.4- Les Propriétés des Semi-conducteurs	07
---	----

I.2.5- Technologie d'une cellule photovoltaïque	08
--	----

a- Le Silicium	08
-----------------------------	----

a-1.Le Silicium monocristallin	09
---	----

a-2.Le Silicium poly cristallin	09
--	----

a-3.Le Silicium amorphe (a-si)	09
---	----

b-Nouvelle technologie	10
-------------------------------------	----

I.4 -Recherche bibliographique	12
---	----

Chapitre II : Modélisation d'un capteur hybride PV

II.1- Introduction	19
---------------------------------	----

II.2-Éléments constitutants d'un capteur PV	19
--	----

II.3- rappel sur le Transfert de Chaleur	20
---	----

II.3.1- Conduction.....	20
II.3.2-Convection.....	20
II.3.2.1- Convection naturelle ou libre.....	22
II.3.2.2- Convection forcée.....	22
II.3.3-Transfert par rayonnement.....	24
II.3.3.1-Puissance échangée entre deux corps.....	25
II.4-Bilan énergétique sur le système étudié.....	26
II.5- Le Schéma électrique équivalent.....	27
II.6-bilan thermique sur.....	27
- le verre.....	27
- la cellule Photovoltaïque.....	29
- le Tedlar.....	30
II.7-Le rendement électrique du capteur PV.....	31
II.8-Résolution du système d'équations.....	32
II.9-Modèle électrique d'un panneau PV.....	33
II.9.1-Courant de court-circuit.....	34
II.9.2-Tension de circuit ouvert.....	34
II.9.3- Point de fonctionnement optimal.....	34
II.9.4- Rendement énergétique maximum.....	35
II.9.5-Température de la cellule.....	35
Chapitre III : Résultats et Discussions	
III.1-Les résultats de la simulation numérique.....	36

III.1.1-La variation temporelle du rayonnement global.....	37
III.1.2- La variation des températures des différents éléments du capteur PV.....	37
III.1.3- La variation temporelle de la température de la cellule et le rendement électrique.....	37
III.1.4-La variation temporelle de la puissance électrique.....	39
III.1.5- Influence de la variation de la vitesse du vent.....	41
III.1.6-L'effet de l'épaisseur du verre et du tedlar.....	43
III.1.7-L'effet de coefficient d'échange par convection sur le rendement électrique.....	46
III.1.8- La variation temporelle du rendement électrique.....	46
III.2-Les caractéristiques d'un panneau PV.....	48
III.2.1-L'influence de l'irradiation sur les caractéristiques d'un panneau PV.....	48
III.2.2-L'influence de la température sur les caractéristiques d'un panneau PV.....	48
Conclusion générale.....	51
Annexes.....	53

Nomenclature

Grandeurs

$a:$	Azimut ($^{\circ}$)
$\beta:$	L'inclinaison du panneau PV ($^{\circ}$)
$C_p:$	Chaleur spécifique (J/kg.K)
$H_r:$	Coefficient d'échange par rayonnement (W/m ² .K)
$H_c:$	Coefficient d'échange par conduction (W/m.K)
$h:$	Hauteur ($^{\circ}$)
$K:$	Conductivité thermique (W/m.K)
$L:$	Longitude ($^{\circ}$)
$m:$	Masse (kg)
MPPT	le principe nommé maximum power point tracker
$P:$	Puissance absorbée (W/m ²)
$Q:$	énergie dissipée sous forme de chaleur (W)
$S:$	Surface du module (m ²).
$T:$	Température (K)
$T_a:$	Température ambiante (K)
$TSV:$	Temps solaire vrai (h)
$TSM:$	Temps solaire moyen (h)
$TU:$	Temps universel (h)
$V_v:$	Vitesse (m/s)
$\nu:$	viscosité cinématique (m ² /s)
$\vec{\Phi}:$	Flux de chaleur en watt (W).
$\sigma:$	Constante de Stéphane Boltzmann (W/m ² .K ⁴)
$\varepsilon:$	Emissivité

Nomenclature

<i>α :</i>	<i>Coefficient d'absorption</i>
<i>η_{el} :</i>	<i>Rendement électrique (%)</i>
<i>θ :</i>	<i>Angle (°)</i>
<i>μ :</i>	<i>Viscosité dynamique (kg/m.s)</i>
<i>δ :</i>	<i>Déclinaison du soleil (°)</i>
<i>ϕ :</i>	<i>Latitude (°)</i>

Indice

<i>V :</i>	<i>Vitre supplémentaire</i>
<i>S :</i>	<i>Sol</i>
<i>Ciel :</i>	<i>Ciel</i>
<i>ce :</i>	<i>Cellule solaire</i>
<i>dir :</i>	<i>Direct</i>
<i>dif :</i>	<i>Diffus</i>
<i>g :</i>	<i>Global</i>
<i>ted :</i>	<i>Tedlar</i>



**Introduction
générale**

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock des ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Ainsi, le développement des nouvelles sources d'énergie non polluantes est retenu comme stratégie incontournable pour relever ces défis énergétiques et environnementaux, quel que soient les efforts que la communauté internationale pourra faire dans la maîtrise de la demande d'énergie [1].

Par énergie renouvelable on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [2].

L'énergie solaire photovoltaïque convertie directement à partir du rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité par l'utilisation des modules photovoltaïques composés des cellules solaires ou des photopiles qui réalisent donc la transformation d'énergie. Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs produits à partir de la matière première qui doit être très pure, comme le silicium qui est l'élément de base. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité.

Le rayonnement solaire incident peut être utilisé pour développer le courant électrique par les cellules photovoltaïques. Plus de 80% du rayonnement tombant sur les cellules photovoltaïques n'est pas converti en électricité, mais réfléchi ou converti en énergie thermique, ce qui provoque l'augmentation de la température des cellules. Cette augmentation de la température peut mener à la dégradation de l'efficacité des cellules ainsi que leur durée de vie.

Le problème des cellules photovoltaïques, est qu'en absorbant le rayonnement issue du soleil, une partie est convertie en électricité et l'autre dissipée sous forme de chaleur au milieu environnant entraîne ainsi l'augmentation de leur température.

A travers les différents composants du PV on peut identifier différents modes de transfert thermique. C'est dans ce contexte que nous allons mener notre étude. L'objectif de notre travail consiste à modéliser le transfert thermique à travers les différentes couches d'un panneau solaire et voir l'importance des ~~plusieurs~~ des paramètres thermiques et géométriques sur l'amélioration du rendement ainsi que la diminution de la température du PV.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres avec une conclusion générale:

Chapitre1 : Ce chapitre comprend l'explication du principe de fonctionnement de la cellule PV avec les différentes technologies de la cellule photovoltaïque, ceci sans omettre les définitions sur les différents types des transferts de chaleur. Nous nous intéressons dans ce chapitre à travers notre recherche bibliographique sur des études réalisées par des chercheurs sur les capteurs PV qui consiste à l'amélioration des performances thermiques et électriques.

Chapitre2 : Ce chapitre contient une modélisation numérique d'un capteur PV dans lequel nous avons appliqué le bilan énergétique sur le system d'un capteur PV. Nous avons obtenu des équations mathématiques qui ont été résolu par la méthode Runge-kutta en langage Fortran. Cette méthode de résolution est suivie par une simulation numérique.

Chapitre3 : Nous avons présenté nos résultats sous forme de graphes. Ce chapitre comporte une interprétation et une discussion des résultats obtenus en comparaison avec les phénomènes physiques.



Chapitre I

I.1- Introduction:

L'exploitation de l'énergie solaire a fait l'objet de plusieurs recherches menées d'un développement particulier à ce qui concerne trois types: l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique.

L'électricité photovoltaïque a dans un premier temps été développée pour des applications autonomes sans connexion à un réseau électrique pour par exemple des satellites de télécommunication ou pour des habitations isolées. On la trouve maintenant dans des applications de diverses puissances comme les calculatrices, les montres et d'autres objets d'utilisation courante. En effet, cette électricité produite par des cellules photovoltaïques individuelles peut alimenter diverses charges continues sans difficulté. Plus récemment, avec l'émergence d'installations photovoltaïques connectés au réseau de distribution, le photovoltaïque a connu un développement important en tant que moyen de production d'électricité [3], plus de 22 GW ont été produits en 2010 contre 0.4 GW en 1998. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible. Donc la conception et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

L'exposition extérieure des panneaux photovoltaïques regroupe une combinaison complexe de facteurs (le vent, la pluie, la neige, la chaleur, la lumière....) qui provoque leurs dégradation au court du temps réduisant ainsi leur rendement.

Les chercheurs visent à améliorer le rendement des cellules photovoltaïques et à abaisser leur coût de production. Parallèlement à la fabrication des cellules solaires, les expériences de ces dernières années ont montré que la mise au point d'une encapsulation économique constitue une activité scientifique très importante car la sous estimation de certaines contraintes climatiques entraîne une rupture mécanique d'interconnexions des cellules solaires, la dégradation des propriétés physicochimiques du polymère et par conséquent une perte considérable de la puissance produite par le module PV [4]. Pour cette raison, le procédé d'encapsulation d'un module doit être exécuté de la manière la plus performante afin de pallier à toute défaillance et prolonger sa durée de vie. [5].

Le problème des cellules photovoltaïques, est l'augmentation de leur température vu que pas toute l'énergie absorbant le rayonnement issue du soleil, une partie est convertie en électricité, l'autre dissipée sous forme de chaleur au milieu environnement entraîne.

I.2- Généralités sur les cellules photovoltaïques :

I.2-1- Principe de fonctionnement d'une cellule :

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants Optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [6]. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm^2 ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. la figure (I.1) suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [7].

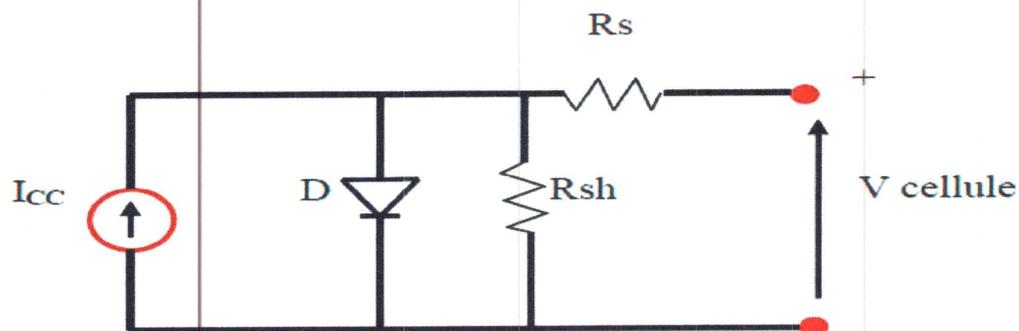


Figure I.1: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction [6]. Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication.

I.2.2- L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet Photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [8]. Les performances du rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces [9]. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [10]. La figure (I.2) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

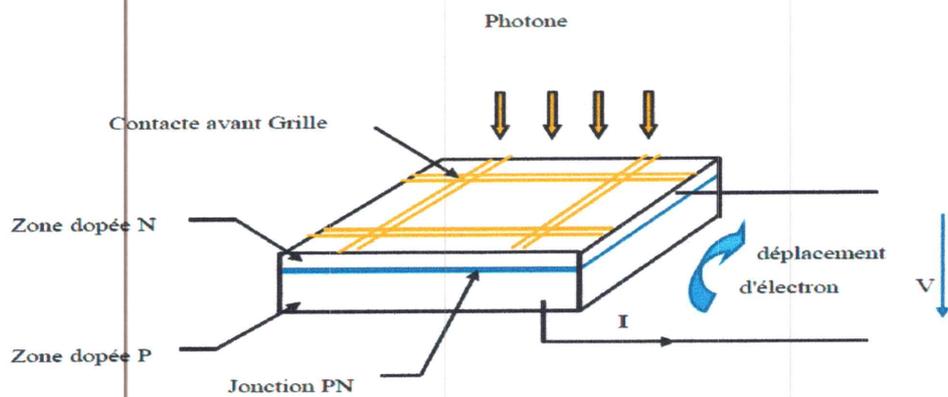


Figure I.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.

I.2.3- Le module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition c'est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. Il est en lui même, un système complexe composé de cellules photovoltaïques, d'intercalaires, de diodes par passe, de connecteurs, d'une boîte de jonction, de câbles, d'un verre de protection sur la face avant et d'un verre ou d'un film en fluorure polyvinylique sur la face arrière du module (figure I.3) [11].

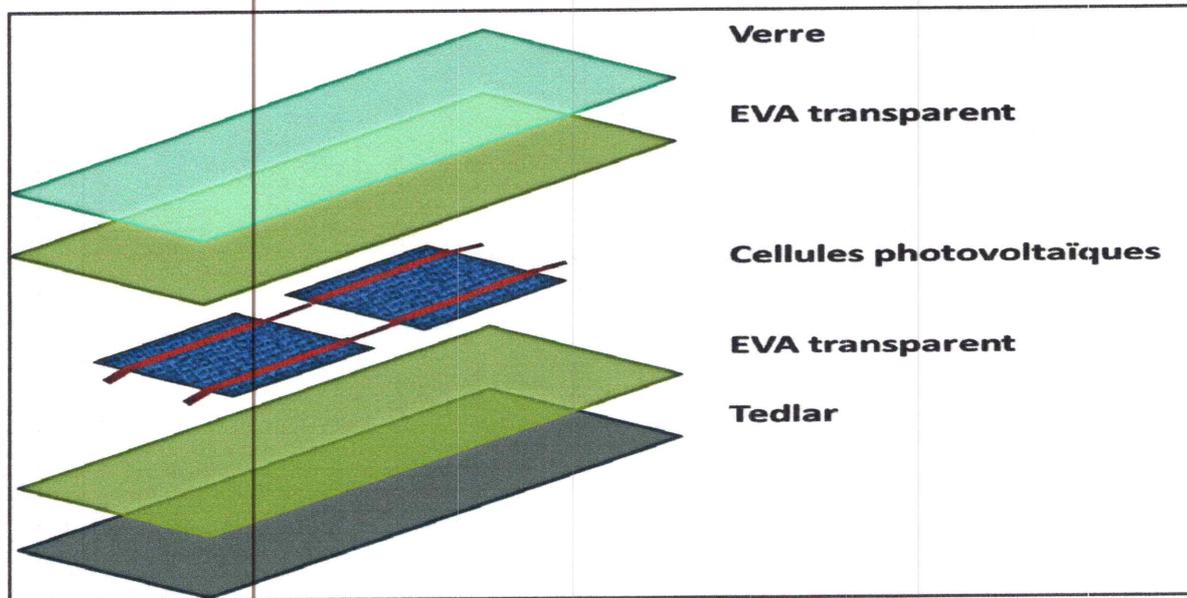


Figure I.3 : coupe d'un module photovoltaïque.

Les fonctions et caractéristiques physiques de ces divers matériaux sont données dans le tableau ci dessous (k = conductivité thermique ; e = épaisseur du matériau considéré).

	Fonction	Caractéristiques
Plaque du verre	Transparente, résistante aux chocs (le verre ordinaire absorbe une partie importante des rayonnements) ce verre et représente l'avantage d'étanchéité excellente et haute transmission du rayonnement solaire.	$k_{verre} = 1.8W/(m.k)$ $e_{verre} = 4mm$ $C_p = 500j/kgk$ $\rho = 3000kg/m^3$
EVA (éthylène -vinyle acétate)	d'enrobages bons résistance aux UV stable en température.	$k_{eva} = 0.23 W/(m.k)$ $e_{eva} = 0.5mm$
Cellules PV	Fines tranche planes fabriquées à partir de matériau semi conducteur la majorité des cellules solaire en silicium.	$k_{si} = 148 W/(m.k)$ $e_{si} = 0.2mm$
Tedlar	Film en PVF (polyvinyle-Floride) protégeant l'arrière du PV contre l'humidité .le Tedlar blanc a le pouvoir de réfléchir une partie de la lumière qui est par venue a traverser les cellules .	$k_{Ted} = 0.2 W/(m.k)$ $e_{Ted} = 4mm$

Tableau I.1-Les fonctions et caractéristiques physiques de matériaux.

I.2.4- Les Propriétés des Semi-conducteurs :

Un Semi-conducteur est un composant dont la conductivité électrique (plus importante que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice SiO_2 , donc très abondant dans la nature.

Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P.

La figure (I .4) montre comment se font les liaisons dans un cristal de silicium

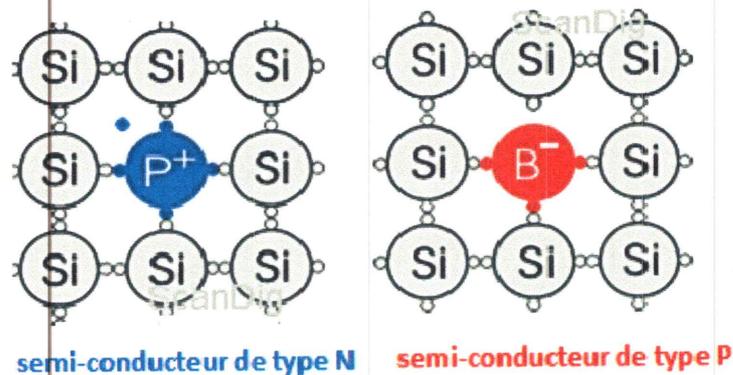


Figure I.4 : jonction de type PN.

Chaque Si comporte 4 électrons périphériques, appelés électrons de valence, et chacun de ses quatre voisins apporte un électron à mettre en commun pour créer quatre liaisons avec ses plus proches voisins. Il y a donc huit électrons externes autour de chaque Si (configuration stable). Le principe est ensuite d'utiliser les éléments voisins dans la classification périodique l'une présentant un excès d'électrons grâce au phosphore (P) et l'autre un déficit en électrons grâce au Bore (B), sont dites respectivement dopée de type N et dopée de type P.

I.2.5- Technologie d'une cellule photovoltaïque :

a- Le Silicium :

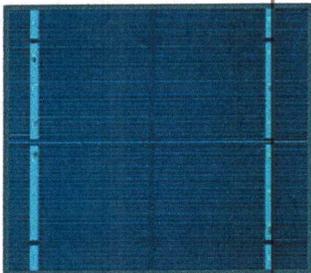
La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le Silicium monocristallin, le Silicium poly cristallin et le Silicium amorphe [12, 13].

a-1. Le Silicium monocristallin :

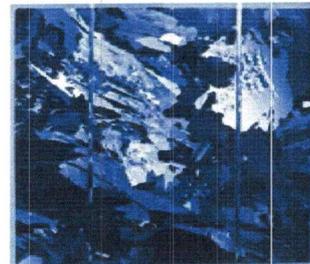
Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes. Le rendement du Silicium monocristallin est le plus élevée, il comprit entre 12 % et 20 % pour les cellules industrielles, son cout est élevé.

a-2. Le Silicium poly cristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14%.



(a)

Cellule monocristallin(a)

(b)

cellule poly-cristallin(b)**Figure I.5 : différents types des cellules en silicium.****a-3. Le Silicium amorphe (a-si) :**

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction.

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [14].

Le tableau ci dessous présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus utilisés d'une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium mono cristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse Prix moins élevé que les cristallins Bons rendements en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil

Tableau I.2:- Avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques.

b- Nouvelle technologie :

On utilise de plus en plus des matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light-Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. [15].

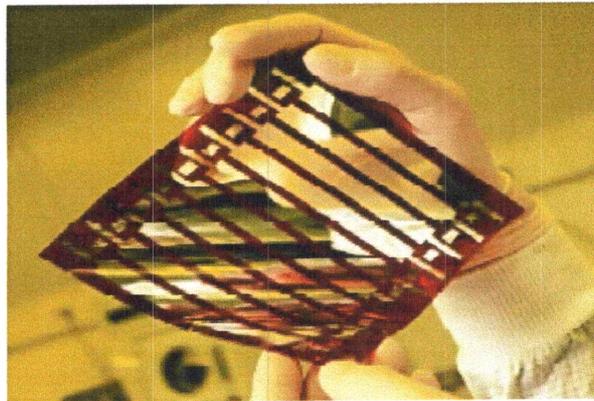


Figure I.6 : Cellule solaire organique.

I.3 -Recherche bibliographique :

M. Usama Siddiqui et al [16]: L'objectif de leur travail était de développer un modèle thermique pour simuler les performances du module photovoltaïque avec et sans refroidissement. En utilisant le modèle thermique développé et couplé successivement avec un modèle de rayonnement et un modèle électrique leur résultats montrent qu'une variation du rayonnement absorbée entre (200 -1000W/m²) et une température ambiante constante (25°C) les performances du panneau PV avec refroidissement sont très peu d'influencées, alors qu'une variation de la température ambiante (0-50°C) et un rayonnement absorbée constant égale à 800 W/m², le rendement du panneau sans refroidissement est réduit de manière significative.

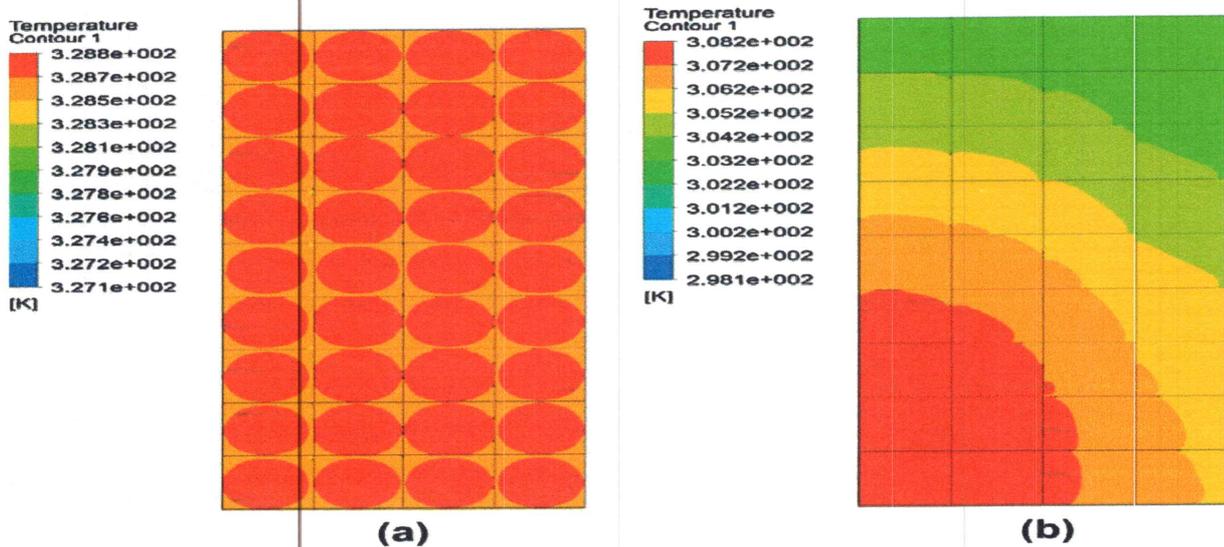


Figure I.7: La distribution de la température dans les cellules photovoltaïques pour le panneau (a) sans refroidissement, (b) avec un refroidissement.

De les diverses études menée a l'aide de ce modele les conclusions suivantes ont été tirées dans ce tableau :

	Avec refroidissement	Sans refroidissement
T = 25°C = constante Rayonnement absorbée = 200 - 1000 W/m ²	Efficacité=10.5% Puissance électrique = 120 W	Efficacité=8.47% Puissance électrique=17.8 W
T = 0 - 50°C Rayonnement absorbée = 800 W/m ² =constante	Efficacité = 10.7% Puissance électrique = 98 W	Efficacité=10.1% Puissance électrique = 42.7 W

Teo et al en 2011 [17] : ont fait une étude expérimentale avec et sans refroidissement actif pour l'étude du rendement électrique et thermique du module photovoltaïque. Pour refroidir activement les cellules photovoltaïques, ils ont fixé une rangée des conduits parallèle entrée / sortie de collecteur pour une distribution uniforme du flux d'air à l'arrière du panneau photovoltaïque.

Les expériences faites sans refroidissement actif montrent que la température du module est élevée et les cellules solaires ne peuvent atteindre un rendement de 9.8%.

Par contre, avec refroidissement actif, leur température a chuté d'une manière significative et que le rendement de la cellule photovoltaïque augmente de 12% jusqu'à 14%. Un modèle de simulation de transfert de chaleur a été conçu pour comparer le profil de température réel du module PV, ils ont obtenu à un bon accord entre la simulation et les résultats expérimentaux.

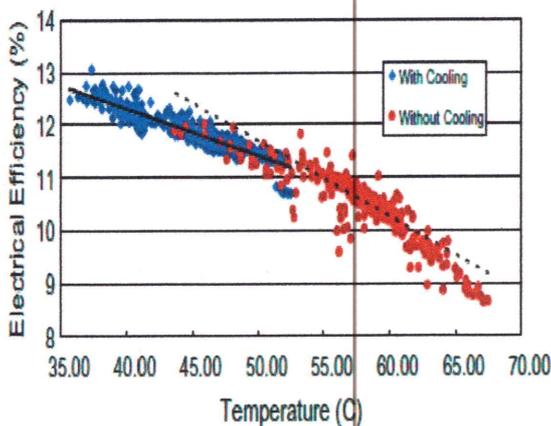


Figure I.8: Rendement électrique en fonction de la température de la cellule.

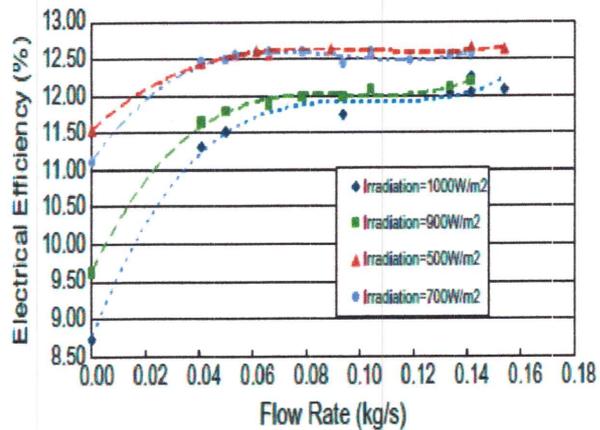


Figure I.9: Rendement électrique en fonction du débit d'air.

N. Karami et al en 2014 [18] : Ont fait une étude expérimentale sur les performances des cellules PV par refroidissement en utilisant deux formes différentes de canaux (droit et hélicoïdal) en fonction du débit des deux fluides, l'eau et la Boehmite ($AlOOH \cdot xH_2O$) comme nano fluide. Les canaux ont été fabriqués dans deux configurations différentes : droit et hélicoïdale. Les performances de refroidissement du nano fluide ont été évaluées à partir des résultats obtenus pour la température moyenne et la puissance électrique de la cellule photovoltaïque. Les résultats ont montré que les nano fluide ont une meilleur influence sur la diminution de la température moyenne de la cellule photovoltaïque que lorsqu'on utilise de l'eau: La température de la cellule atteint 18.33 and 24.22°C et un rendement de 20.57% 37.67% pour le canal droit et hélicoïdal respectivement et cela pour une concentration massique du nanofluide de 0.1% . Cependant en changeant la concentration leurs résultats montre que le canal hélicoïdal fonctionne de façon plus efficace par rapport celui droit.

La plus faible performance de refroidissement a été observée pour une concentration de nano fluide de 0,01.% pour le canal droit alors qu'elle est de 0,5.% pour le canal hélicoïdal. Par conséquent, à partir des résultats ci-dessus ils conclurent que les performances de refroidissement dépendent de deux facteurs : la géométrie du conduit et la concentration du nano-fluide.

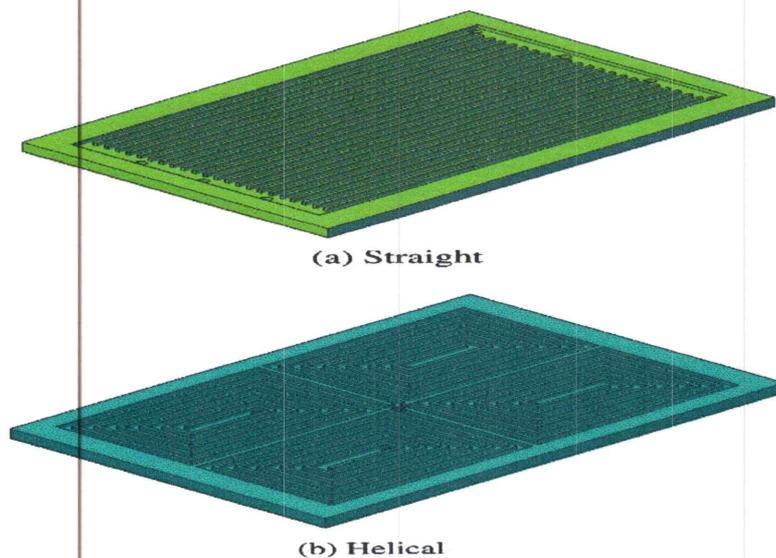


Figure I.10: Les vues schématiques des canaux.

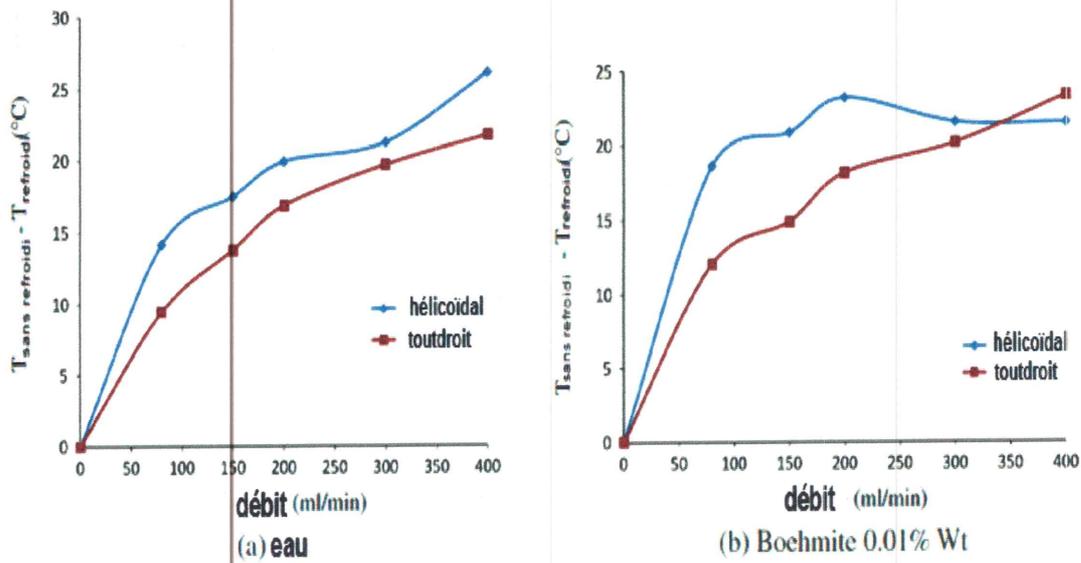


Figure I.11: Variation de la température moyenne de la cellule photovoltaïque par rapport à la température de référence à deux canaux.

M. Rosa et al en 2010 [19]: ont étudié le comportement d'un panneau photovoltaïque (PV) immergé dans l'eau à différentes profondeurs, et mesuré la température et la puissance électrique. Ils trouvent une augmentation importante de la puissance électrique pour l'eau peu profonde. Des expériences ont été réalisées pour les panneaux en silicium cristallin unique, d'autres essais avec différents types de silicium de panneaux (poly cristallin, amorphe, de panneaux de la couche mince, etc.) sont en marche.

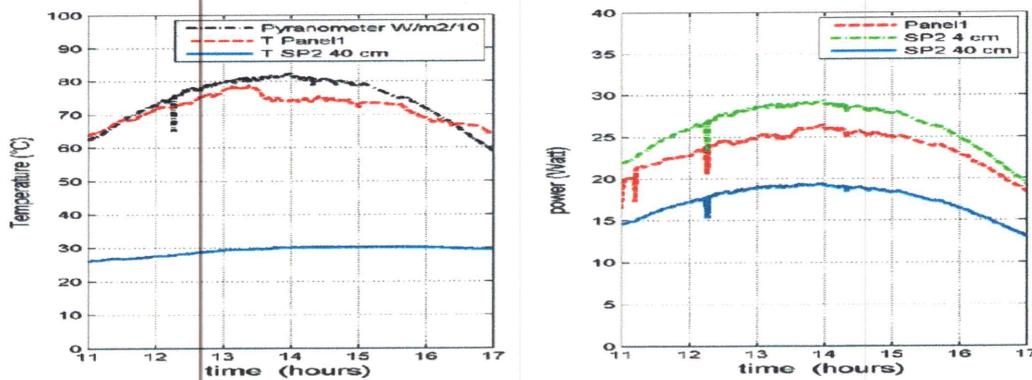


Figure I.12 : Les mesures de conversion de PV à différentes profondeurs.

Sopian et al en 1995 [20]: Ont fait une expérience pour comparer le rendement électrique des deux types de capteurs photovoltaïques thermiques à air: simple passe et double passe.

Les modèles donnent également les profils de températures du couvercle du verre et les plaques.

Les résultats montrent que les capteurs photovoltaïques thermiques à double passe sont plus performant que ceux à simple passe.

Les capteurs photovoltaïques thermiques à double passe peuvent produire plus de chaleur et en même temps avoir un effet de refroidissement productif sur les cellules photovoltaïques.

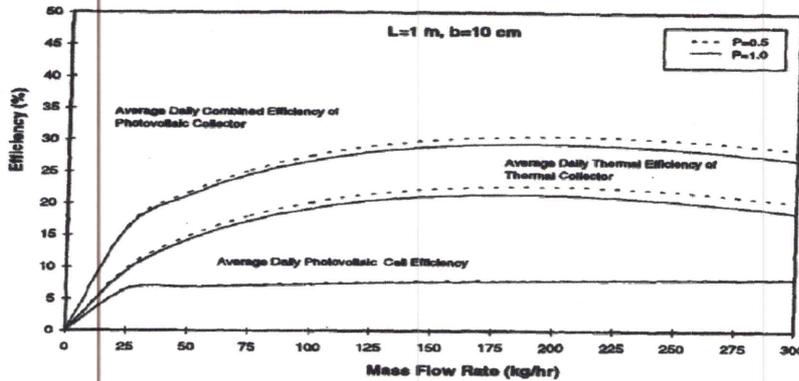


Figure I.13 : Le rendement électrique en fonction le débit d'air: simple passe.

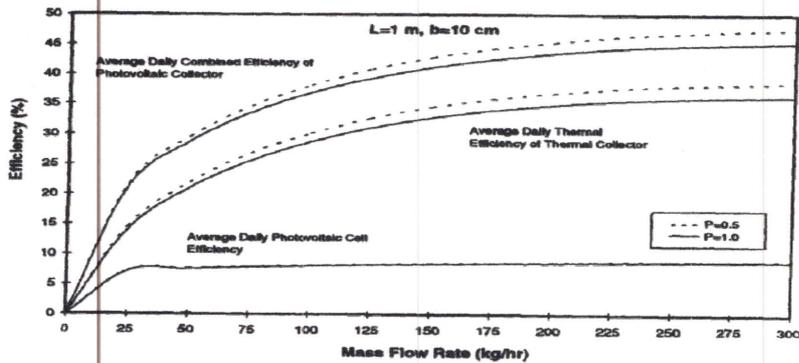


Figure I.14 : Le rendement électrique en fonction du débit d'air: double passe.

Swapnil et al 2012 [21] : Ont fait des essais entre deux différents types (PV/T) photovoltaïque-thermiques. Dans le type A, le module de PV est encapsulé avec les piles solaires monocristallines de SI et intégré avec un type collecteur thermique de tube-et-feuille,

tandis que, dans le type B, le module de PV est encapsulé avec piles solaires multi-cristallines de Si et intégré avec un type collecteur à plaques parallèles. Les expériences ont été réalisées à différents débits (0.03 kg/s et 0.06 kg/s) dans des conditions climatiques d'un jour type. La température à travers les différentes couches des modules de PVT a été mesurée pour étudier le modèle d'écoulement de la chaleur à travers les modules. Il a été trouvé que l'efficacité thermique moyenne de PV et PVT de type A sont 40.7% et 11.8%, respectivement, et pour le type B sont 39.4% et 11.5%, respectivement. Il a été découvert que le type B est adapté aux basses pressions (1-3bars), alors que le type A peut être utilisé sous haute pression jusqu'à (10bars).

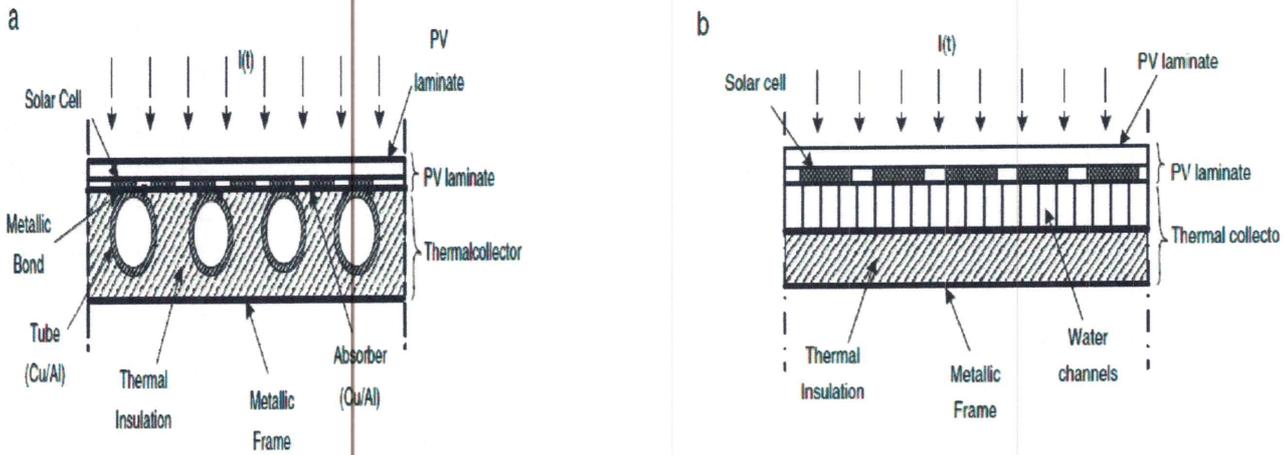


Figure I.15 : (a) Vue en coupe du module PVT de type A ,
(b) vue en coupe du module PVT de typeB.

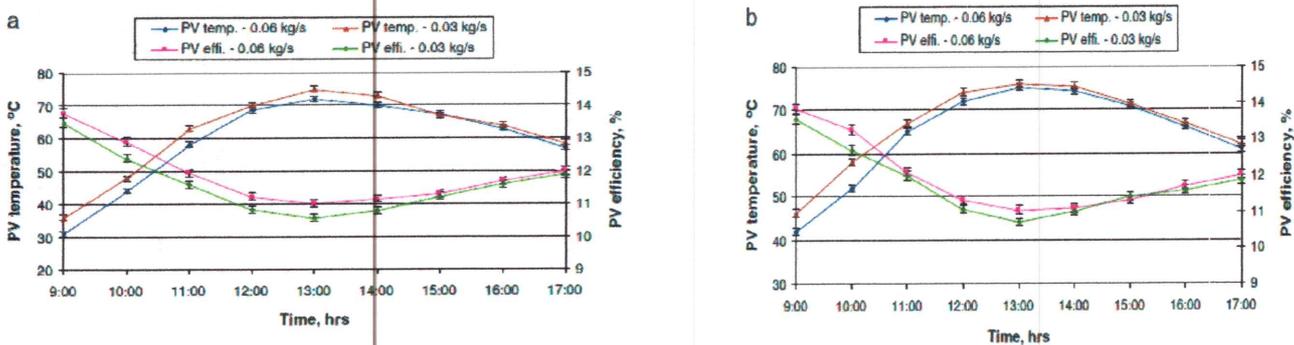


Figure I.16 : Variation horaire de la température de la cellule et l'efficacité de PV
Pour le type A et B.

Ionut, -Razvan et al 2012 [22] : ont étudié un modèle thermique concernant un module photovoltaïque a été développé et validé à l'aide des données expérimentales. Le but de cette étude était d'obtenir le champ de température d'un module BP 585 F montés à des distances différentes d'un mur de toit, ainsi que les profils de température et de vitesse de l'air à la section de sortie entre le panneau et la paroi. L'influence de la distance de montage de la température et de la vitesse d'air sont des valeurs a également étudiée. Les résultats montrent une bonne précision du module photovoltaïque.

En raison des phénomènes radiatifs et convectifs qui auront lieu dans le canal, le développement de deux couches limites se démarque : une au module photovoltaïque et une à la paroi de toit.

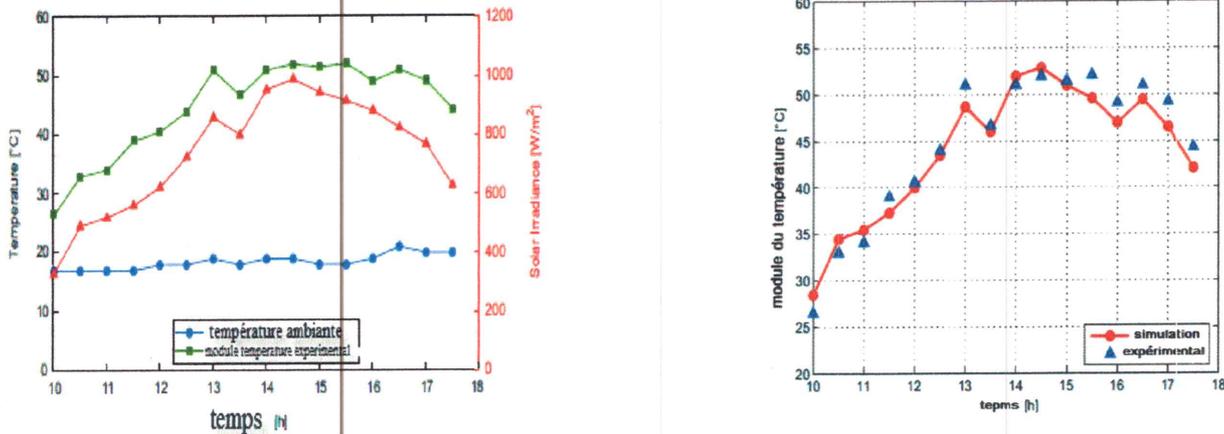


Figure I.17 : les valeurs de température expérimentales et simulé du module PV.

I.4 -Conclusion :

Nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule et une brève explication sur le phénomène photovoltaïque (l'effet photovoltaïque) suivi d'un rappel sur les systèmes PV et leurs performances.

Pour améliorer les performances des panneaux solaires, plusieurs études ont été faites dans ce sens où nous avons recensé quelques travaux. Les chercheurs ont fait des études expérimentales, théoriques et numériques pour comprendre les phénomènes de transfert de chaleur à l'intérieur de la cellule photovoltaïque pour pouvoir réduire la température des cellules ce qui entraîne la diminution de leur rendement électrique.



Chapitre II

Modélisation d'un capteur PV

II.1-Introduction:

Dans ce chapitre, on s'intéressera à l'étude théorique et numérique d'un capteur solaire photovoltaïque. En faisant un bilan énergétique sur les différentes couches du panneau, nous présenterons les différents paramètres thermiques et voir leur influence sur l'amélioration du rendement et la diminution de la température des cellules PV.

II.2-Éléments constituant un capteur PV :

Le capteur solaire PV utilisé pour la modélisation est constitué de plusieurs éléments de matériaux différents, dont les éléments essentiels du capteur sont : vitrage, module PV, EVA (éthylène -vinyle acétate), et le tedlar.

L'objectif est donc de modéliser numériquement l'ensemble PV présenté ci-dessous, en calculant les températures sur chaque paroi. Afin de calculer ces températures, il s'agit d'écrire le bilan thermique sur chaque couche en prenant en compte les pertes d'énergie par conduction, convection, et rayonnement.

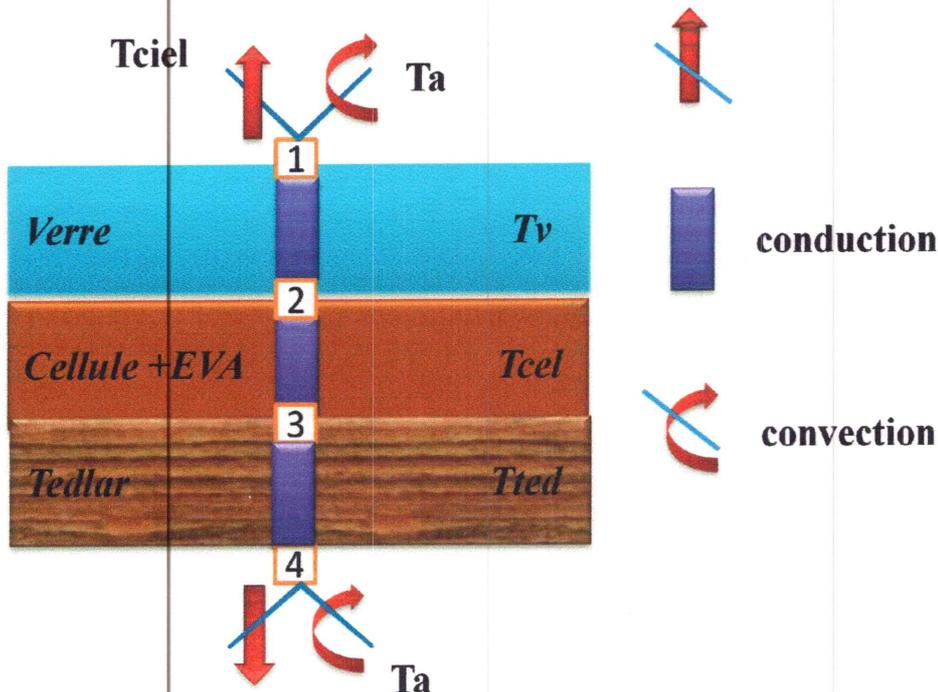


Figure II.1: Le schéma électrique équivalent à étudié.

II.3 -Rappel sur le transfert de chaleur :

II.3.1- Conduction :

Ce mode de transfert de chaleur se retrouve dans tous les composants "solides" d'une transmission, c'est le plus simple. Il correspond au transfert de chaleur dans un solide d'un point chaud vers un point froid. Le transfert de chaleur par conduction s'appuie sur la loi de Fourier:

$$\vec{\Phi} = -kA \vec{\text{grad}} T \quad (II.1)$$

$\vec{\Phi}$: Flux de chaleur en watt (W).

k : conductivité thermique du matériau (w/m k).

A : Surface perpendiculaire au flux de chaleur (m²).

$\vec{\text{grad}} T$: Le gradient local de température (K/m).



Figure II.2 : schéma de mode de transfert de chaleur par conduction.

II.3.2-Convection :

La convection est un mode de transfert de chaleur dans un milieu matériel avec mouvement de matière. Ce mode de transfert ne concerne donc que les fluides ou les échanges entre un solide et un fluide. Le transfert de chaleur par convection est complexe, car il résulte de la superposition de deux phénomènes:

- ✓ conduction entre les particules de fluides qui se rencontrent.
- ✓ mélange de ces particules par suite du mouvement d'ensemble du fluide. Si ce mouvement n'est provoqué que par les différences de températures (donc de densité), la convection est naturelle. Si ce mouvement résulte d'une action mécanique (pompe, ventilateur, mise en pression, etc...), la convection est forcée.

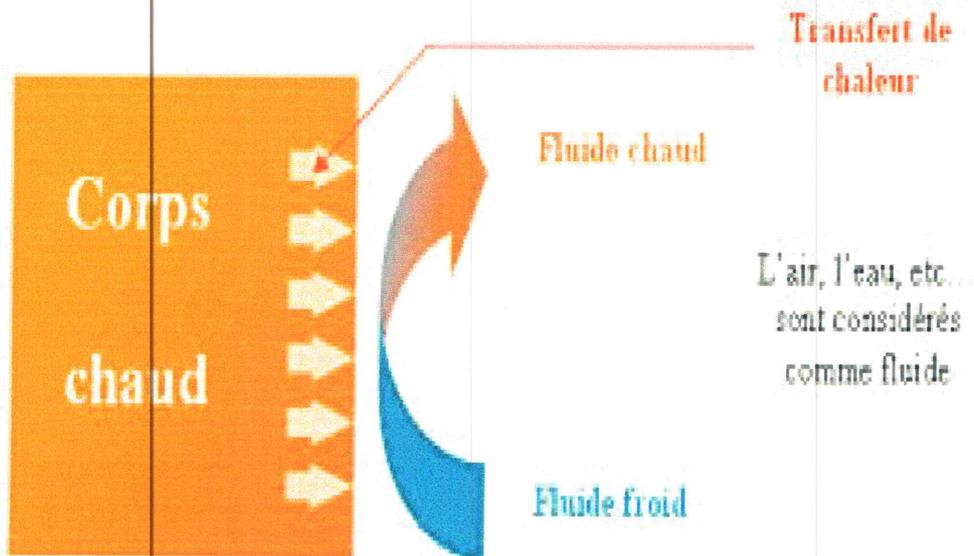


Figure II.3: schéma de mode de transfert de chaleur par convection.

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée), le flux de chaleur transmis est donnée par la relation dite loi de Newton :

$$\Phi = h S (T_p - T_f) \quad (II.2)$$

Φ : flux de chaleur (W).

h : Coefficient d'échange (W/ m²K)

$(T_p - T_f)$: Différence de température entre le corps et le fluide (k)

dS : Surface d'échange (m²)

II.3.2.1- Convection naturelle ou libre :

Se produit quand une surface est en contact avec un liquide ou un gaz qui à température différente. La différence de densité provoquée par la différence de température crée une poussée qui permet le mouvement du fluide, par exemple : calorifère utilisé pour chauffer une salle.

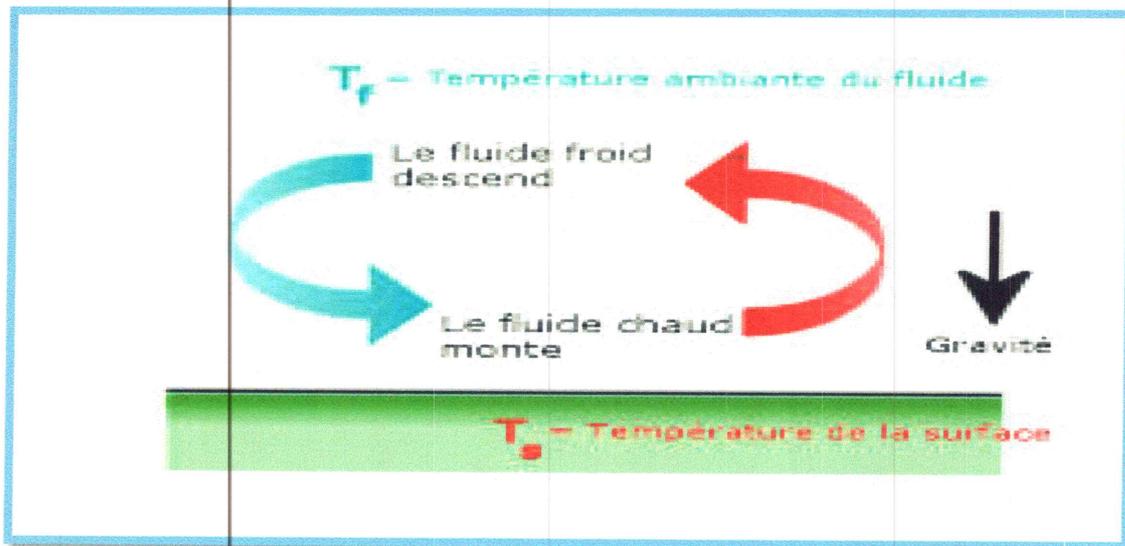


Figure II.4 : schéma de mode de transfert de chaleur par convection naturelle.

$$Nu = C (Gr Pr)^n \quad (II.3)$$

$$Gr = \frac{\beta g \Delta T \rho^2 L^3}{\mu^2} \quad (II.4)$$

Si la convection est laminaire $Gr Pr < 10^9$ et donc $n = 1/4$

Si la convection est turbulente $Gr Pr > 10^9$ et donc $n = 1/3$

II.3.2.2- Convection forcée :

En l'absence de convection naturelle, le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (ventilateur, pompe...).

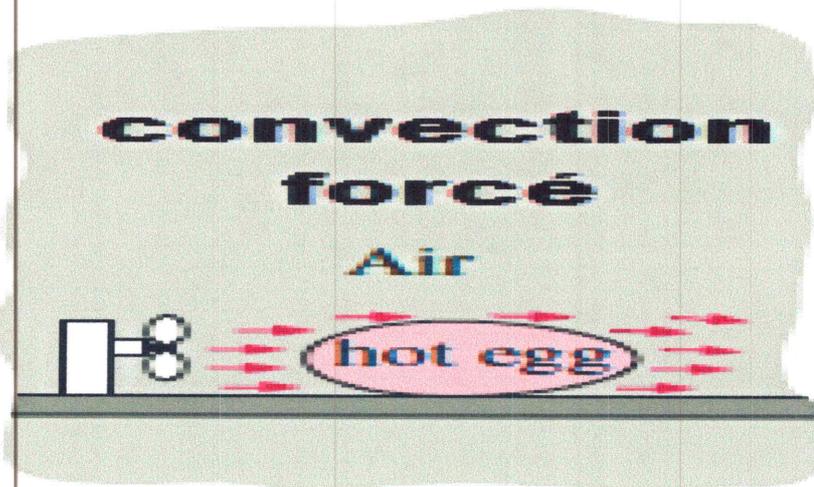


Figure II.5 : schéma de mode de transfert de chaleur par convection forcée.

Le coefficient d'échange h par convection est indépendant de la différence de température de la paroi et du fluide ($T_m - T$) mais il dépend des six grandeurs suivantes:

U_m : vitesse moyenne du fluide (m/s),

ρ : masse volumique du fluide ($Kg\ m^{-3}$),

C_p : chaleur spécifique du fluide ($J\ kg^{-1}K^{-1}$),

μ : viscosité dynamique du fluide (Pa s),

k : conductivité thermique du fluide ($W\ m^{-1}K^{-1}$),

D : dimension caractéristique (m).

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

$$\text{Nombre de Nusselt : } Nu = \frac{h D}{\lambda} \quad (II.5)$$

$$\text{Nombre de Reynolds : } Re = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (II.6)$$

$$\text{Nombre de Prandtl : } Pr = \frac{\mu C_p}{\rho} \quad (II.7)$$

II.3.3-Transfert par rayonnement :

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

Le rayonnement est un processus physique de transmission de la chaleur sans support matériel. Ainsi, entre deux corps, l'un chaud, l'autre froid, mis en vis-à-vis (même séparés par du vide), une transmission de chaleur s'effectue par rayonnement du corps chaud vers le corps froid : le corps chaud émet un flux Φ_1 et absorbe une partie du flux Φ_2 émis par le corps froid. Comme $\Phi_1 > \Phi_2$, le bilan du flux est tel que le corps chaud cède de l'énergie au corps froid. A l'inverse, le bilan du flux peut être retrouvé sur le corps froid qui émet moins d'énergie qu'il n'en absorbe.

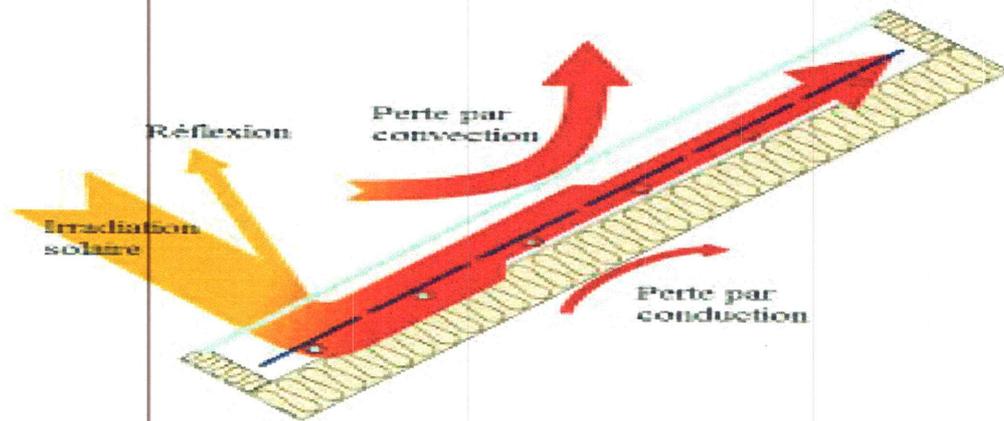


Figure II.6 : schéma de mode de transfert de chaleur par rayonnement.

On définit:

$$\text{Coefficient d'absorption : } \alpha = \frac{\text{flux absorbé}}{\text{flux incident}} \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Coefficient d'émission : } \varepsilon = \frac{\text{flux émis}}{\text{flux incident}} \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Coefficient de réflexion : } \rho = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}} \quad (\text{II.10})$$

La conservation de l'énergie implique:

$$\boxed{\alpha + \varepsilon + \rho = 1} \quad (\text{II.11})$$

II.3.3.1-Puissance échangée entre deux corps :

Entre deux corps noirs, l'un chaud (température T1), l'autre froid (température T2), en vis-à-vis total (c'est à dire que tout le flux émis par l'un des corps est reçu par l'autre), le flux net échangé s'écrit :

$$\Phi = \text{flux 'emis} - \text{flux absorbé} = S \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II. 12})$$

σ : constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W.m}^{-2}.\text{K}^{-4})$

Le flux échangé entre deux surfaces grises est donnée par la formule suivante:

$$q_{rad} = \varepsilon_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II. 13})$$

q_{rad} : Flux de chaleur en (W/m^2)

ε_{1-2} : L'émissivité entre deux surfaces.

T : température de la surface (K).

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1-2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2}} \quad (\text{II. 14})$$

Où $F_{1,2}$ est un nombre appelé facteur de forme qui fait intervenir la géométrie considérée et les émissivités des deux corps.

L'évaluation des facteurs de forme ou facteur d'angle, liés aux transferts de chaleur par rayonnement, entre deux surfaces. $F_{i,j}$ (Facteur de forme) est une quantité purement géométrique, qui ne dépend ni de la nature ni de la température des deux surfaces. On peut aussi interpréter $F_{i,j}$ comme étant la probabilité pour qu'un rayon issu de S_i soit intercepté par S_j . Pour plusieurs surfaces on définit le facteur de forme général entre deux surfaces S_i et S_j :

$$\Phi_{i,j} = S_i F_{i,j} \sigma (T_i^4 - T_j^4) = S_j F_{j,i} \sigma (T_j^4 - T_i^4) \quad (\text{II. 15})$$

$\Phi_{i,j}$: Flux de rayonnement à grande longueur d'onde entre les surfaces i et j. Si le coefficient d'émission + du corps est différent du facteur F_{ij} .

II.4-Bilan énergétique sur le système étudié :

Hypothèses simplificatrices:

- ✓ Le ciel est assimilé à un corps noir .
- ✓ La température du sol est prise égale à la température de l'ambiante.
- ✓ Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- ✓ Le rayonnement diffus atmosphérique est isotrope.
- ✓ Le coefficient de transmission d'EVA est estimé égale 100%.
- ✓ Les différents milieux solides ont une température uniforme.

II.5-Le Schéma électrique équivalent:

La Figure suivante montre le schéma électrique équivalent de différentes couches d'un système PV.

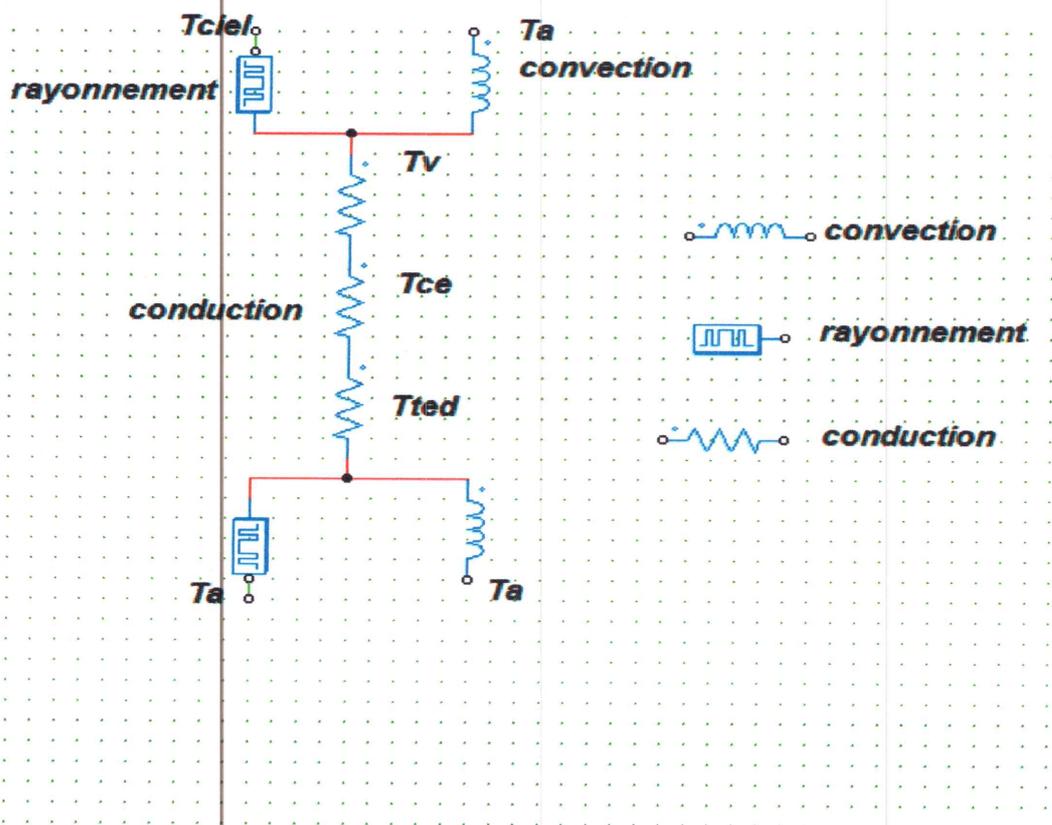


Figure II.7 : Le schéma électrique des différentes couches.

II.6-bilan thermique sur :

- le verre :

$$m_V C_{p-v} \frac{dT_V}{dt} = H_{v-v-a}(T_a - T_V) + H_{c-v}(T_{ce} - T_V) + H_{r-v-ciel}(T_{ciel} - T_V) + P_V \quad (II.16)$$

 m_V : La masse (kg). C_{p-v} : La chaleur spécifique (J/kg.K). $\frac{dT_V}{dt}$: gradient de température P_V (W/m²): La puissance absorbée par la vitre 1 est donnée par la relation suivante [23].

$$P_V = P_{dir} * \alpha_{v-dir} + P_{dif} * \alpha_{v-dif} \quad (II.17)$$

 α_{v-dir} , α_{v-dif} : Les coefficients de l'absorption par rayonnement direct et diffus de la vitre respectivement [24].

Avec :

$$\alpha_{v-dir} = 1 - \tau_{dir-v} - \rho_{dir-v} \quad (II.18)$$

$$\alpha_{v-dif} = 1 - \tau_{dif-v} - \rho_{dif-v} \quad (II.19)$$

 τ_{dir-v} : Le coefficient de transmission de la vitre [25].

$$\tau_{dir-v} = T_{a.v} \cdot T_r \quad (II.20)$$

 T_r : Le coefficient de transmission du à la réflexion de la vitre .

$$T_r = \frac{1-r}{1+r} \quad (II.21)$$

 r : Le pouvoir réflecteur du verre.

$$r = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (II.22)$$

 θ_1 : L'angle d'incidence (i) en (degré).

$$\theta_2 = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_1) \right) \quad (II.23)$$

Tel que :

θ_2 : L'angle de réfraction en (degré).

n_1, n_2 : Les indices de réfraction de l'air et du verre.

$T_{a,v}$: Le coefficient de transmission du à l'absorption de la vitre [26].

$$T_{a,v} = \exp\left(\frac{-ke_v}{\cos\theta_2}\right) \quad (II.24)$$

Tel que :

K : Le coefficient d'extinction du verre (m^{-1}).

e_v : L'épaisseur du verre(m).

ρ_{dir-v} :Le coefficient de réflexion de la vitre.

$$\rho_{dir-} = r(1 + T_{a,v} \cdot \tau_{dir-v}) \quad (II.25)$$

On calcul de la même manière les coefficients $\alpha_{v-dif}, \alpha_{v-dir}, \rho_{dir-v}, \rho_{dif-v}, \tau_{dir-v}, \tau_{dif-v}$, avec un angle incidence égale à 30° .

On utilise plusieurs corrélations pour calculé Le coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'ambiance. Qui est en fonction de la vitesse du vent.

Duffie and Beckman vous conseillons d'utiliser l'expression donnée par McAdams pour les plaques planes exposées à l'extérieur vents:

- $H_{v,v-a}(W/m^2K)$: Le coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'ambiante [27]. Qui est en fonction de la vitesse du vent, il est donné par les expressions suivantes :

Pour La convection forcée :

$$H_{v,v-a} = 5.7 + 3.8 \cdot Vv \quad (II.26)$$

Pour La convection naturelle :

$$H_{v,v-a} = 1.31(T_v - T_a)^{1/3} \quad (II.27)$$

Vv : vitesse de vent (m/s).

- $H_{c-v}(W/mK)$: Le coefficient de transfert thermique par conduction dans le verre.

$$H_{c-v} = \frac{k_v}{e_v} \quad (II.28)$$

- Tel que :

K_v : La conductivité thermique de verre (W/m.K).

e_v : L'épaisseur de verre (m).

- $H_{rv-ciel}$ (W/m²K) : Le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel [28].

$$H_{rv-ciel} = \sigma \epsilon_v (T_{ciel} + T_v) (T_{ciel}^2 + T_v^2) \quad (II.29)$$

- Tel que :

σ : La constante de **Stéphane Boltzmann** : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴)

ϵ_v : L'émissivité de la vitre.

T_v : La température de la vitre (K).

T_{ciel} : La température du ciel (K)[29].

$$T_{ciel} = T_a - 6 \quad (II.30)$$

- la cellule Photovoltaïque :

$$m_{ce} C_{ce} \frac{dT_{ce}}{dt} = H_{c-ce} (T_v - T_{ce}) + H_{c-ce} (T_{ted} - T_{ce}) + Q_{ele} \quad (II.31)$$

- Q_{ele} (W) : La puissance électrique générée par la cellule solaire, elle se calcule par la formule suivante [30].

$$Q_{ele} (W) = \eta_{el} * P_g * S \quad (II.32)$$

η_{el} : Rendement électrique(%) .

P_g : Rayonnement global (W/m²).

S : la surface du module (m²).

- H_{c-ce} (W/m²K) : Le coefficient de transfert thermique par conduction dans la cellule.

$$H_{c-ce} = \frac{k_{ce}}{e_{ce}} \quad (II.33)$$

- Tel que :

k_{ce} : La conductivité thermique de la cellule (W/m.K).

e_{ce} : L'épaisseur de la cellule (m).

- le Tedlar :

$$m_{ted} C_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = H_{c_{ted-ce}}(T_{ce} - T_{ted}) + H_{r_{ted-s}}(T_s - T_{ted}) + H_{v_{ted-a}}(T_a - T_{ted}) \quad (II.34)$$

- H_{c-ted} (W/m²K) : Le coefficient de transfert thermique par conduction dans le tedlar

$$H_{c-ted} = \frac{k_{ted}}{e_{ted}} \quad (II.35)$$

- Tel que :

k_{ted} : La conductivité thermique de tedlar (W/m.K).

e_{ted} : L'épaisseur de tedlar (m).

- $H_{r_{ted-s}}$ (W/m²K) : Le coefficient d'échange par rayonnement entre la face externe de tedlar et le sol.

$$H_{r_{ted-s}} = \sigma \epsilon_t (T_s + T_{ted})(T_s^2 + T_{ted}^2) \quad (II.36)$$

σ : La constante de **Stéphane Boltzmann** : $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴)

ϵ_{ted} : L'émissivité de le tedlar.

T_{ted} : La température de tedlar (K).

T_s : La température du sol (K).

- $H_{v_{ted-a}}$ (W/m²K) : Le coefficient d'échange par convection entre la face externe de tedlar et l'ambiance, pris égal à $H_{v_{v-a}}$

- Q (W) : énergie dissipée sous forme de chaleur .

$$Q = (\alpha_{ce} * \tau_{dir-v} * P_g) * S - Q_{ele} \quad (II.37)$$

α_{ce} : Le coefficient d'absorption de la cellule.

P_g : Rayonnement global (W/m^2).

τ_{dir-v} : Le coefficient de transmission de la vitre.

α_{ce} : Le coefficient d'absorption de la cellule.

II.7-Le rendement électrique du capteur PV :

Le rendement électrique d'un capteur PV est donné par la relation suivante [31].

$$\eta_{el} = \eta_{ref} [1 - B_{ref}(T_{ce} - T_{ref})] \quad (\%) \quad (II.38)$$

▪ Tel que :

T_{ref} : La température de référence (K).

η_{ref} : Le rendement de référence.

Tableau 1 : Paramètre de référence pour le rendement électrique

	$T_{ref}(^{\circ}C)$	η_{ref}	$B_{ref}(^{\circ}C^{-1})$	références
Mono-Si	25	0.15	0.0041	[32]
	28	0.11	0.003	[33]
	25	0.12	0.0045	[34]

Tableau 2 : Formules de corrélation pour le rendement électrique

Corrélations	références
$\eta_{el} = \eta_{ref} [1 - B_{ref} (T_{ce} - T_{ref})]$	[35]
$\eta_{el} = \eta_{ref} [1 - B_{ref} (T_{ce} - T_{ref}) + y \log_{10} P_g]$	[36]
$\eta_{el} = a + b(T_{in} - T_a) / P_g$	[37]

II.8-Résolution du système d'équations :

Les systèmes d'équations différentielles (II.16) (II.31) (II.34) sont résolus en utilisant la méthode de Runge Kutta :

Cette méthode repose sur le principe de l'itération, c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, plus précise, et ainsi de suite.

$$K_1 = f(t_i, T_i) \quad (II.39)$$

$$K_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}, T_i + \frac{1}{2} K_1\right) \quad (II.40)$$

$$K_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2} \Delta T, T_i + \frac{1}{2} K_2\right) \quad (II.41)$$

$$K_4 = f(t_i + \Delta T, T_i + K_3) \quad (II.42)$$

-La condition de convergence :

Les critères de convergence sont donnés par :

$$|T_V^{k+1} - T_V^k|, |T_{ce}^{k+1} - T_{ce}^k|, |T_{ted}^{k+1} - T_{ted}^k| < \varepsilon$$

Le choix de la valeur ε est important pour s'assurer que la convergence est atteinte. On choisit les valeurs de ε est de 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} .

II.9-Modèle électrique d'un panneau PV : [38]

La Figure (II.8) représente le modèle électrique équivalent d'une cellule solaire qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une diode en parallèle et une résistance série R_s , et parallèle R_{sh} .

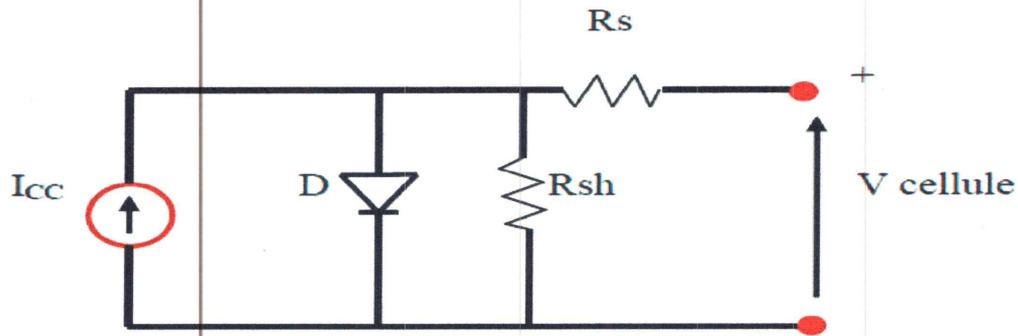


Figure II.8: Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

- Avec :

R_{sh} : la résistance parallèle (shunt) représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances de contacte et la résistance du semi-conducteur.

En pratique, la résistance parallèle R_p est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série R_s est très faible (de l'ordre de quelques milli-Ohms). Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \quad (II.43)$$

$$V_D = V + R_s \cdot I \quad (II.44)$$

$$I = I_{ph} - I_0 (\exp C_1 (V + R_s \cdot I) - 1) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (II.45)$$

- avec :

$$C_1 = \frac{q}{A \cdot K \cdot T_j} \quad (II.46)$$

A : Le facteur d'idéalité de la jonction ($1 < A < 3$).

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_0 : Courant de diode, représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction p - n de la cellule.

q: La charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

K : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

T_j : La température de jonction (K).

✚ Pour Calculer l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes d'un module PV

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{q}{NAKT_j} (V_{pv} + R_{se}I) - 1\right) \right) - \frac{V + R_{se} \cdot I}{R_{pe}} \quad (II.47)$$

$$\text{Avec : } R_{se} = N \cdot R_s \text{ et } R_{pe} = N \cdot R_p \quad (II.48)$$

II.9.1-Courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ($V=0$), l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left[\frac{R_p + R_s}{R_p} \right]} \quad (II.49)$$

II.9.2-Tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est déterminée pour un courant de sortie nul ($I=0$) on peut déduire:

$$V_{CO} = \frac{I}{M \cdot C_2} \cdot \text{Log} \left[\frac{I_{ph} + I_0}{I_0} \right] \quad (II.50)$$

II.9.3- Point de fonctionnement optimal :

Un générateur délivre une puissance qui varie avec la charge alimenté par le système.

$$P = V * I \quad (II.51)$$

II.9.4- Rendement énergétique maximum :

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{S \cdot P_g} \quad (II.52)$$

- Avec :

P_{MAX} : puissance maximale [W]

P_g : rayonnement global [W/m^2].

S : la surface du module [m^2].

II.9.5-Température de la cellule :

La température de la cellule T_{ce} de la cellule est donnée par la relation suivant :

$$T_{ce} = T_a + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) \times P_g \quad (II.53)$$

La température de la cellule NOCT est dans un module lorsque la température ambiante est de 20 °C, rayonnement solaire égal à 800 W/m^2 , et vitesse du vent à 1 m/s.

- Avec

T_{ce} : Température de la cellule.

T_a : Température ambiante.

P_g : Rayonnement global (W/m^2).

NOCT : la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature).



Chapitre III

Résultats et Discussions

Dans ce chapitre, on va exposer les résultats issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation de température dans les différentes couches du capteur ainsi que le rendement électrique.

Pour simuler les transferts thermiques à travers les différentes parties du panneau photovoltaïque, un programme **Fortran** a été développé, ensuite pour tracer les courbes des résultats trouvés on a utilisé le logiciel **Originpro 8**, en tenant compte des considérations suivantes :

- ✚ Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial « t^0 » pour chaque composant du capteur PV à une température initiale et avec un pas de temps égal à une demi-heure.
- ✚ Les données météorologiques de la région de Jijel sont :
 - ✓ Latitude = $36^{\circ}48N$.
 - ✓ Longitude = $5^{\circ}53E$.
 - ✓ Albédo du sol = 0.2
 - ✓ On choisit le 06 juin comme jour de calcul.

Pour faire suite à notre travail, nous avons fait une étude d'un panneau photovoltaïque formé de cellules en silicium monocristallin dont les caractéristiques sont données dans l'annexe B et la surface totale du panneau est égale $0.5m^2$.

III.1-Les résultats de la simulation numérique :

Dans la première partie de cette simulation en gardant les caractéristiques physiques et géométriques constantes, on trace l'évolution temporelle du rayonnement solaire, des températures de différentes couches ainsi que du rendement électrique, puis dans la deuxième partie on étudiera l'influence des variations de paramètre géométriques et thermiques sur ces mêmes fonctions.

III.1.1-La variation temporelle du rayonnement global :

La Figure III.1 Représente l'évolution de l'éclairement solaire incident sur un plan incliné. L'allure du rayonnement solaire globale a la forme d'une cloche. Il est faible au lever du jour puis il commence à croître avec le temps, il est maximum aux environs de 12.30h, après il commence à décroître jusqu'à 18h.

III.1.2- La variation des températures des différents éléments du capteur PV :

D'après la Figure III.2 on remarque que les différentes températures des composantes du capteur solaire atteignent leurs valeurs maximales entre 12h et 14h. On remarque également que la température du tedlar est la plus faible, et est même proche de la température ambiante. La température du verre est inférieure que la cellule car le verre est transparent ne possède pas un grand coefficient d'absorption comme il transmet une bonne partie de l'énergie solaire à la cellule.

III.1.3- La variation temporelle de la température de la cellule et le rendement électrique :

La Figure III.3 représente la variation temporelle de la température de la cellule et du rendement électrique. On remarque que la température de la cellule varie inversement avec le rendement électrique, lorsque la température de la cellule atteint une valeur maximale, le rendement électrique est minimum. Ce phénomène est dû à la quantité de chaleur accumulée sur la surface de la cellule qui permet d'augmenter la température de cette dernière, ce qui provoque une diminution du rendement électrique.



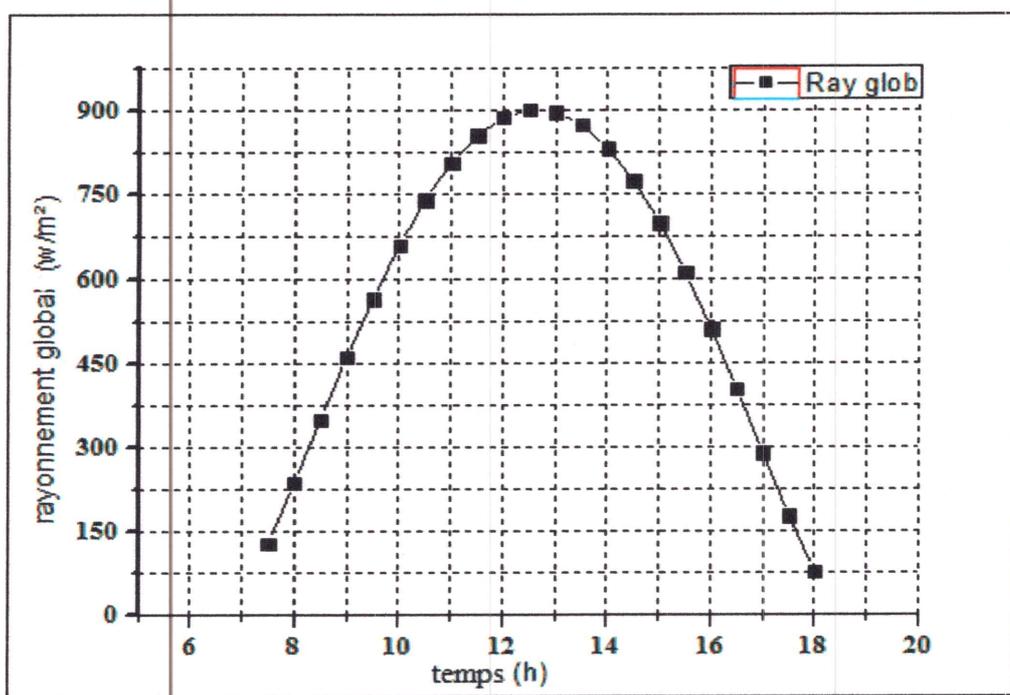


Figure III.1 : La variation temporelle de rayonnement solaire global.

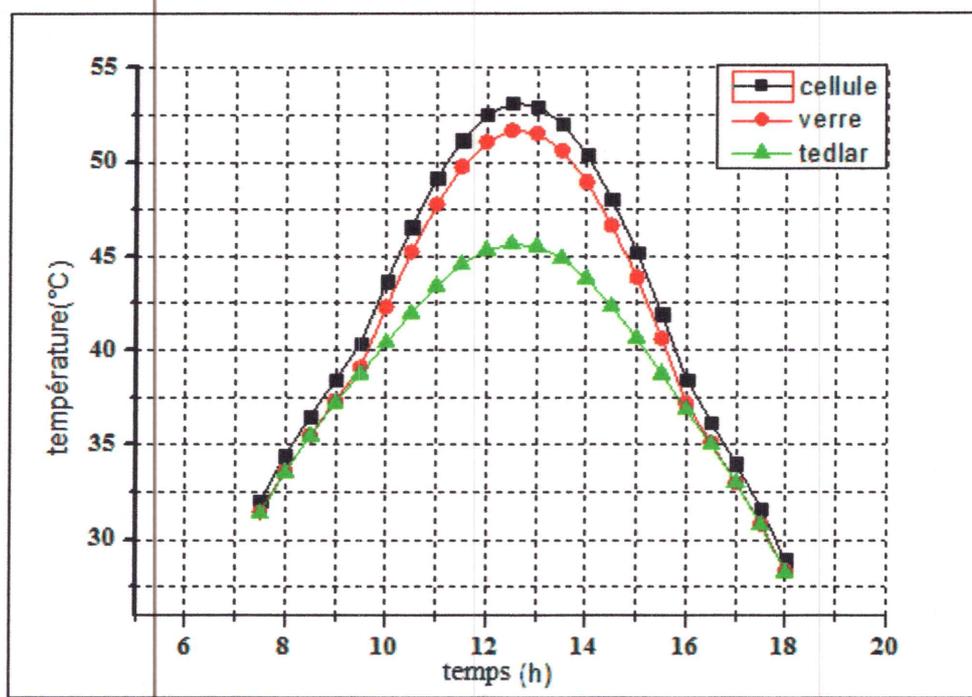


Figure III.2 : Variation temporelle des températures de chaque composant du capteur.

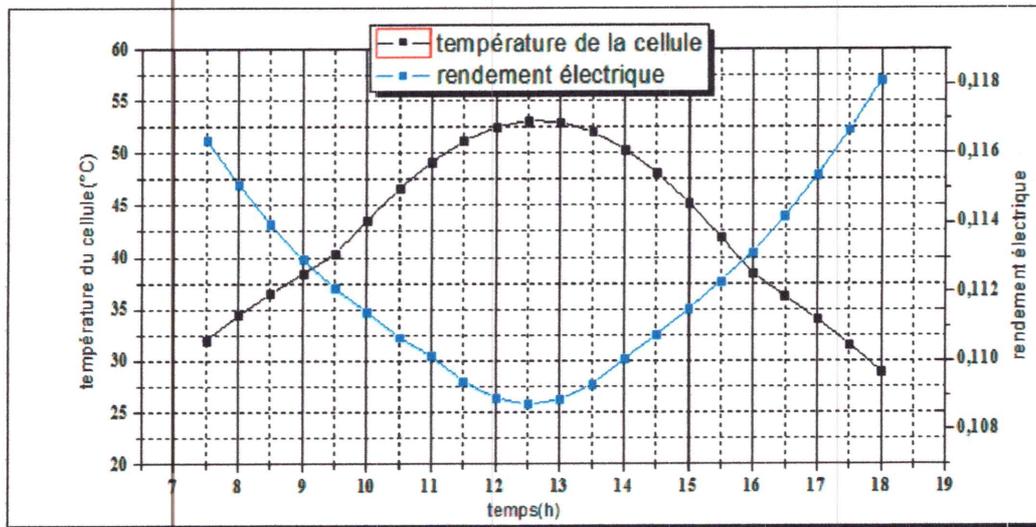


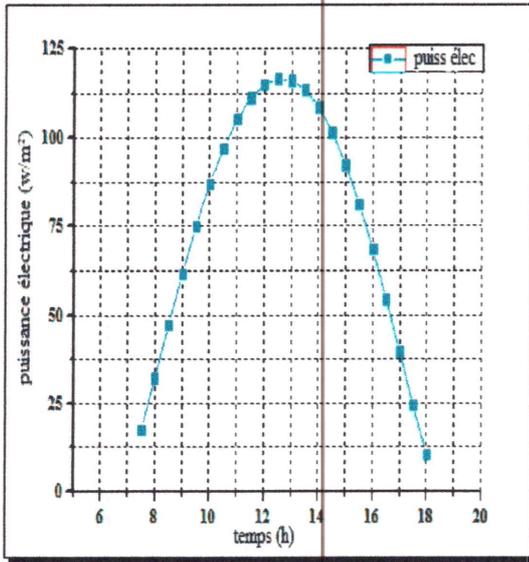
Figure III.3 : Variation temporelle de la température de cellule et le rendement électrique.

III.1.4-La variation temporelle de la puissance électrique :

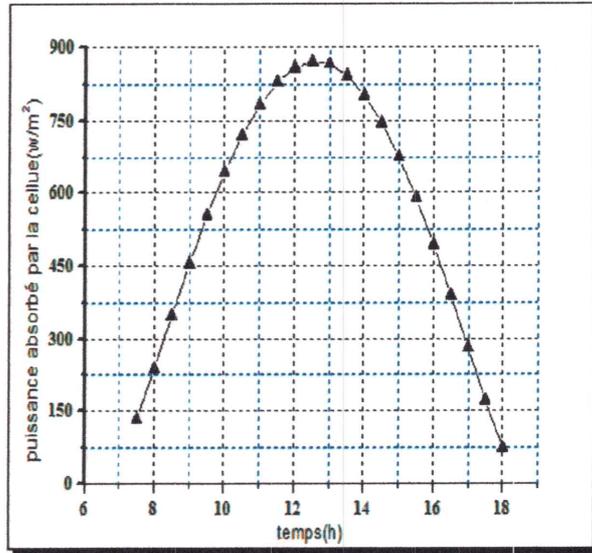
La Figure III.4 représente l'évolution temporelle des différentes puissances dans la cellule en fonction du temps.

D'après cette figure (III.4.a), la puissance électrique produite par les cellules atteint son maximum entre 12h et 13h là où le rayonnement est meilleur possible, donc on peut conclure que la variation de la puissance électrique est proportionnelle au rayonnement global. La même remarque est faite pour la puissance absorbée par les cellules PV (figure III.4.b)

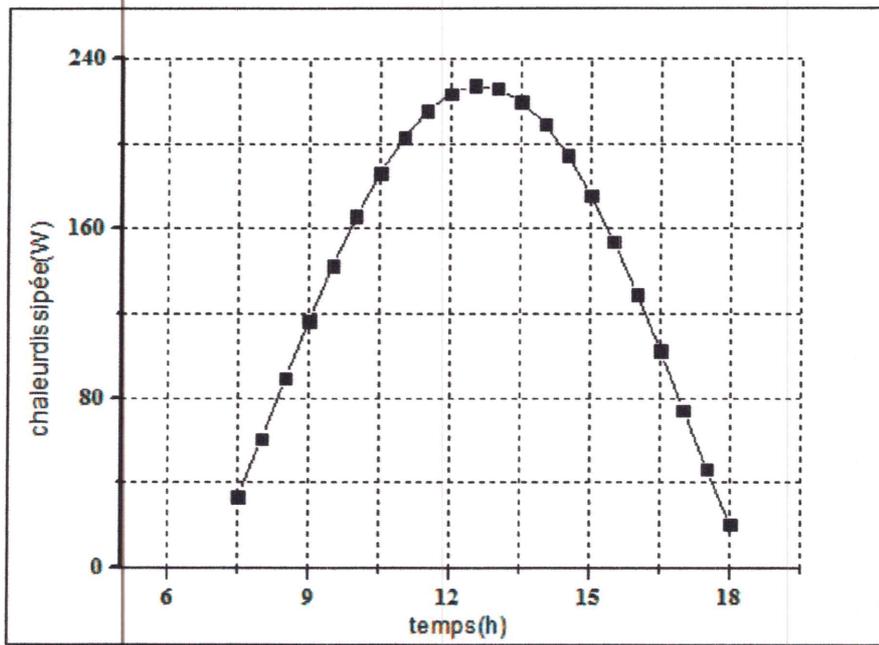
La Figure III.4.c montre l'évolution temporelle de la chaleur dissipée par la cellule en fonction du temps. On remarque que de la chaleur dissipée atteint aussi son maximum entre 12h et 13h. On voit aussi que cette chaleur dissipée reste toujours inférieure à celle du rayonnement global ceci est due aux caractéristiques géométriques (épaisseur) et optiques (coefficient d'absorption et de transmission), de plus l'espacement entre les cellules.



(a)



(b)



(c)

La Figure III.4 : La variation temporelle de la puissance : (a) électrique. (b) absorbé par la cellule ; (c) dissipée par la cellule.

III.1.5- Influence de la variation de la vitesse du vent :

Les Figures III.5 montrent l'influence de la vitesse du vent sur la température de la cellule au cours de la journée. On observe que quand la vitesse du vent augmente la température de la cellule et diminue. En effet, l'augmentation de la vitesse du vent conduit à augmenter le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'ambiance, ce qui favorise les pertes thermique vers l'avant, et par conséquent une baisse de la température au niveau des différents composants du capteur.

D'une autre part, on remarque que le rendement électrique du capteur est amélioré avec l'augmentation de la vitesse du vent (Figure III.6), ce qui provoque l'augmentation du transfert thermique convectif, avec une faible augmentation du flux de la chaleur dissipé (Figure III.7) et ceci peut être expliqué par la diminution de la température de la cellule.

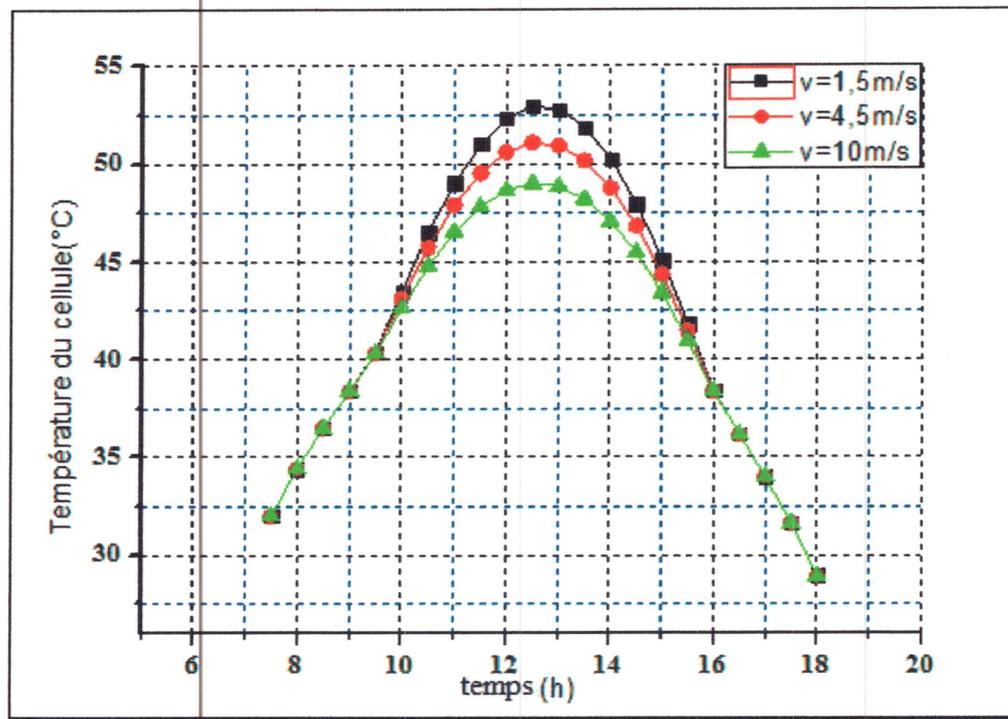


Figure III.5 : L'influence de la vitesse du vent sur la température de la cellule.

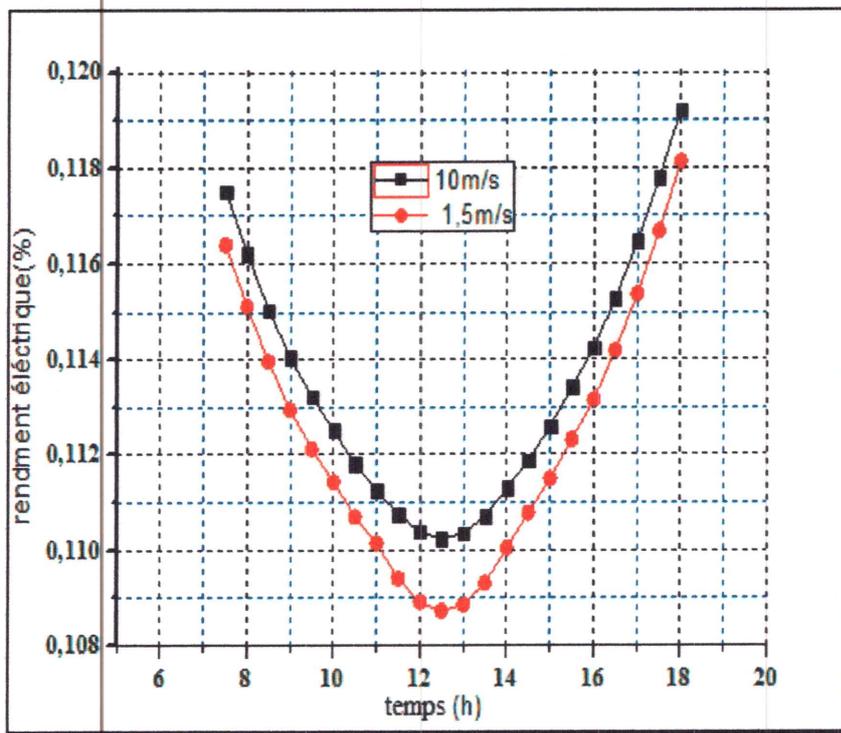


Figure III.6 : L'influence de la vitesse du vent sur le rendement électrique.

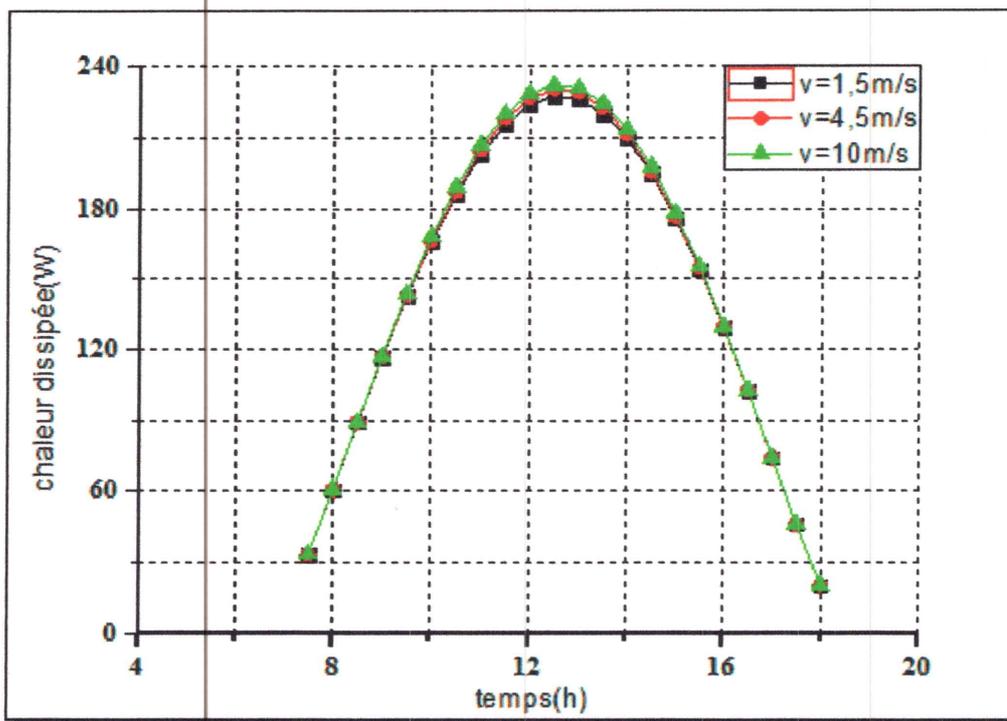


Figure III.7 : L'influence de la vitesse du vent sur la chaleur dissipée.

III.1.6-L'effet de l'épaisseur du verre et du tedlar :

Les Figures III.8 et III.9 montrent la variation temporelle de la température de la cellule en fonction de l'épaisseur du verre et du tedlar du capteur photovoltaïque,

On remarque lorsqu'on réduit l'épaisseur du verre et tedlar, la température de la cellule augmente. Ceci s'explique par le fait que plus l'épaisseur du verre et tedlar augmente, plus le transfert thermique par conduction est lent. c'est pour cette raison que la température de la cellule diminue avec l'augmentation d'épaisseur de chaque couche.

et les figures III.10 et III.11 montre la variation temporelle du rendement électrique en fonction de l'épaisseur du verre et du tedlar .

le rendement électrique du capteur est amélioré avec l'augmentation de l'épaisseur du verre et tedlar, ceci peut être expliqué par la diminution de la température de la cellule. Le rendement il est meilleur pour $e_v=0.006m$.

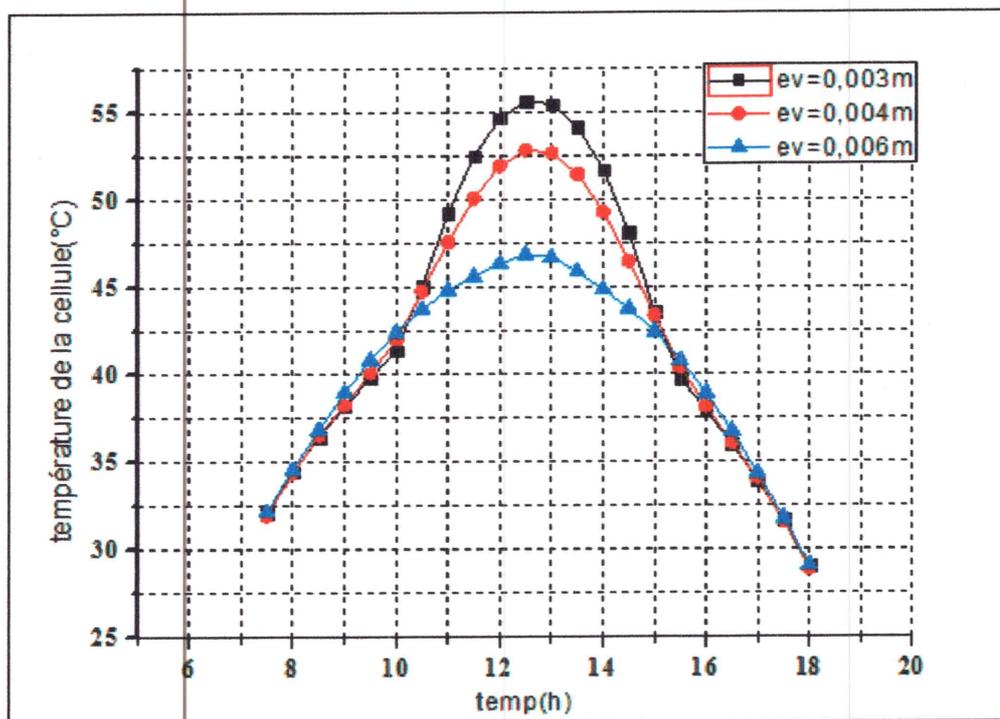


Figure III.8 : variation temporelle de la température de la cellule en fonction de l'épaisseur du verre.

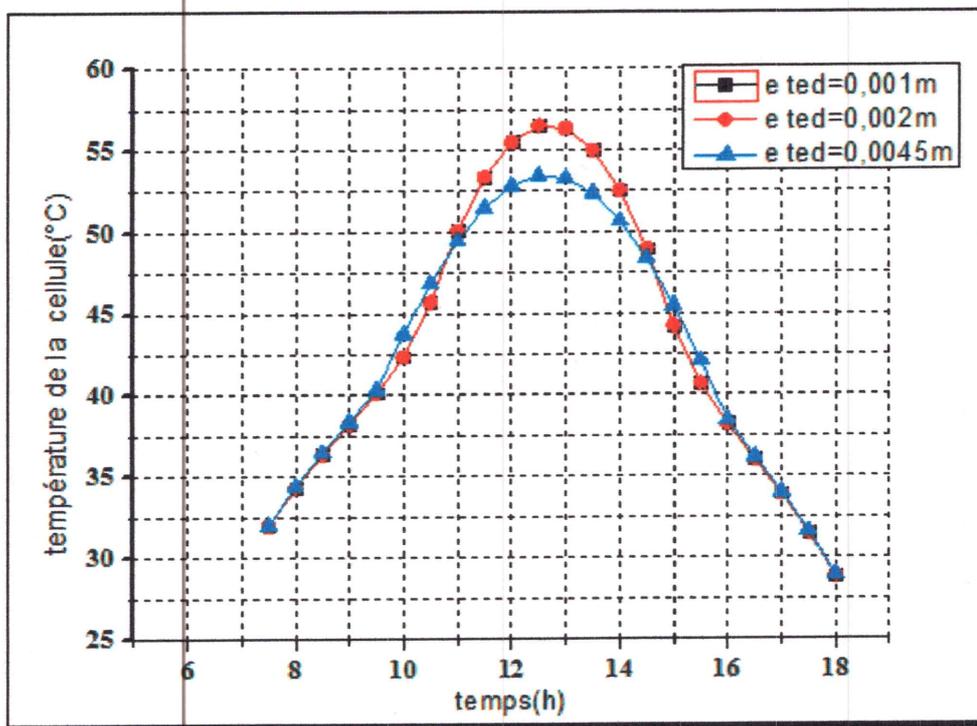


Figure III.9 : variation temporelle de la température de la cellule en fonction de l'épaisseur du tedlar.

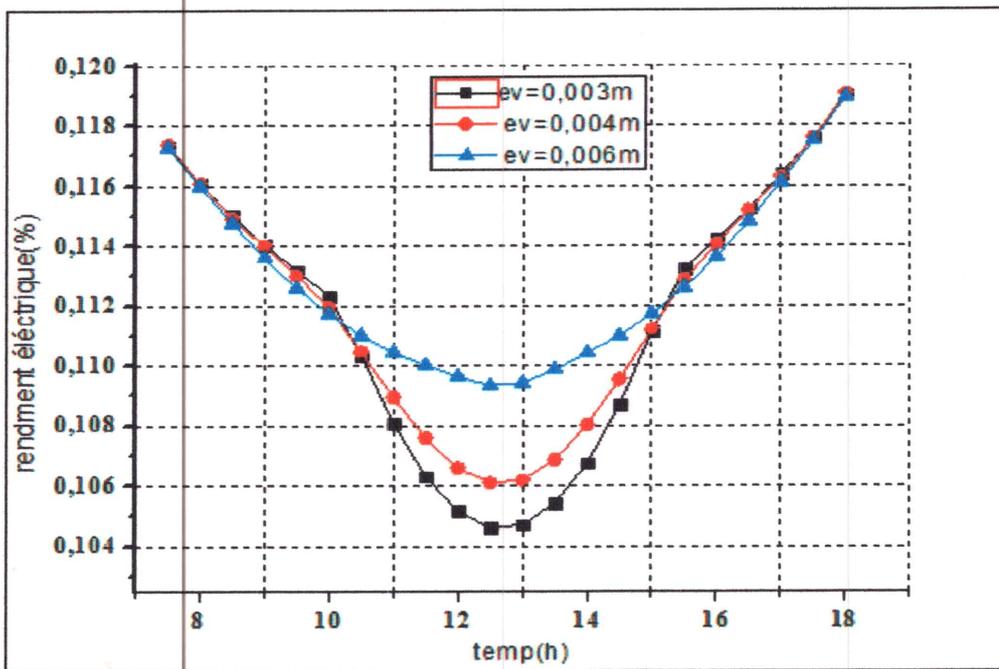


Figure III.10 : variation temporelle de rendement électrique en fonction de l'épaisseur du verre.

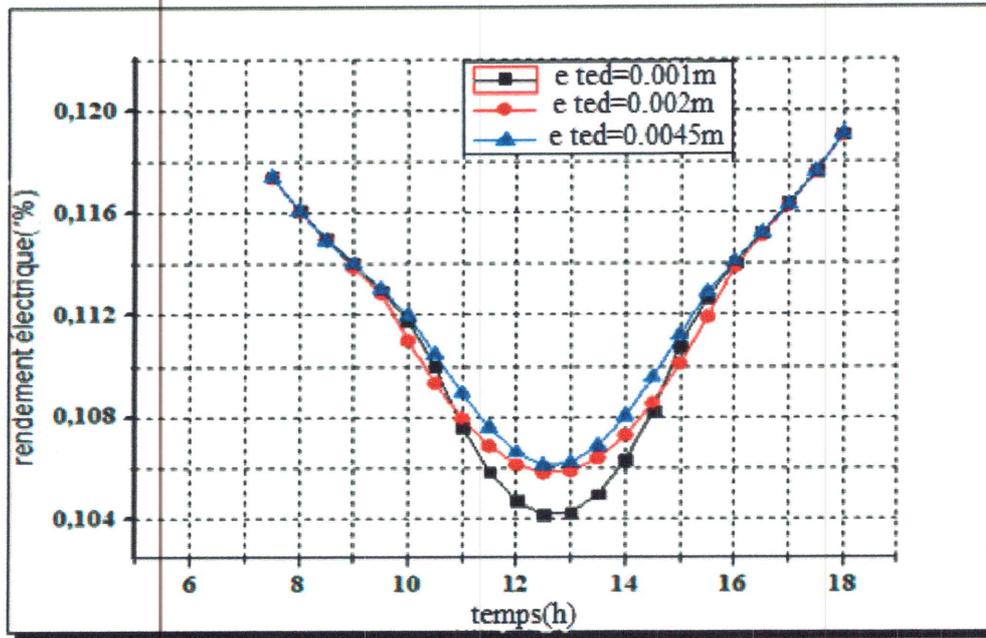


Figure III.11 : variation temporelle du rendement électrique en fonction de l'épaisseur du tedlar.

Les Figures III.12 montrent la variation temporelle de la puissance dissipée en fonction de l'épaisseur du verre. On remarque qu'en changeant l'épaisseur du couvert(verre) n'a pas une grande influence sur la chaleur dissipée par les cellules photovoltaïques.

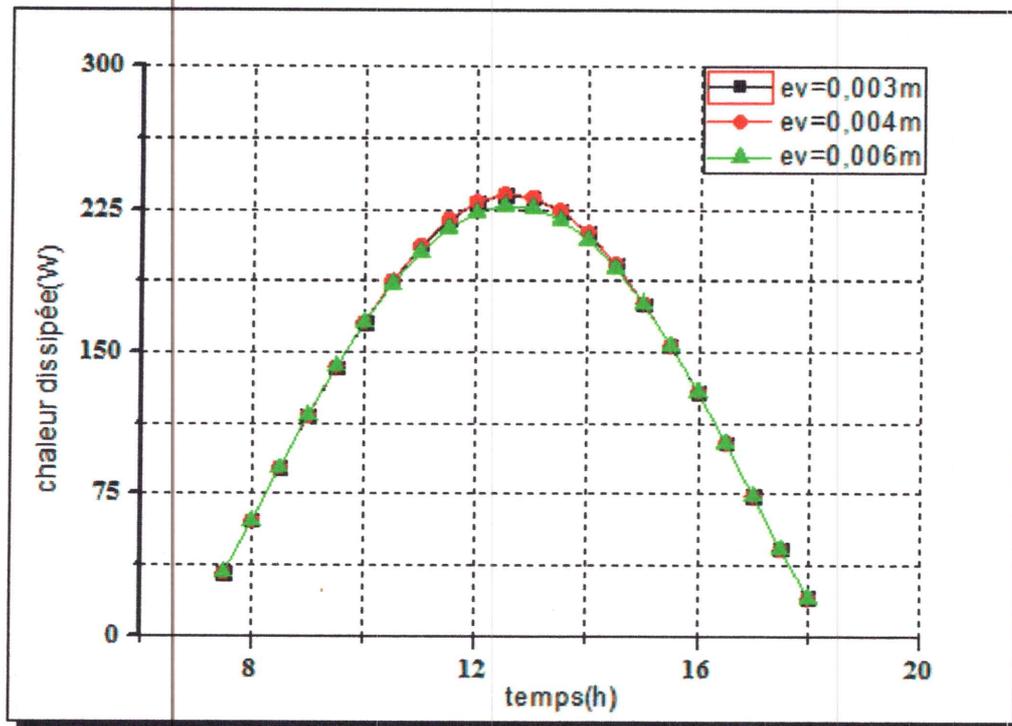


Figure III.12: variation temporelle de la chaleur dissipé en fonction de l'épaisseur du verre.

III.1.7-L'effet de coefficient d'échange par convection sur le rendement électrique :

La Figure III.13 montre l'influence du coefficient d'échange par convection sur le rendement électrique. on remarque que le rendement électrique n'est pas très affecté par la variation du coefficient de convection , il est meilleur en convection forcée..

III.1.8- La variation temporelle du rendement électrique :

La Figure III.14 l'effet de des valeur η_{ref} , T_{ref} B_{ref} sur le rendement électrique. On observe que la référence 32 on donne une augmentation plus grande du rendement électrique ,par contre 34 ,33 il ya une augmentation du rendement électrique plus proche et faible par rapport a la référence 32.

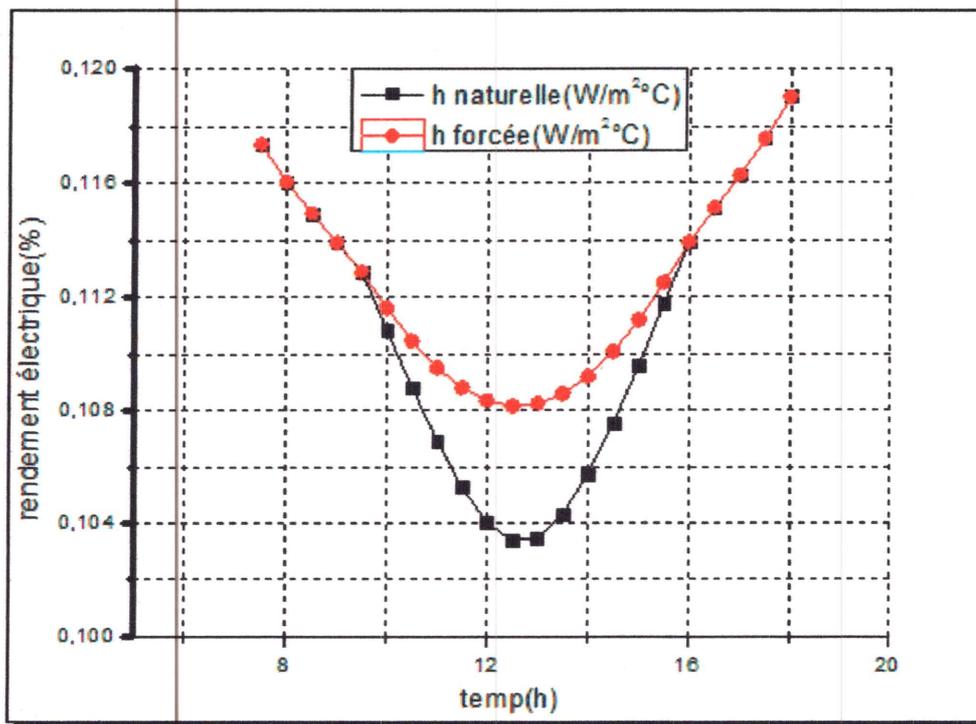


Figure III.13 :L'influence du coefficient d'échange par convection sur le rendement électrique.

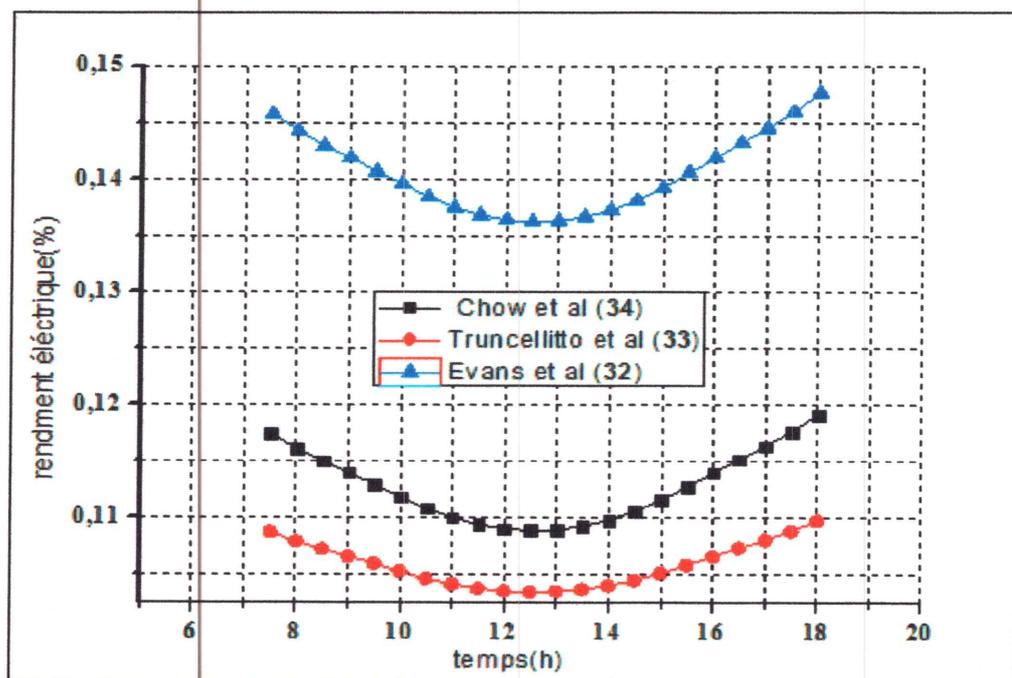


Figure III.14 : La variation temporelle du rendement électrique.

III.2-Les caractéristiques d'un panneau PV :

III.2.1-L'influence de l'irradiation sur les caractéristiques d'un panneau PV :

La Figure III.15 et la Figure III.16, montrent l'influence de l'éclairement solaire sur les caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$, respectivement.

Les deux figures sont tracées pour différents ensoleillements à température maintenue constante 25°C , on constate bien que les caractéristiques du panneau solaire dépendent fortement de l'ensoleillement.

D'après la figure III.15 on peut voir que le courant de court-circuit I_{cc} est très influencé par le changement de l'ensoleillement alors que la tension V_{oc} reste sensiblement constante.

D'autres parts, sur la figure III.16 on remarque que pour un fort éclairement on peut avoir une puissance élevée. En raison de l'augmentation du courant I_{cc} avec l'éclairement solaire.

III.2.2-L'influence de la température sur les caractéristiques d'un panneau PV :

Le deuxième paramètre qui a une influence directe sur la caractéristique $I(V)$ du générateur PV est la température. Les résultats sont présentés sur la Figure III.17 montrent que cette caractéristique est influencée par la température ; l'augmentation de cette dernière fait augmenter le courant et diminuer la tension.

On peut noter que le courant de court-circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée.

La température a donc une influence non négligeable sur la puissance du générateur PV. Une diminution de la puissance peut être remarquée quand la température augmente.

la figure III.18 montre la caractéristique puissance – tension $P(V)$ pour différentes températures.

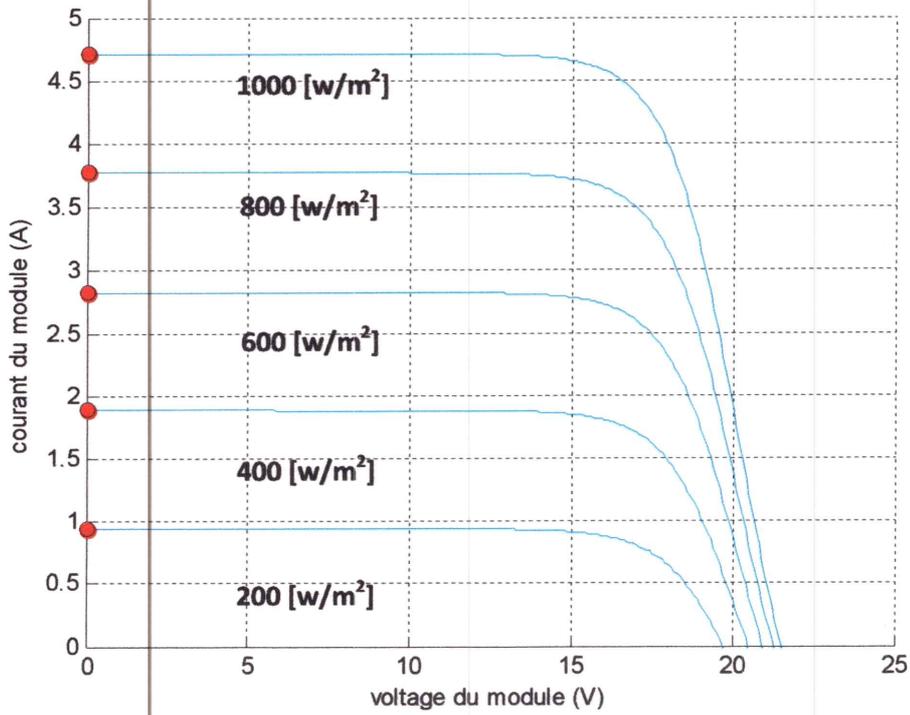


Figure III.15 : Caractéristiques $I=f(V)$ d'un panneau solaire pour différents ensoleillements à une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$.

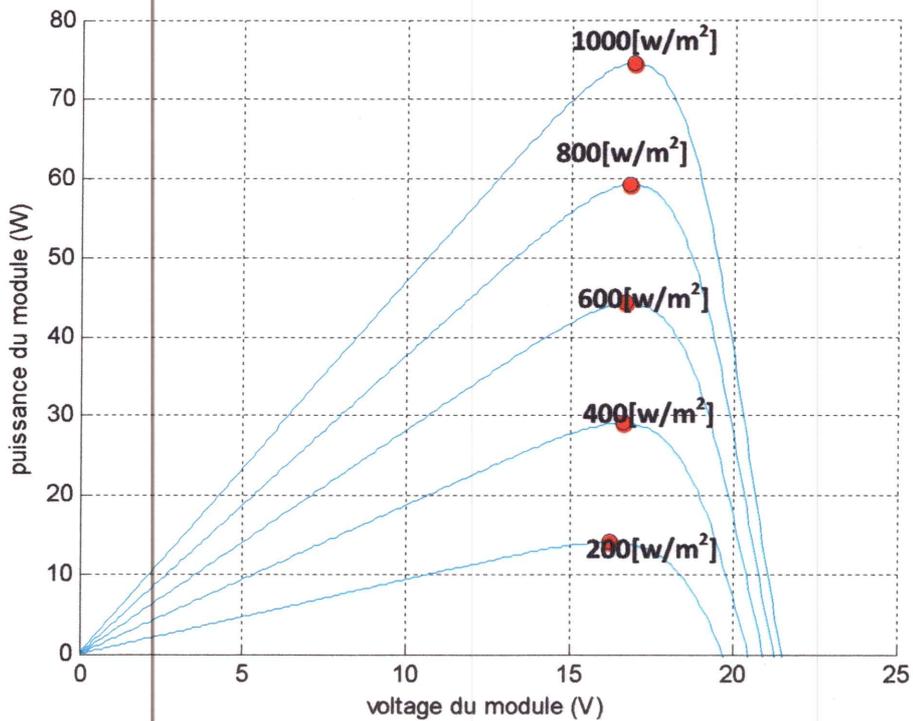


Figure III.16: Caractéristiques $P=f(V)$ d'un panneau solaire pour différent ensoleillements à une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$.

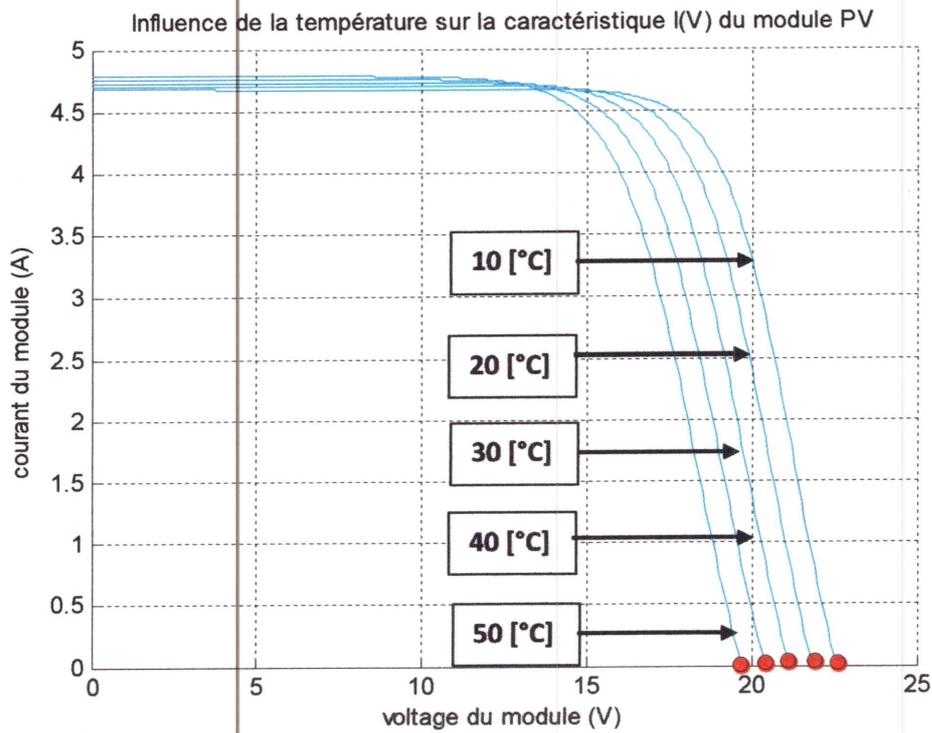


Figure III.17: Caractéristique $I = f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures T à ensoleillement constant $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

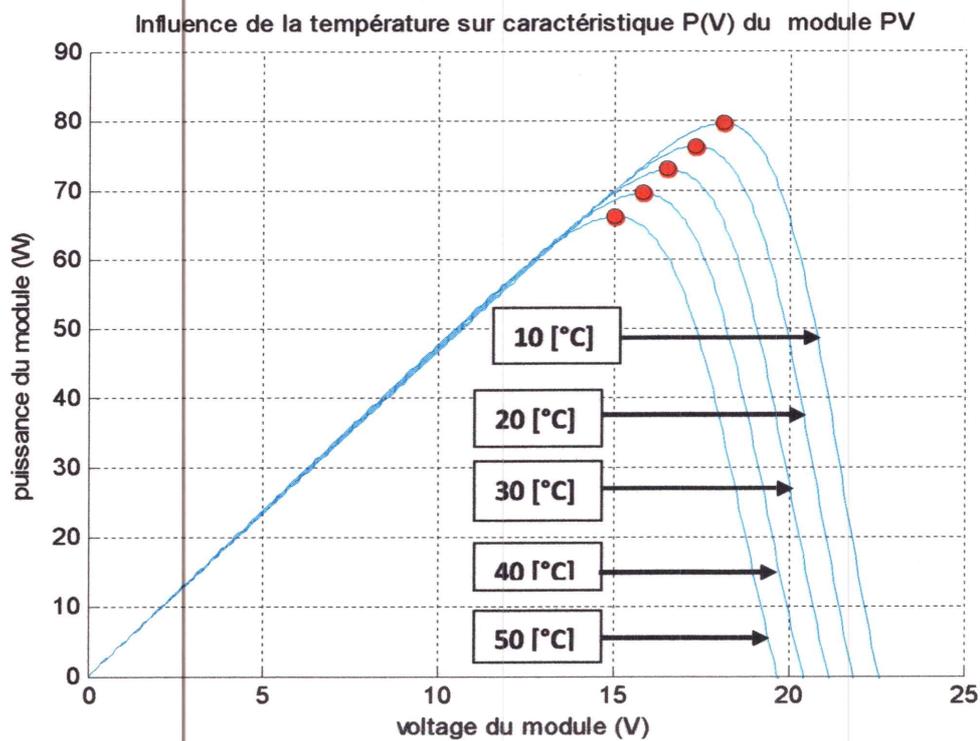


Figure III.18: Caractéristique $P = f(V)$ d'un panneau solaire pour différentes températures T à ensoleillement constant $G = 1000 \text{ W/m}^2$.



**Conclusion
générale**

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie diminuent en raison du développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut satisfaire la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. Cela explique pourquoi son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

La modélisation du transfert de chaleur dans un système photovoltaïque. Il est basé sur l'étude de l'influence de quelques paramètres ayant un grand rôle dans l'amélioration des performances thermiques du système PV.

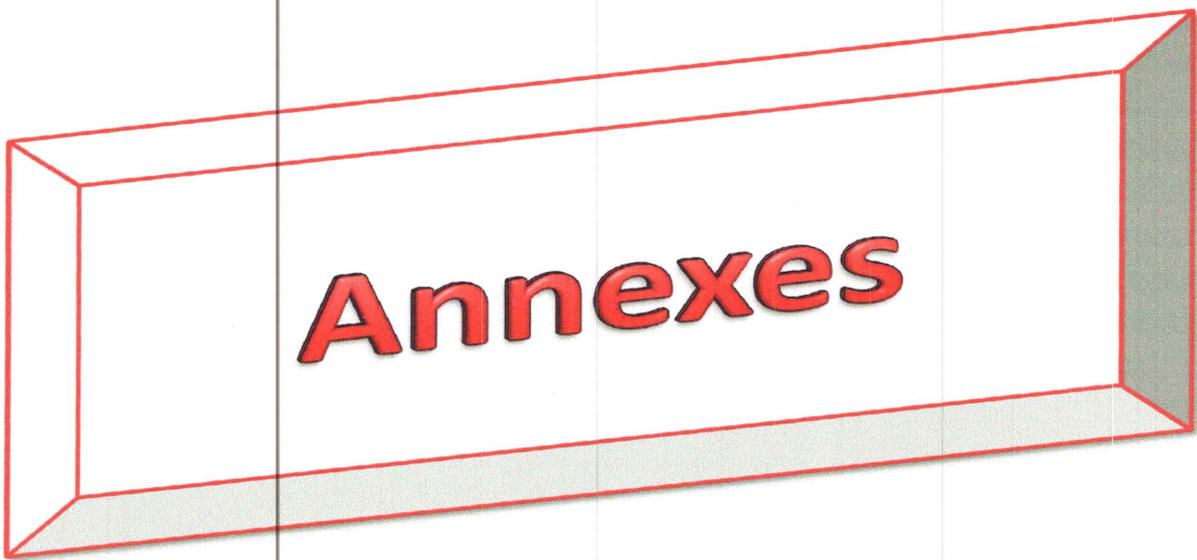
Après avoir fait un aperçu général sur les propriétés et les caractéristiques des cellules photovoltaïques et la manière de les assembler pour constituer un module photovoltaïque, ainsi que d'une petite recherche bibliographique sur les travaux recensés dans la littérature sur le même sujet, un programme de calcul a été développé en langage FORTRAN pour simuler le bilan thermique dans les différentes couches. La méthode itérative de Runge-kutta a été utilisée pour la résolution de système d'équations obtenues par l'application du bilan énergétique.

En effet, pour la conception des systèmes photovoltaïques, la donnée la plus utile est l'intensité du rayonnement global reçue, et absorbée par le système PV, ce dernier incliné par rapport à l'horizontale d'un angle correspondant à la latitude du lieu pour favoriser la captation de l'énergie solaire, le site choisi est la région de Jijel au mois de juin.

Les résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Généralement l'éclairement solaire et les températures de différents composants des capteurs se trouvent au maximum entre 12 h et 13 h.
- L'augmentation de la vitesse du vent permet de diminuer la température de la cellule, ce qui donne une élévation du rendement électrique.
- L'augmentation de l'épaisseur des couches du panneau favorise l'amélioration du rendement électrique du capteur.

- L'augmentation du coefficient d'échange par convection favorise l'amélioration du rendement électrique au même temps la diminution de la température de la cellule.
- la régulation de la puissance est effectuée par une commande MPPT (le principe nommé maximum power point tracker) suites aux variations des conditions météorologiques.



Annexes

Calcul du rayonnement solaire

A.1- La déclinaison du soleil (δ) : [39]

La déclinaison du soleil est un angle produit par une direction du soleil et le plan équatorial terrestre, L'angle formé varie d'une saison à l'autre.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365} * (284 + N)\right) \quad (^\circ) \quad (A.1)$$

N : C'est le nombre de jour calculé à partir de premier janvier jusqu'au jour de nos calcul.

A.2-La Longitude(L) :

C'est l'angle donné par rapport au méridien de Greenwich.

A.3-La latitude(ϕ) :

C'est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur.

A.4-L'azimut (a) :

C'est l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, compté négativement vers l'est.

$$\sin a = \frac{\sin \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (A.2)$$

A.5- La hauteur angulaire(h) :

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu.

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (A.3)$$

Ou les paramètres ϕ et ω : respectivement sont la latitude de lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

A.6-Paramètres du temps solaire : [39]**A.6.1- Temps solaire vrai (TSV) :**

On appelle temps solaire vrai à un instant donné l'angle horaire ω et on prend comme référence $\omega=0$.

$$TVS = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\omega \text{ en } ^\circ) \quad (A.4)$$

$$TVS = 12 + \omega \quad (\omega \text{ en } h) \quad (A.5)$$

A.6.2- L'angle horaire(ω) :

L'angle horaire du soleil ω est exprimé par la rotation diurne de la terre autour de son axe tout simplement en mesurant l'arc de la trajectoire solaire comprise entre le soleil et le plan méridien du lieu.

$$\omega = 15(TSV - 12)(^\circ) \quad (A.6)$$

A.6.3- L'angle horaire du soleil à son coucher : « ω_c » et au lever « ω_L »

L'angle horaire du soleil à son coucher (ω_c) est un angle horaire du soleil correspondant à l'heure du coucher du soleil, il est donné par l'équation suivante :

$$\omega_c = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (^\circ) \quad (A.7)$$

Avec:

$$\omega_L = -\omega_c$$

A.6.4- Le temps solaire moyen(TSM) :

Temps solaire moyen (TSM):

$$TSV - TSM = Et \quad (min) \quad (A.8)$$

Et : c'est l'équation du temps, elle est donnée par :

$$Et = 9.87 * \sin(2N') - 7.53 * \cos(N') - 1.5 \sin(N') \quad (A.9)$$

$$N' = \frac{360}{365} (N - 81) \quad (\text{A. 10})$$

N : est le nombre des jours compté à partir de premier janvier.

A.6.5- Le temps universel (TU) :

Le temps universel est défini comme étant le temps solaire moyen du méridien de Greenwich pour un lieu situé à la longitude L .

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (\text{h}) \quad (\text{A. 11})$$

TSM : temps solaire moyen.

A.6.7-- Le temps légal (TL) :

Le temps légal est l'heure officielle de l'état.

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{h}) \quad (\text{A. 12})$$

ΔH : L'écart horaire entre le méridien de Greenwich et celui du lieu considéré.

A-7 Le rayonnement solaire :

A.7.1- Le rayonnement global :

C'est la somme de rayonnement direct et diffus est donnée par la relation suivante :

$$P_g = P_{dif} + P_{dir} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{A. 13})$$

A.7.2- Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil, est donnée par la relation suivante :

$$P_{dir} = P_{dir;h} \times \cos(i) \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{A. 14})$$

Tel que :

i : L'angle d'incidence.

$P_{dir;h}$: Le rayonnement direct reçu par un plan horizontal.

$$P_{dir;h} = I_0 \times C \times \tau_{dir} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{A. 15})$$

$$c = 1 + 0.003 \times \cos\left(\frac{360 \times N}{365}\right) \quad (\text{A.16})$$

Sachant que :

I_0 : La constante solaire ($I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$).

N : Numéro du jour dans l'année.

τ_{dir} : Le coefficient de transmission du rayonnement direct.

$$\tau_{dir} = a_0 + a_1 \times \exp\left(-\frac{k}{\sinh}\right) \quad (\text{A.17})$$

$$a_0 = r_0 [0.4237 - 0.00821(6 - Z)^2] \quad (\text{A.18})$$

$$a_1 = r_1 [0.5055 - 0.00595(6.5 - Z)^2] \quad (\text{A.19})$$

$$k = r_k [0.2711 - 0.01858(2.5 - Z)^2] \quad (\text{A.20})$$

Où Z est l'altitude de l'observateur exprimée en km et r_0 , r_1 et r_k sont des coefficients correcteurs adimensionnels.

Type de temps	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Été(altitude moyenne)	0.97	0.99	1.02
Hiver(moyenne latitude)	1.03	1.03	1.00

Tableau : les coefficients de correcteurs adimensionnels

A.7.3- Le rayonnement diffus :

$$P_{dif} = P_{dif;c} + P_{dif;s} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{A.21})$$

✓ $P_{dif;c}$: Le flux émis par la voûte céleste.

$$P_{dif;c} = P_{dif;h} \times \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{A.22})$$

- β : L'angle d'inclinaison du capteur.
- $P_{dif;h}$: Le flux diffus reçu par un plan horizontal.

$$P_{dif;h} = I_0 \times C \times \sin(h) \times \tau_{dif} \quad (W/m^2) \quad (A.23)$$

▪ τ_{dif} : Coefficient de transmission du rayonnement diffus.

$$\tau_{dif} = 0.2710 - 0.2939 \times \tau_{dir} \quad (A.24)$$

✓ $P_{dif;s}$: Le flux émis par le sol.

$$P_{dif;s} = \rho \frac{1 - \cos\beta}{2} (P_{dif;h} \sin h + P_{dif;h}) (W/m^2) \quad (A.25)$$

ρ : L'albédo du sol égale 0.2.

A.9-Modèle de Capderou :

Dans ce modèle , le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair est donné par :

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (A.26)$$

T_0 : est le trouble dû à l'absorption gazeuse tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et surtout par la vapeur d'eau. Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou de proposer l'expression

Suivante :

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\vartheta) + 0.1(2 + \sin(\vartheta)) * A_{he} - 0.2 * Z - (1.22 + 0.14 * A_{he}) * (1 - \sin(h)) \quad (A.27)$$

$$A_{he} = \sin\left(\left(\frac{360}{365}\right) * (n - 121)\right) \quad (A.28)$$

Z : l'altitude du lieu.

T_1 : est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O₂, CO₂ et O₃) à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche:

$$T_1 = 0.89^Z \quad (A.29)$$

T_2 : Est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption (il

dépend à la fois de la nature et de la quantité des aérosols). En fonction du coefficient de rouble d'Angstrom, T_2 est donné par :

$$T_2 = (0.9 + 0.4A_{he}) * (0.63)^2 \quad (A.30)$$

✚ Le rayonnement reçu sur un plan horizontal par ciel clair :

Le rayonnement direct par ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par:

$$P_{dir;h} = I_c * \exp \left[-TL * \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h) \right)^{-1} \right] * (\sin h) \quad (W/m^2) \quad (A.31)$$

✚ Le rayonnement diffus incident sur un plan horizontal :

$$P_{dif;h} = I_c * \exp \left((-1 + 1.06 \log(\sin h)) + a - \sqrt{a^2 + b^2} \right) \quad (W/m^2) \quad (A.32)$$

$P_{dif;h}$: le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

$a=1.1$,

$$b = \log(T_L - T_0) - 2.8 + 1.02 * (1 - \sin(h))^2 \quad (A.33)$$

✚ Le rayonnement global reçu sur un plan incliné :

$$P_g = P_{dir;h} + P_{dif;h} \quad (W/m^2) \quad (A.34)$$

B.1-Le calcul de la température ambiante : [40]

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

• 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.2-Les caractéristiques physiques appliquées au capteur : (S=0.5 m²) :

✓ La vitre :

La masse volumique (kg.m ⁻³)	La chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	La conductivité thermique (W.K ⁻¹ m)	L'émissivité	Le coefficient d'absorption
3000	500	1.8	0.88	0.066

Tableau B.1 : Les propriétés de la vitre.

✓ La cellule :

La masse volumique (kg.m ⁻³)	La chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	La conductivité thermique (W.K ⁻¹ m)	L'émissivité	Le coefficient d'absorption
2330	677	148	0.95	0.9

Tableau B.2 : Les propriétés de la cellule.

✓ Tedlar :

La masse volumique (kg.m ⁻³)	La chaleur spécifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	La conductivité thermique (W.K ⁻¹ m)	L'émissivité	Le coefficient d'absorption
1200	12500	0.2	0.88	-----

Tableau B.3 : Les propriétés de Tedlar.

B.3- Les caractéristiques thermo-physiques de l'air :**B.3.1- La conductivité thermique ($W.m^{-1}.c^{-1}$) :**

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

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

$$\rho = \frac{353}{T + 273} \quad (B.5)$$

B.3.5- La chaleur spécifique ($J/kg.K$) :

$$C_p = 1008 \quad (B.6)$$

- [1] : **Alonso Corrine** <<Contribution à l'optimisation ,la gestion et le traitement de l'énergie>>.Mémoire d'habilitation à diriger les recherches,Université Paul Sabatier Toulouse III.2003.
- [2] : **BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA**<<La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite>>UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEEN. 8 Octobre 2013.
- [3] : **Larande Rémi** << Essais Accélérés de dégradation de Modules photovoltaïques>>.thèse de doctorat .Institut national des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [4] : **J. H. Wohlgemuth and R.C. Petersen** ; Solarex experience with ethylene vinyl acetate.
- [5] : <ftp://ftp.urgy.fr/ucp/geol/enseignement/cergy>.
- [6] : **M. G. Villalva and J. R. Gazoli, and E. R. Filho** 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays',Jornal of power electronics, ,May 2009.
- [7] : **A. Bilbao** ' Réalisation d'un commande mppt numérique' université de rovira i virgili ,2006.
- [8] : **H. BELGHITRI et H.** ' Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque' mémoire de magister, 2009.
- [9] : **A. labouret et M. villosz préface de jean louis bal** 'Energie solaire photovoltaïque', .livre 4 édition,2008.
- [10] : **B. Flèche - D. Delagnes** 'Energie solaire photovoltaïque.doc', juin 2007, <http://www.scribd.com>.
- [11] : **M.belhad** ' Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome', mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [12] : **Alain Ricaud** ; Photopiles solaires ; Edition Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010.
-

- [13] : **Vighelti Stéphane** <<Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau:Choix et dimensionnement des étages de conversion>>.Thèse de doctorat. Université Grenoble,institut polytechnique de Grenoble,2010.
- [14] : **loic Bailly**<< cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface>>.Thèse de doctorat, université Bordeaux I.2010.
- [15] : **S.ABADA** ‘ Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic’, Mémoire Maître es Sciences , Université laval, 2011.
- [16]: **M. Usama Siddiqui et al** ‘ A.F.M. Arif et al ‘ Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions ‘ , solar energy86(2012)2620-2631.
- [17]: **Teo et al en 2011**‘ An active cooling system for photovoltaic modules »applied energy90(2012)309-315.
- [18]: **N. Karami et al en 2014**‘ Heat transfer enhancement in PV cell using Boehmite ‘,energy conversion and management 86(2014)275-285.
- [19]: **M. Rosa et al en 2010**‘ Submerged photovoltaic solar panel: SP2’, Renewable Energy 35 (2010) 1862–1865.
- [20]: **Sopian et al en 1995**‘ performance analysis of photovoltaic thermal air heaters ’, Energy Converse. Mgmt Vol. 37, No. 11, pp. 1657-1670, 1996 .
- [21]: **Swapnil et al 2012**‘ Testing of two different types of photovoltaic–thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions’, Energy for Sustainable Development xxx (2012) xxx–xxx.
- [22] : **Ionut, -Razvan et al 2012**‘ Thermal modeling of a photovoltaic module under variable free convection conditions ‘ , Applied Thermal Engineering 33-34 (2012) 86-91.
- [23] :**Rebahi KARIMA** ; Caractérisation des transferts de chaleur dans les matériaux de construction .Mise en marche d'un banc expérimental, Mémoire de Magister 2006.
- [24] :**A. khedim**: l'énergie solaire utilisation thermique et photovoltaïque Editions ANEP 2005.
-

- [25]: **Anand S. Joshi** :Energy and exergy efficiencies of a hybridphotovoltaic–thermal (PV/T) air collector, *Renewable Energy* 32 (2007) 2223–2241.
- [26] :**M. Boubkri**, Numerical approach for performance study of hybrid PV/Thermal collector, *Revue des Energies renouvelables* Vol.12N°3(2009)355-368.
- [27] : **P. Dupeyrat**, Study of the thermal and electrical performances of PVT solar hot water system,
- [28] : **J.K. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos** Air-cooled PV/T solar collectors with low cost Performance improvements, *Solar Energy* 81 (2007) 498–511
- [29] :**Rebahi KARIMA** ; Caractérisation des transferts de chaleur dans les matériaux de construction .Mise en marche d'un banc expérimental, *Mémoire de Magister* 2006.
- [30]:**Anand S. Joshi** :Energy and exergy efficiencies of a hybridphotovoltaic–thermal (PV/T) air collector, *Renewable Energy* 32 (2007) 2223–2241.
- [31]: **K.S. Ong**, Thermal performance of solar air heaters experimental correlation, 0038-092X(95)00027-5
- [32] :**Evans, D.L., Florschütz, L.W., 1977**. Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight. *solar energy* 19.
- [33] : **Truncellito and Sattolo(1979)**. Simplified method for predicting photovoltaic array output .*Solar energy* 27,555-560,
- [34] :**Chow. T.T., 2003**. Performance analysis photovoltaïque thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy* 75,143,-152
- [35] : **Evans, D.L., Florschütz, L.W., 1978**. Terrestrial concentrating photovoltaic power system studies. *Solar energy* 20,37-43.
- [36] :**Notton. G. Cristofari .C. Mattai MPOggi. P.(2005)**. Modeling for a double glass photovoltaic module using finite difference *Applied thermal engineering* 25,2854-2877. .
- [37] : **Chow. T.T., He W. Ji. J 2006**. Hybrid photovoltaic thermosyphon water heating system for residential application .*Solar Energy* 80.298-

[38] :Hollands K.G.T.,Unny T.E.,Raithby G.R., et al.Free convective heat transfer across inclined air layers.trans.ASME.Journal of Heat Transfer,1976,vol.89,pp.189-193.

[39] : M. DEGUENET : Le séchoir solaire théorie et pratique. Unesco 1985.

[40] :Rebahi KARIMA : Caractérisation des transferts de chaleur dans les matériaux de construction .Mise en marche d'un banc expérimental, Mémoire de Magister 2006.

Résumé :

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une chaleur est générée contribuant à l'augmentation de la température des cellules photovoltaïques et donc une chute de son rendement, causant son échauffement. Plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur d'où l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison des systèmes photovoltaïques qui va générer de l'électricité et de la chaleur. L'objectif de ce travail est la modélisation du transfert thermique à travers les différentes couches d'un panneau solaire et voir l'importance de quelques paramètres thermiques et géométriques sur l'amélioration du rendement et la diminution de la température du système PV.

Mots clé : photovoltaïque – transfert thermique-rendement électrique

Abstract:

In the photovoltaic conversion of solar collector, a heat is generated contributing to the increase of the temperature of the photovoltaic cells and therefore a drop in yield, causing its heating. Several efforts have been made to evacuate the heat or the idea of exploiting this phenomenon by combining photovoltaic systems that will generate electricity and heat. The objective of this work is the modeling of heat transfer through the different layers of a solar panel and sees the importance of some thermal and geometric parameters on improving the performance and reducing the temperature of the PV system.

Key words: photovoltaic- heat transfer – electrical efficiency

المخلص في تحويل الطاقة الضوئية من تجميع الطاقة الشمسية، والحرارة المتولدة تساهم في زيادة درجة حرارة الخلايا الضوئية، وبالتالي انخفاض في المردود، مما تسبب في سخونتها. وقد بذلت عدة جهود لإجلاء الحرارة ومنها فكرة استغلال هذه الظاهرة من خلال الجمع بين النظم الكهربائية والحرارية التي من شأنها توليد الكهرباء والحرارة. والهدف من هذا العمل هو نمذجة انتقال الحرارة عبر طبقات مختلفة من لوحات الشمسية ودراسة أهمية بعض المعلمات الحرارية والهندسية على تحسين الأداء وخفض درجة حرارة النظام.

كلمات البحث: الألواح الشمسية - نقل الحرارة المردود الكهربائي.



Résumé :

Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire, une chaleur est générée contribuant à l'augmentation de la température des cellules photovoltaïques et donc une chute de son rendement, causant son échauffement. Plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur d'où l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison des systèmes photovoltaïques qui va générer de l'électricité et de la chaleur. L'objectif de ce travail est la modélisation du transfert thermique à travers les différentes couches d'un panneau solaire et voir l'importance de quelques paramètres thermiques et géométriques sur l'amélioration du rendement et la diminution de la température du système PV.

Mots clé : photovoltaïque – transfert thermique-rendement électrique

Abstract:

In the photovoltaic conversion of solar collector, a heat is generated contributing to the increase of the temperature of the photovoltaic cells and therefore a drop in yield, causing its heating. Several efforts have been made to evacuate the heat or the idea of exploiting this phenomenon by combining photovoltaic systems that will generate electricity and heat. The objective of this work is the modeling of heat transfer through the different layers of a solar panel and sees the importance of some thermal and geometric parameters on improving the performance and reducing the temperature of the PV system.

Key words: photovoltaic- heat transfer – electrical efficiency

المخلص في تحويل الطاقة الضوئية من تجميع الطاقة الشمسية، والحرارة المتولدة تساهم في زيادة درجة حرارة الخلايا الضوئية، وبالتالي انخفاض في المردود، مما تسبب في سخونتها. وقد بذلت عدة جهود لإجلاء الحرارة ومنها فكرة استغلال هذه الظاهرة من خلال الجمع بين النظم الكهربائية والحرارية التي من شأنها توليد الكهرباء والحرارة. والهدف من هذا العمل هو نمذجة انتقال الحرارة عبر طبقات مختلفة من لوحات الشمسية ودراسة أهمية بعض المعلمات الحرارية والهندسية على تحسين الأداء وخفض درجة حرارة النظام.

كلمات البحث: الألواح الشمسية - نقل الحرارة المردود الكهربائي.

