

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences de la Matière

## MEMOIRE

### MASTER ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences de la Matière**

**Filière : Sciences Physiques**

**Spécialité : physique énergétique et énergie renouvelable**

#### Intitulé

Etude théorique et expérimentale de l'influence des paramètres climatiques de la région d'Adrar  
sur le fonctionnement des capteurs solaires

**Présenté par :** - M<sup>elle</sup> MOULAY Nesma

- M<sup>elle</sup> FOUJIL Khadidja

#### Devant le jury :

Président : M. KHALLADI M.F.

MCB

Univ Adrar

Promoteur : M. OMARI B.

MAA

Univ Adrar

Examineur : M. BELABACI M.

MAA

Univ Adrar

**Année Universitaire : 2019/2020**

# Dédicaces

*Celui qui a fatigué pour moi et m'a donné la sécurité et l'amour pour la vie de ma mère.*

*A mes frères*

*Mes sœurs et toute ma petite famille chacun à son nom.*

*A mes cousins et toutes mes amies.*

*Nasma*

## *Dédicace*

A la volonte du grand Dieu notre ALLAH tout puissant  
et bienveillant qui nous a aidé à présenter ce modeste travail

que je dédie ce travaille à :

A ma mère et A mon père source d'affectation de courage  
et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre  
cette place.

A mes chéris frères chaque un son nom

A mes chéris sœurs chaque un son nom

A tous mes amis et collègues surtout : Fatima, Aicha, Malika et Djamaa

A toute famille FOUJIL

*Khadidja*

**REMERCIEMENTS**

---

*Premièrement et avant tous ; je remercie \*DIEU\* pour le  
succès que j'ai accompli cet humble travail*

*Grand merci aussi pour le professeur supervisant de ce travail  
ce qui a eu une grande influence sur mon succès*

*Monsieur \*OUMARI Boumedien\*.*

*Grande merci à*

*Monsieur \*MAOUDJ Rachid\*.*

*Monsieur \*Dr. HARROUZ Abdelkader\*.*

*Monsieur \*SIDAMAR Ahmed\*.*

*Merci à toute ma famille qui est mon soutien dans la vie et  
tous*

*Mes collègues dans cette spécialité.*

*Merci également à tous ceux qui ont contribué de loin ou de  
près le succès de ce travail.*

Table des matières	
Titre	N°
Résumé	
Dédicaces	
Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction General	I
Chapiter I Etude générale sur les capteurs solaires	
I.1 Introduction	2
I.2 Capteurs solaires photovoltaïques	2
I.2.1 Principe de fonctionnement	2
I.2.2. Les différentes technologies de la cellule solaire	4
I.2.3. Photovoltaïque à concentration	4
I.3. Capteurs solaires thermiques :	5
I.3.1. Principe de fonctionnement :	5
I.3.2. Classification des capteurs thermiques :	6
I.3.3. Capteur plan	8
I.3.4. Capteur solaire a tube sous vide	9
I.3.5. Les capteurs à concentration	10
I.4 Capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT)	10
I.4.1. Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques	11
I.4.1.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à air	11
I.4.1.2. Les capteurs solaires hybrides PVT avec un liquide	12
I.5 Conclusion	13
Chapiter II Modélisation du capteur solaire hybride PVT	
II-1- Introduction	14
II-2- Éléments de constructions et principe	15
II.3 Modèle thermique d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique:	17
II.4 Principe de l'étude thermique d'un PVT	18
II.5 Bilan énergétique du capteur hybride PVT	19
II.6 Performances thermiques des capteurs hybrides	32
II.7 Résolution numérique du système	33
II.7.1 Méthode de Range-Kutta	34
II.7.2 Traitement informatique	35
II.7.3 Organigramme	36
II.8 Conclusion	36
Chapitre III- Etude expérimentale d'un capteur PVT	37
III.1 Introduction	37
III.2 Description du système PV/T	37
III.2.1 Description technique du système PV/T	37
III.2.2 Dimensions du capteur solaire hybride PV/T	37
III.3 Banc d'essai	37
III.4 Caractéristiques géographique et météorologique du site d'Adrar	39
III.5 Résultats et Discussions	39
III.5.1 La variation de l'éclairement globale	39
III.6 Conclusion	42
Conclusion générale	42
Références Bibliographiques	45

Liste des tableaux

N	Titre	Page
<b>1</b>	Tableau I.1 classification des différents types des capteurs solaires	<b>7</b>
<b>2</b>	Tableau II.1 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants	<b>16</b>

## Liste des figures

<b>Figure</b>	<b>N°</b>
Figure I.1. Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant	<b>2</b>
Figure I.2. Caractéristique d'une jonction PN (Diode).	<b>3</b>
Figure I.3. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	<b>3</b>
Figure I.4. Technologie des cellules solaires ; a) monocristallines, b) amorphes c) poly-cristallines	<b>4</b>
Figure I.5. Configurations de réflecteur de concentration possible	<b>5</b>
Figure I.6. processus dans un capteur solaire plan	<b>6</b>
Figure I.7: Un capteur solaire plan avec vitrage	<b>8</b>
Figure I.8 : capteurs solaires a tube sous vide	<b>9</b>
Figure I.9. Prototypes de capteur solaire PVT à air	<b>12</b>
Figure I.10..prototypes de capteur solaire PVT avec un liquide	<b>13</b>
Figure II.1 : Conception du capteur PVT à étudier dans ce travail	<b>14</b>
Figure II-2 : Vu des trois couches de panneau photovoltaïque	<b>15</b>
Figure II.3 : Schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur : a) à eau. b) à air.	<b>16</b>
Figure II.4 : Modèle d'un capteur hybride PVT	<b>17</b>
Figure II.5 : Schéma électrique équivalent du capteur hybride	<b>18</b>
Figure II.6 : Coupe du capteur représentant les températures des différents noeuds	<b>19</b>
Figure II -7-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure	<b>12</b>
Figur II -8-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure	<b>22</b>
Figure II -9:Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la cellule photovoltaïque	<b>23</b>
Figure II -10 Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar	<b>23</b>
Figure II -11-a:Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante	<b>24</b>
Figure II -11-b:Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante	<b>24</b>
Figure III.1 : Photo du prototype de capteur PV/T étudié (URERMS Adrar)	<b>36</b>
Figure III.2 : Caractéristiques I-V du système PVT et de témoin PV	<b>37</b>
Figure III.3: Variation des températures de fluide et de la cellule en fonction de l'éclairement	<b>40</b>
Figure III.4 : Variation des différentes températures en fonction de la température ambiante	<b>42</b>
Figure III.5 : Effet de radiation solaire dans la température de sortie pour différentes valeurs de débit massique (Débit 2 > Débit1)	<b>42</b>
Figure III.6 : Température de la cellule solaire en fonction de	<b>43</b>

**Nomenclature**

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
<i>TSV</i>	temps solaire vrai	
<i>TSM</i>	temps solaire moyen	[heure]
<i>TU</i>	temps universel	[heure]
<i>ET</i>	Equation du temps	[minute]
<i>H</i>	Hauteur angulaire solaire	[degré]
<i>a</i>	Azimut	[degré]
	Emittance monochromatique	[W/m <sup>2</sup> /μm <sup>-1</sup> ]
<i>E</i>	Emittance	[W/m <sup>2</sup> ]
<i>I<sub>sc</sub></i>	Constante solaire 1367	[W/m <sup>2</sup> ]
<i>IDN</i>	Eclairement solaire direct	[W/m <sup>2</sup> ]
<i>I<sub>o</sub></i>	Energie solaire reçue par une surface horizontale	[J/m <sup>2</sup> ]
<i>I</i>	Rayonnement solaire extraterrestre	[W/m <sup>2</sup> ]
<i>d<sub>terre</sub></i>	Diamètre de la terre	[m]
<i>d<sub>sol</sub></i>	Diamètre de soleil	[m]
$\phi$	Latitudes	[degré]
$\lambda$	Longitude	[degré]
$\delta$	Déclinaison	[degré]
	Angle horaire	[degré]
$\alpha_1$	Angle horaire du levé du soleil	[degré]
$\alpha_c$	Angle horaire du couché du soleil	[degré]
<i>G</i>	Eclairement Global	
<i>D</i>	Rayonnement diffus	
<i>n</i>	nombre de jours	
<i>E<sub>ph</sub></i>	la quantité d'énergie	
<i>h</i>	constante de Planck	
<i>C</i>	la vitesse de la lumière	



	longueur d'onde	
$V_t$	tension thermique	
$N$	facteur d'idéalité de la photopile	
$K$	constant de Boltzmann( $1,38.10^{-23}J/K$ ) ;	
$q$	charge de l'électron ( $1,6.10^{-19}C$ ).	
$I_{RP}$	courant traversant $R_p$	
$FF$	Facteur de forme	
$P_{max}$	la puissance maximale fournie	
$P_i$	la puissance du rayonnement solaire incident	
$S$	Surface de la cellule solaire.	
$\phi$	Flux incident	
$\eta_m$	Rendement énergétique maximum	
$E_G$	Irradiation solaire	$[W/m^2]$
$S$	Surface du module photovoltaïque	$[m^2]$
$A_P$	nombre de module constituant le champ photovoltaïque.	
$\eta_0$	Rendement de résistance des modules	
$\eta(E_G)$	Facteur de correction du rendement du champ du rayonnement	
$\eta(T_c)$	Facteur de correction du rendement	
$T_R$	température de référence $25^\circ C$ .	
$\varepsilon$	la variations du rendement	$[^\circ C^{-1}]$
$T_C$	la température de la cellule solaire.	
$y_{ch}$	Le rendement du champ photovoltaïque	
$P_e$	la puissance à l'entrée du champ photovoltaïque	
$V_{mpp}= V_m$	Tension d'un module PV au point de puissance maximale	$[V]$
$I_{mpp}= I_m$	Courant d'un module PV au point de puissance maximale	$[A]$
$I_{mr}$	Courant de référence d'un module PV au point de puissance maximale.	
$E$	Ensoleillement	$[W/m^2]$

$T_{ref}$	Température de référence des cellules PV	[°K]
$V$	La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.	
$I_p$	Le courant circulant dans la résistance RP.	
$RP$	Résistance shunt de la cellule PV.	
$RS$	Résistance série de la cellule PV.	
$VOC=VCO$	Tension du circuit ouvert.	
$ISC=ICC$	Courant de court circuit.	
$NS$	Nombres des cellules en sérier.	
$NP$	Nombres des cellules en parallèle.	
	Rendement.	
$Kt$	Coefficient de variation de courant $I_{cc}$ selon la température.	
$K$	Constante de Boltzmann [1,381.10-23J/K].	
$B$ ou $A$	facteur d'idéalité de la jonction.	
$E_g$	Énergie de Gap du matériel de la cellule PV	[eV]
$I_{pv}$	Courant générer par la cellule photovoltaïque.	
$I_{ph}$	Courant de la cellule PV (Photo-Courant).	
$I_d$	Le courant circulant dans la diode.	
$I_0$	Le courant de saturation inverse de la diode.	
$T$	Température de la jonction des cellules PV	[°K]
$T_n$	Température de référence des cellules PV	[°K].
$E_{réf}$	L'éclairement de référence	[1000 w/m <sup>2</sup> ]

# *Introduction Générale*

## **Introduction Général**

Le contexte énergétique national se caractérise essentiellement par une dépendance excessive vis-à-vis des hydrocarbures. Les hydrocarbures occupent toujours un poids important dans l'économie. 98% de nos recettes d'exportations proviennent du pétrole et du gaz conventionnel [1].

La croissance continue de la demande interne d'énergie (pétrole & gaz), les risques d'épuisement de ces ressources ainsi que le réchauffement climatique, font clairement apparaître la nécessité d'engager une transition énergétique vers un modèle plus durable.

La réalisation des objectifs de la sécurité et de la durabilité énergétique, ainsi que celui de l'accès à une énergie propre exige un cadre politique solide et stable qui donnera la priorité aux politiques d'efficacité énergétique ainsi qu'au développement des énergies renouvelables [1].

Il est donc nécessaire d'engager une transition énergétique vers un système énergétique faisant appel à des sources d'énergies non fossiles, notamment les énergies renouvelables.

L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes, les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques [1]. Cela a conduit à une combinaison des systèmes des différentes sources d'énergies, ces systèmes sont appelées aussi les systèmes hybrides et ils sont utilisés pour améliorer la production énergétiques. Parmi ces différents types des systèmes hybrides, on va étudier dans ce travail le système hybride photovoltaïque thermique, aussi appelé communément le capteur solaire hybride PV/T. Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non converti en électricité par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement [2]. Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour améliorer le rendement des capteurs solaires photovoltaïques et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y'a eu aussi l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison du système photovoltaïque avec un système thermique pour former le capteur hybride PV/T qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur. Le rendement électrique du capteur hybride PV-T pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur des cellules solaires, ce qui va le refroidir en même temps [2].

L'objectif de notre travail est d'étudier théoriquement et expérimentalement le capteur hybride PVT à travers la détermination des niveaux des températures de ces différentes couches et ainsi d'étudier l'influence de quelques paramètres sur ses performances électriques et thermiques et enfin de présentera une comparaison avec d'autres configurations existantes.

Notre travail est organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, en premier lieu, nous avons présenté une étude théorique des différents types des capteurs solaires (photovoltaïque, thermique et hybride PVT).

Dans le deuxième chapitre, un modèle mathématique détaillé sera présenté pour la modélisation des différents capteurs solaires et principalement les capteurs hybrides PVT.

Enfin nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus dans le troisième chapitre. Notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

# ***CHAPITRE 1***

## ***Etude générale sur les capteurs solaires***

## Chapitre I

### Etude générale sur les capteurs solaires

#### I.1- Introduction

Les capteurs sont des appareils destinés à transformer l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique utilisable. Par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur à différents niveaux de températures ou en électricité par le biais des panneaux photovoltaïques.

Il existe grands types de capteurs solaires c'est le capteur solaire photovoltaïque, capteur solaire thermique et capteur solaire hybride photovoltaïque thermique.

#### I.2- Capteurs solaires photovoltaïques

##### I.2.1- Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériel formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fem) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque [1].

La figure 1.1 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

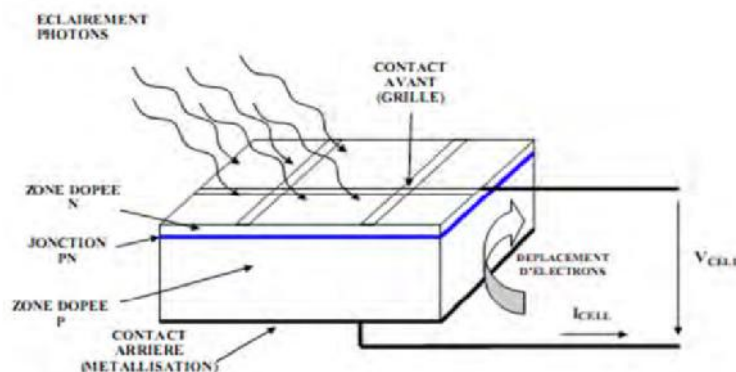


Figure 1.1- Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant

En principe, une cellule solaire est une diode au silicium de grande surface. La figure 1.2 montre le symbole du schéma pour une diode ainsi que sa caractéristique.

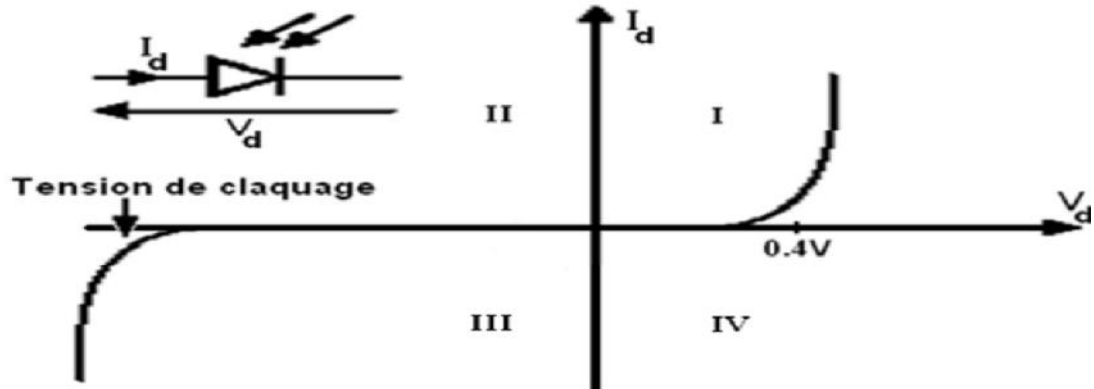


Figure 1.2- Caractéristique d'une jonction PN (Diode).

La figure 1.3 décrit le schéma du circuit équivalent (à une diode) d'une cellule solaire

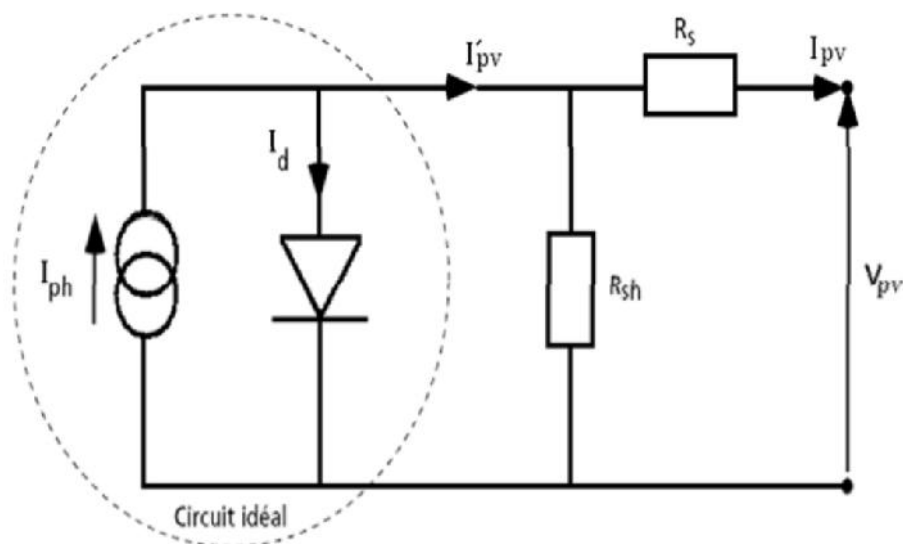


Figure 1.3- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

### I.2.2- Les différentes technologies de la cellule solaire

Pratiquement toutes les cellules solaires disponibles aujourd'hui sont réalisées à base de silicium. Ce semi-conducteur est principalement employé dans la fabrication de puces Informatiques.



Les cellules solaires sont construites avec la même matière première et les mêmes procédés de base. Elles existent en différentes formes et technologies :

- **Cellules monocristallines** : Chaque cellule est découpée dans un monocristal de silicium. Ce type de cellule présente le plus haut pouvoir de conversion
- **Cellules poly cristallines** : Les cristaux de silicium qui les composent sont bien visibles. Leur rendement est légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, ce qui justifie leur coût moindre.
- **Cellules amorphes** : Ce type de cellule ne possède pas de structure cristalline. Leur coût de fabrication et leur rendement sont légèrement inférieurs par rapport aux autres types cités précédemment. Elles sont généralement utilisées dans des appareils portables (calculatrices, ...).
- **Cellules en couche mince** : La technologie « couche mince » désigne un type de cellule (ou module) obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat (verre).

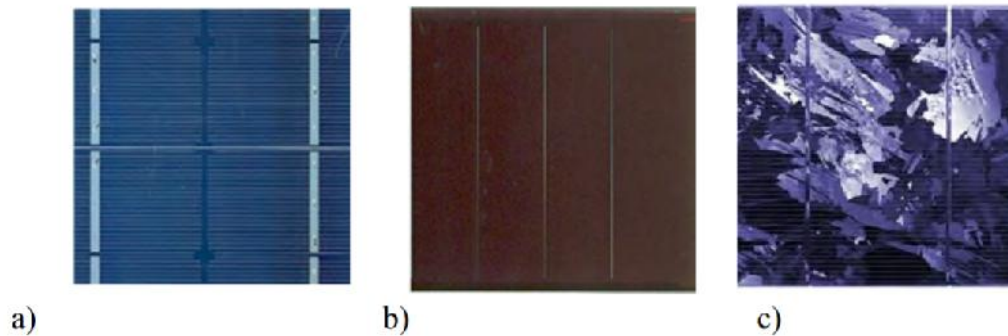


Figure 1.4- Technologie des cellules solaires ; a) monocristallines, b) amorphes  
c) poly-cristallines [2]

### **I.2.3- Photovoltaïque à concentration**

Un concentrateur solaire photovoltaïque augmente l'intensité du rayonnement solaire à la surface du capteur photovoltaïque, ce qui réduit la zone de matériau photovoltaïque nécessaire par unité de puissance. Une réduction des coûts peut être obtenue pour le concentrateur global lorsque le coût du concentrateur est inférieur au coût de matériel PV déplacées.

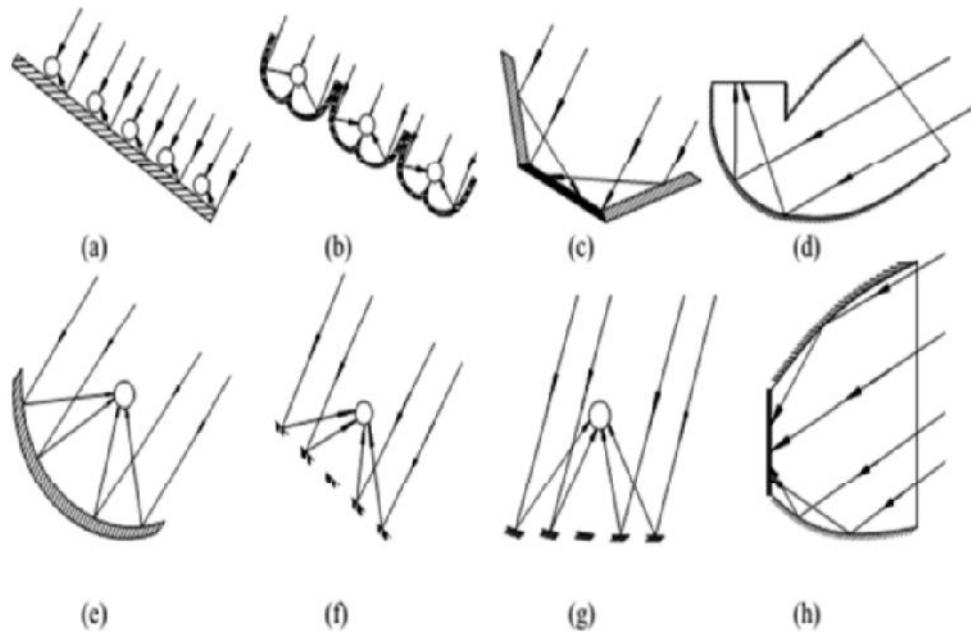


Figure 1.5- Configurations de réflecteur de concentration possible

Les concentrateurs optiques peuvent être soit réfléchissants, de réfraction ou une combinaison des deux.

### I.3- Capteurs solaires thermiques

#### I.3.1- Principe de fonctionnement

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).

Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur la paroi absorbante qui s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, et l'effet de serre qui consiste à accumuler la chaleur dans un capteur pour la transférer directement ou par l'intermédiaire d'un fluide qui circule sous cette paroi et récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ( $T_{fs} - T_{fe}$ ) à la traversée du capteur.

Un collecteur solaire ou capteur solaire est utilisé pour extraire la chaleur du rayonnement du soleil. Ainsi, un collecteur fait toujours quelque chose de chaud. Au cœur d'un capteur solaire est un absorbeur solaire. Ce dernier absorbe le rayonnement du soleil et la convertit en chaleur. Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur à haute température, Les centrales thermiques peuvent même produire de l'électricité à partir de la chaleur à haute température [3, 4].

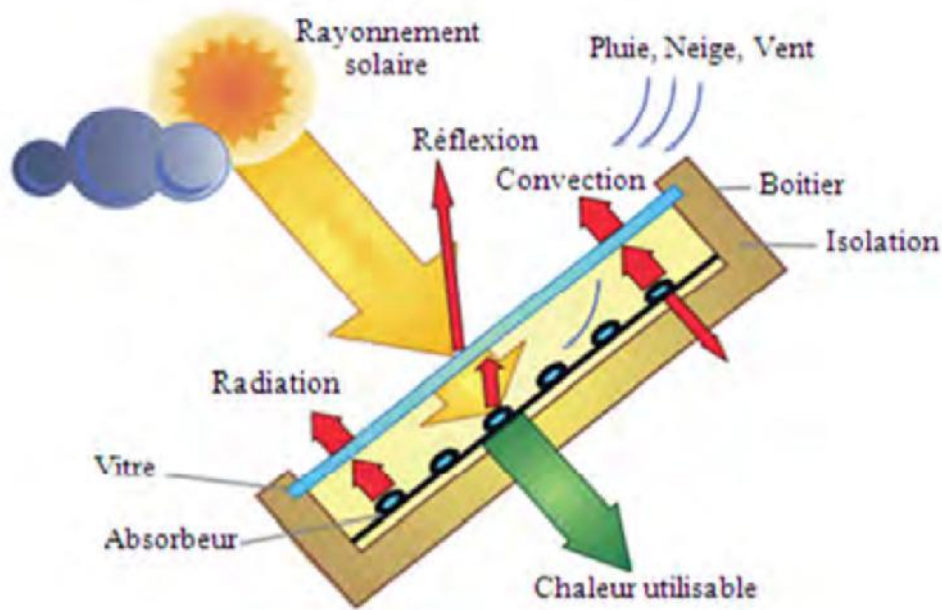


Figure 1.6- Processus dans un capteur solaire plan.

### I.3.2- Classification des capteurs thermiques

On peut classer le capteur solaire selon la température ; les capteurs à faible température, moyenne température, haute température [5-11].

Suivant ce classement il existe essentiellement trois types des capteurs solaires thermiques.

- Capteur plan
- Capteur a tube sous vide
- Capteur a concentration

Tableau 1.1 classification des différents types des capteurs solaires

	Type de capteur		Rapport de concentration pour rayonnement direct	Intervalle Température T(K)
	Nom	Diagramme schématique		
Stationnaire	Capteur à absorbeur plan		$C \leq 1$	$300 < T > 360$
	Tube sous vide		$C \leq 1$	$300 < T > 460$
Un axe	Réflecteur parabolique composé		$1 \leq C \leq 1$	$340 < T > 510$
			$5 \leq C \leq 15$	$340 < T > 560$
	Réflecteur Parabolique		$15 < C \leq 40$	$340 < T > 560$
	Réflecteur Fresnel		$10 < C > 40$	$340 < T > 540$
	Réflecteur cylindro-Parabolique		$10 < C > 50$	$340 < T > 540$
Deux axes	Réflecteur disque parabolique		$100 < C > 1000$	$340 < T > 1200$
	Réflecteur sphérique		$100 < C > 300$	$340 < T > 1000$
	Champs d'Héliostat		$100 < C > 1500$	$340 < T > 3000$

Bien qu'il existe de grande différence géométrique mais leur but reste le même : pour convertir le rayonnement solaire en chaleur afin de satisfaire certains besoins énergétiques. La chaleur produite par les capteurs solaires peut être utilisée directement ou être stockée.

Pour évaluer la quantité d'énergie produite dans un capteur solaire, il est nécessaire de considérer les propriétés physiques des matériaux. Le rayonnement solaire, principalement à courte longueur d'onde, passe par une couverture pour atteindre le récepteur. Le verre faible teneur en fer est souvent utilisé comme une couverture de vitrage en raison de sa forte transmissibilité ; la couverture aussi réduit considérablement les pertes de chaleur.

Les caractéristiques optiques du récepteur doivent être aussi proches que possible de celles d'un corps noir, en particulier à haute capacité d'absorption. Les propriétés de la conductivité thermique peuvent être améliorées en ajoutant des revêtements sélectifs. Qui est en collaboration avec l'absorption de rayonnement et une augmentation de la température de l'absorbeur, Le matériau de vitrage devient essentiellement opaque à la nouvelle condition de longueur d'onde favorisant l'effet de serre. Une combinaison de la haute transmissibilité du rayonnement solaire par la couverture et de haute capacité d'absorption du récepteur apporte une grande performance pour un capteur solaire bien conçu.

### **I.3.3- Capteur plan**

Un Capteur solaire à plaque plane est constitué d'un imperméable, en métal ou en fibre de verre boîte isotherme contenant une plaque d'absorption de couleur foncée, l'absorbeur avec un ou plusieurs vitrages. Les plaques absorbantes sont généralement fabriquées à partir de métal en raison de sa haute conductivité thermique et peintes avec des revêtements de surface sélectifs spéciaux à fin d'absorber et transférer la chaleur mieux que la peinture noire régulier possible. Le vitrage recouvre réduire la convection et les pertes de chaleur de rayonnement de l'environnement

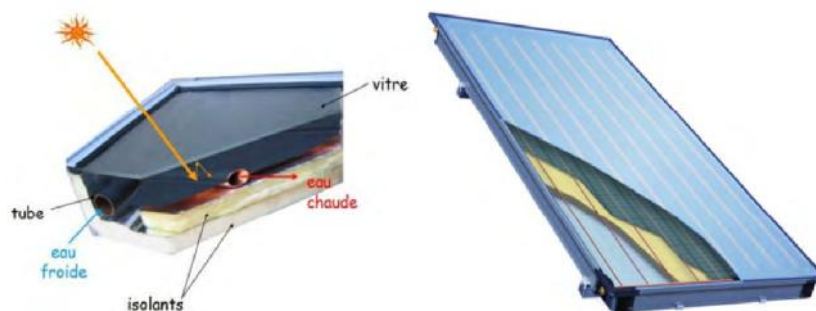


Figure 1.7- Un capteur solaire plan avec vitrage

### **I.3.4- Capteur solaire à tube sous vide**

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel ainsi que pour les applications de refroidissement par des cycles de réfrigération régénérates [8,10].

Le capteur solaire à tubes sous vide est constitué des rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête comme illustre à la figure 1.8. L'air à l'intérieur de chaque tube est retiré est

atteint des pressions de vide autour de  $10^{-3}$  mbar. Cela crée des conditions d'isolation élevées pour éliminer les pertes de chaleur par convection et par rayonnement, pour atteindre des températures plus élevées. Dans les tubes à passage direct, le fluide s'écoule à travers l'absorbeur. (Figure 1.8; a, b) Ces capteurs sont classés en fonction de leurs nœuds de liaison-matériaux ; par exemple verre-métal ou verre-verre et par l'agencement des tubes (concentriques ou tube en U). A l'intérieur de chaque tube une ailette métallique plane ou incurvée est attachée à un tube de cuivre. L'ailette est revêtue d'un film mince dont les propriétés optiques sélectives permettent d'atteindre une forte absorbance du rayonnement solaire et réduisent les pertes de chaleur par rayonnement.

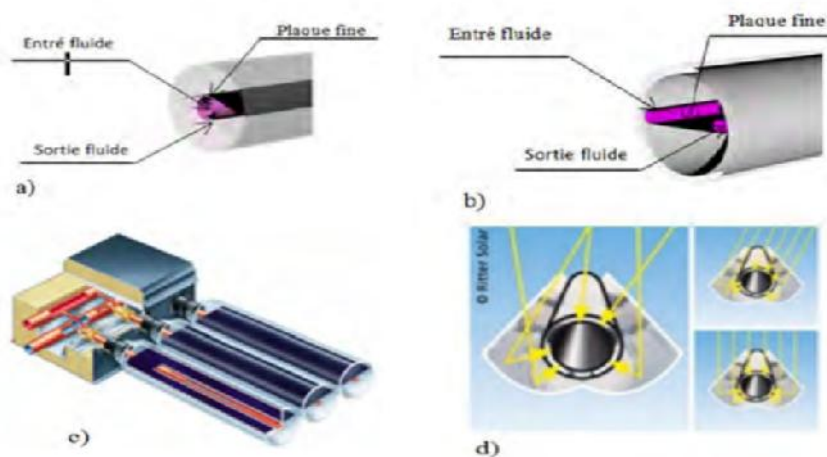


Figure 1.8- Capteurs solaires à tube sous vide

### I.3.5- Les capteurs à concentration

#### Principe du fonctionnement

Dans les systèmes à concentration, le rayonnement solaire direct est reçu par une surface de grande taille appelée surface d'ouverture, puis dirigé vers un absorbeur de surface plus petite. Ce résultat est obtenu grâce à plusieurs réflexions sur des miroirs, ou à des réfractions (à travers des prismes, ou lentilles). Dans les dispositifs à concentration on notera la présence de nombreux avantages et inconvénients.

#### Les avantages :

- ✓ La diminution de la surface de l'absorbeur se traduit par une baisse thermique qui sont proportionnelles à la surface.

- ✓ Les rendements sont par conséquent plus élevés.
- ✓ Les températures obtenues varient d'une certaine de C à plus de 4000C en fonction du taux de concertation.

**Les inconvénients :**

- ✓ Seul le rayonnement direct est utilisé.
- ✓ Les pertes optiques peuvent être importantes, car elles sont dues aux phénomènes de réflexion on de réfraction, et aux caractéristiques géométriques du système.
- ✓ Les pertes thermique sont importantes à cause du niveau de température plus élevé de l'absorbeur.

**I.4 Classification des Capteurs hybrides photovoltaïques thermiques (PVT)**

Une grande partie du rayonnement solaire n'est pas convertie en électricité et accroît leur température entraînant ainsi une baisse de leur rendement électrique. Les capteurs solaires PVT hybrides sont des systèmes utilisant des modules photovoltaïques (PV) comme absorbeur thermique. Par récupération d'une partie de la chaleur dissipée par les modules PV à l'aide d'un fluide caloporteur, ces capteurs solaires hybrides permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique. Ils associent ainsi un capteur solaire photovoltaïque intégré au bâti et un capteur solaire thermique [12].

La recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. Certains nombres de recherche mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation, ainsi que l'intégration du capteur PVT pour d'autre application comme le chauffage sanitaire.

Beaucoup des travaux expérimentaux et théoriques ont été réalisées ensuite, en vue du développement des systèmes hybrides PVT. La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermique et électrique ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré. Pour cela, quelques auteurs mettent l'accent sur le développement de modèles électrique de photo conversion en régime permanent ou dynamique. Certaines de ces analyses s'appuient en outre sur des confrontations avec des études expérimentales en conditions contrôlées situé sur divers sites.

En peut classer les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques selon la nature du fluide utile [13] ; les capteurs hybride à air et les capteurs hybride à fluide caloporteur liquide et les capteurs à concentration.



### I.4.1. Les capteurs solaires hybrides PVT à air

Ils sont pris en compte les capteurs solaires PVT à air et les capteurs solaires PV intégré au bâti dans une configuration de type double –peau avec récupération de chaleur dans la lame d'air en sous-race. Compte tenu de faible demande en chauffage solaire sur le marché, peu d'étude ont été menées sur les capteurs solaires PVT intégrés. Plusieurs configurations ont été fait de ce type de capteur PVT à aire [21, 27,28] on peut montrer sur la figure suivante :

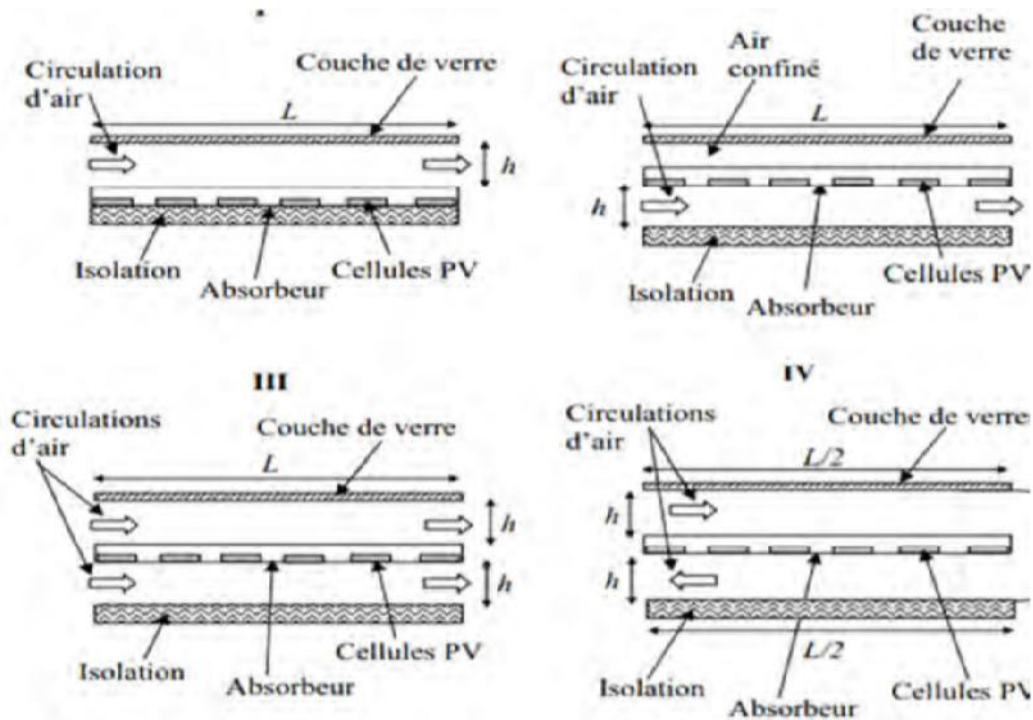


Figure 1.9. Prototypes de capteur solaire PVT à air

### I.4.2. Les capteurs solaires hybrides PVT avec un liquide

Afin d'améliorer la performance du système photovoltaïque, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PVT. L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du module photovoltaïque par circulation de l'eau pour extraire la chaleur utilisant l'eau comme liquide réfrigérant. Ces collecteurs du liquide PVT sont semblables à un collecteur conventionnel avec un liquide ; un absorbeur avec un tube serpentin ou des séries de canalisations verticales parallèles est appliqué, sur lesquelles le module PV a été stratifié ou collé comme joint époxyde adhésif [21,23, 24]



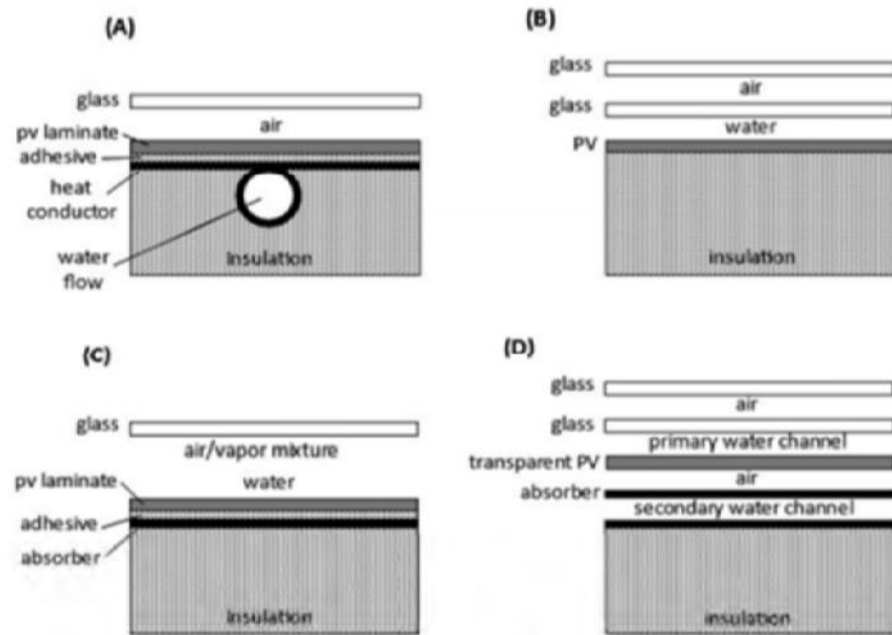


Figure 5.2.1 Various collector concepts: (A) sheet-and-tube PVT, (B) channel PVT, (C) free flow PVT, (D) two-absorber PVT (insulated type) (Zondag et al., 2003).

### Figure 1.10 : prototypes de capteur solaire PVT avec un liquide

Bien que les collecteurs liquides se soient avérés techniquement faisables, les possibilités économiques sont pourtant incertaines comparé au système du chauffage PVT à air, pas beaucoup de développements sont vus dans la littérature sur des systèmes de liquide-chauffage dus à leurs limitations inhérentes comme : le coût additionnel de l'unité thermique pour la circulation de l'eau, et le problème de congélation inhérent du fluide de fonctionnement une fois utilisé dans des régions de base température, etc.

#### I.5- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude générale sur l'élément le plus important de l'exploitation de l'énergie solaire qui est le capteur solaire.

Dans cette partie on a étudié le principe des différents types de capteurs solaires (Thermiques, Photovoltaïque, PVT).

***CHAPITRE 2***  
***Modélisation du***  
***capteur solaire***  
***hybride PVT***

## Chapitre II

### Modélisation du capteur solaire hybride PVT

#### II-1- Introduction

Les capteurs solaires hybrides sont les éléments fondamentaux de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique, ceci permet de l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire captée. La production de cette énergie électrique et thermique d'un PVT dépend des plusieurs paramètres d'entrées et de sorties : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur.

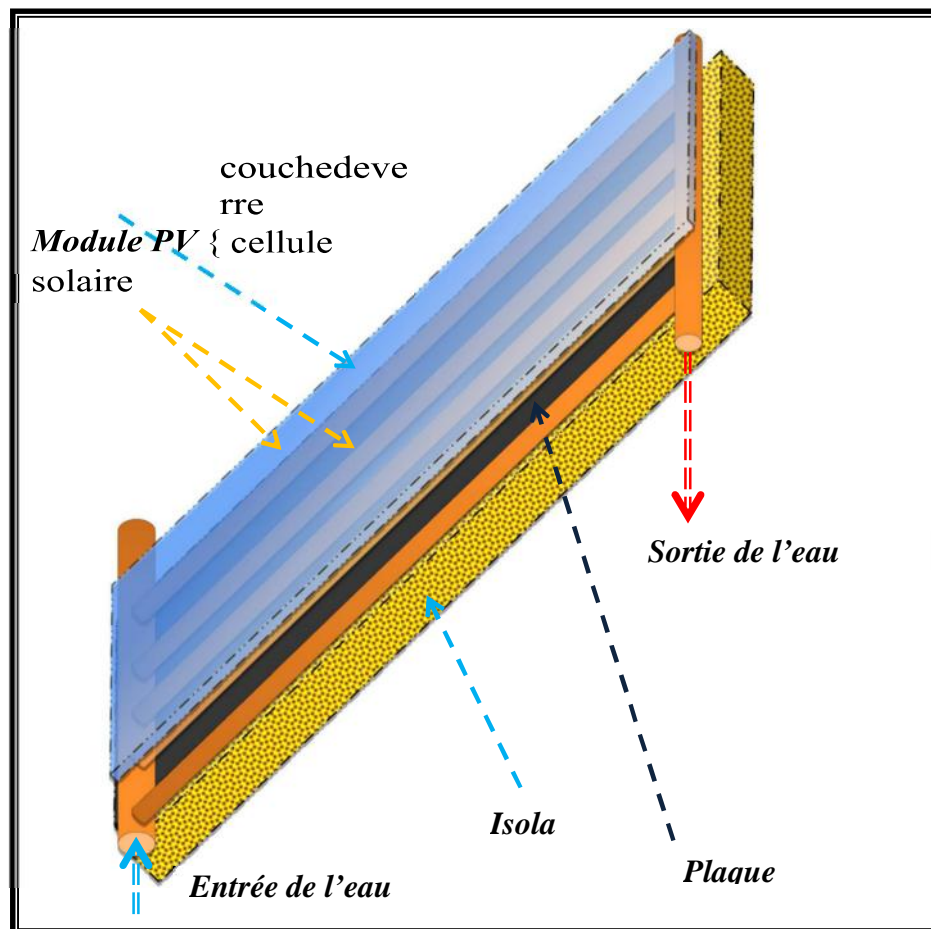


Figure II.1 : Conception du capteur PVT

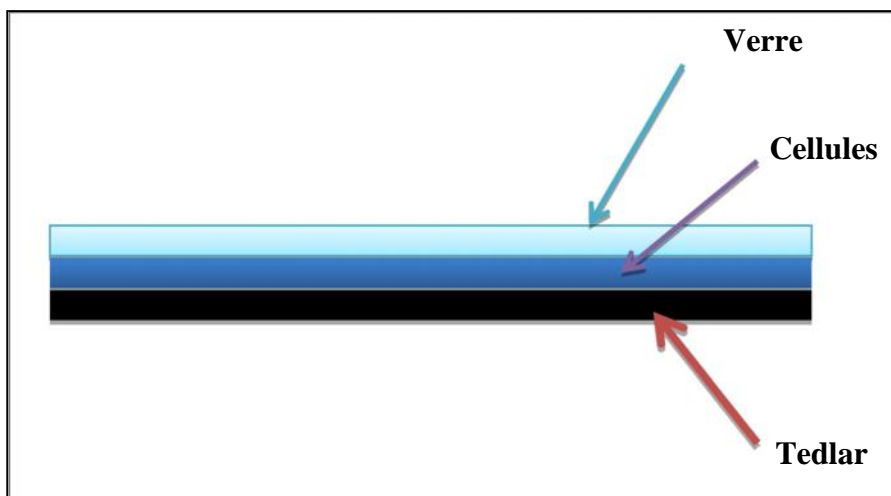
## II-2- Éléments de constructions et principe

Les éléments essentiels sont :

- ❖ Le vitrage
- ❖ Le panneau photovoltaïque
- ❖ La plaque absorbante
- ❖ Le fluide caloporteur
- ❖ L'isolant

### A- Le panneau photovoltaïque

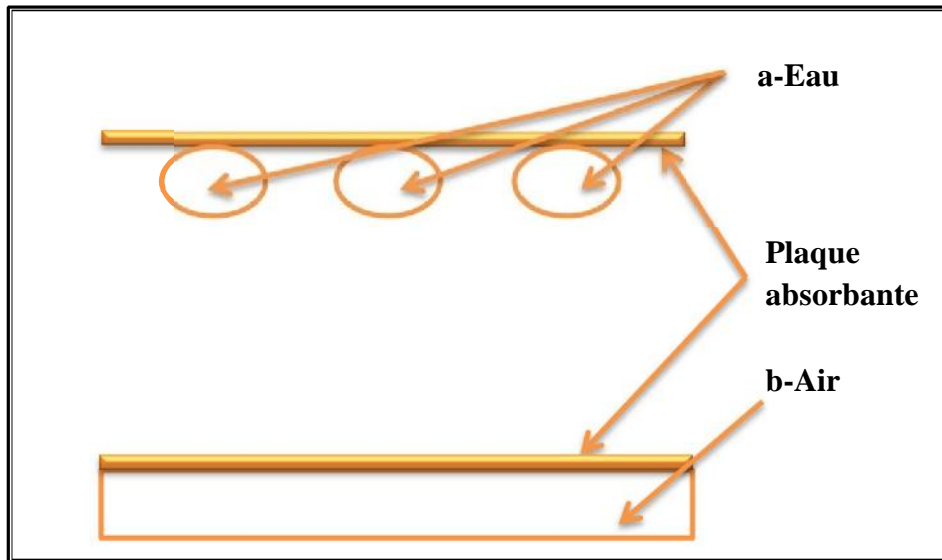
Le rôle du panneau photovoltaïque est de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique, il se compose de trois couches : la première c'est une couche du verre qui est la face exposée au rayonnement incident, la deuxième couche qui contenant les cellules photovoltaïques et la troisième couche protectrice qui est le tedlar. la **Figure 2-1**-suivante présente ces trois couches de PV



**Figure II-2 : Vu des trois couches de panneau photovoltaïque**

### B- Fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise un fluide caloporteur soit l'eau, soit l'air.



**Figure II.2 : Schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur : a) à eau. b) à air.**

### C- Solvant :

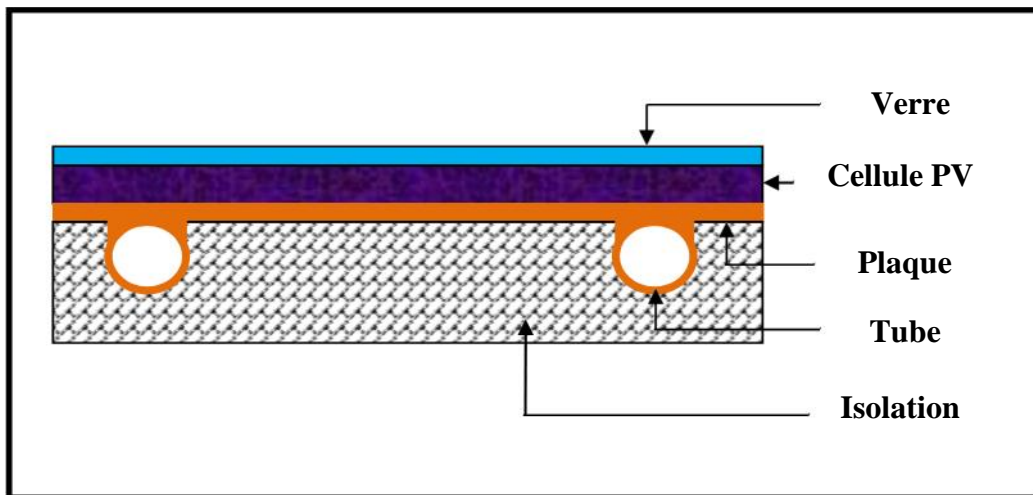
Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolant, le tableau suivant regroupe les principales propriétés thermiques, de quelques matériaux isolants.

**Tableau II.1 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants**

Matériau	(W/m.k)	(kg/m <sup>3</sup> )	Cp (j/kg.k)	a= ( / . Cp) (m <sup>2</sup> /s)
Polystyrène expansé	0.040	20	1500	13.3
Laine (vêtement)	0.040	450	1880	0.47

### II.3 Modèle thermique d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique :

Les modèles théoriques servent à calculer (prédire) la production thermique des capteurs hybrides, ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride. On considère le capteur hybride de la figure suivante constitué du capteur photovoltaïque logé dans une enceinte métallique qui englobe l'isolation thermique



**Figure II.3 : Modèle d'un capteur hybride PVT**

La **Figure II.4** : Montre le schéma électrique équivalent du capteur hybride où figurent les énergies absorbées ou produites par le capteur

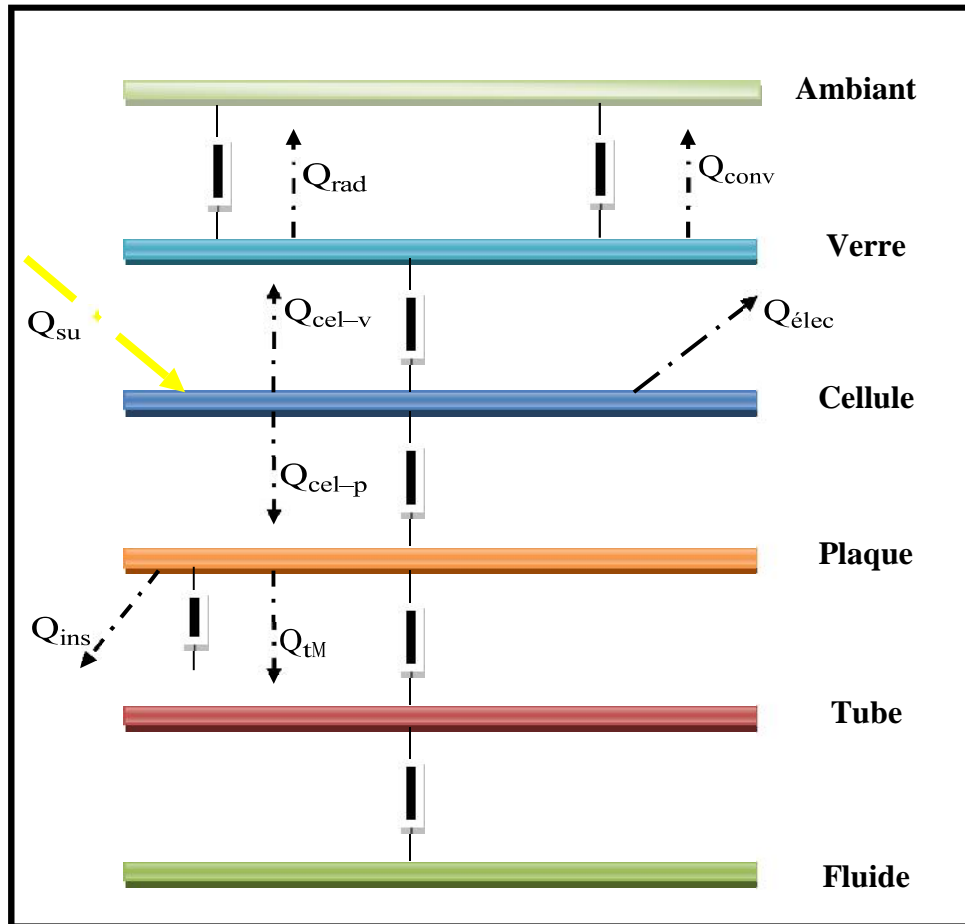


Figure II.4 : Schéma électrique équivalent du capteur hybride

### II.4 Principe de l'étude thermique d'un PVT

Le but de l'étude, est de prévoir les températures dans chaque couche du capteur PVT, Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivante :

**La variation de l'énergie interne = l'énergie reçue – l'énergie perdue**

Ou encore sous forme mathématique, Considérons une section quelconque du système à l'instant  $t$ .

Le bilan au nœud  $i$  donne :

$$M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_i Q_i - \sum_s Q_s \dots \dots (II.1)$$

$M_i$ : Masse du nœud  $i$

$C_i$ : La chaleur spécifique du nœud  $i$

$dt$  : Pas de temps.

#### II.4 Bilan énergétique du capteur hybride PVT

Le capteur étudié est un modèle de 9 nœuds. Les différents nœuds du ce capteur solaire sont indiqués sur la figure suivante :

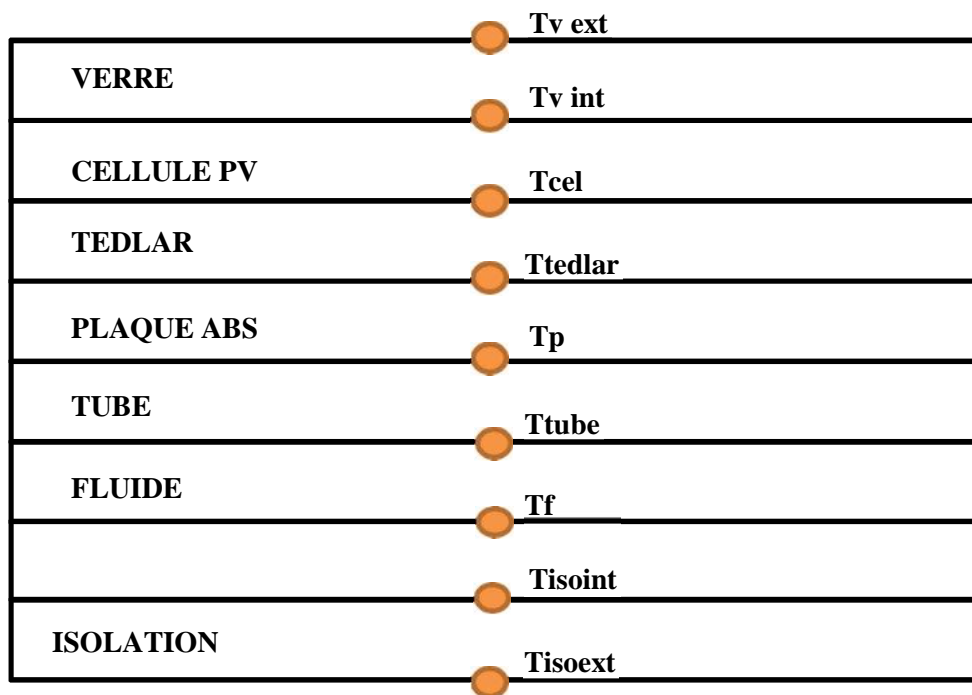


Figure II.5 : Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds



L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit

$$Q_{sun} = A_{verre} G \tau_{verre} \alpha_{cel} \dots \dots \dots (II-2)$$

- $A_{verre}$  : Surface du verre ( $m^2$ )
- $G$  : Rayonnement directe totale absorbée par la cellule solaire ( $W/m^2$ )
- $\tau_{verre}$  : Transmittivité du verre
- $\alpha_{cel}$  : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire

Puisque le verre est opaque par rapport aux rayonnements émis par les cellules, la surface du verre devient une surface émettrice, les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit:

$$Q_{radv-\alpha} = \sigma_v A_{verre} (T_v^4 - T_{ciel}^4) \dots \dots (II-3)$$

- $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann en ( $W/m^2 K^4$ )
- $\sigma_v$  : Emissivité du verre
- $A_v$  : Surface du verre en ( $m^2$ )

$$T_{ciel} = 0.0552 (T_a)^{1.5} \dots \dots \dots (II.4)$$

Nous avons exprimé les pertes thermiques par convection par l'équation de transfert de chaleur entre le verre du capteur hybride et le milieu extérieur comme suit :

$$Q_{convv-\alpha} = h_{c,\alpha} A_v (T_v - T_a) \dots \dots \dots (II.5)$$

Avec :

$T_v$ : Température du verre du capteur hybride (K)

$T_a$ : Température ambiante (K)

$h_{c,a}$ : Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en ( $W/m^2K$ ), il est donné par l'expression suivante :

$$h_{c,\alpha} = 2.8 + 3.0 V_{vent} \dots \dots (II.6)$$

➤ Pour la face extérieure du verre :

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face extérieur est comme suit :

$$M_v c_v \frac{dT_{vext}}{dt} = Q_{sun} - Q_{radv-ciel} - Q_{convv-\alpha} - Q_{condv} \dots\dots\dots( II .7)$$

$$M_v c_v \frac{dT_{vext}}{dt} = A_v G - \sigma \epsilon_v A_v (T_{vext}^4 - T_{ciel}^4) - h_{c,\alpha} A_v (T_{vext} - T_\alpha) - h_{condv} A_v (T_{vext} - T_{vint})$$

$$h_{condv} = \frac{\lambda_v}{\delta_v} \dots\dots\dots( II .8)$$

$\lambda_v$  : La conductivité thermique du verre

$\delta_v$  : L'épaisseur de verre

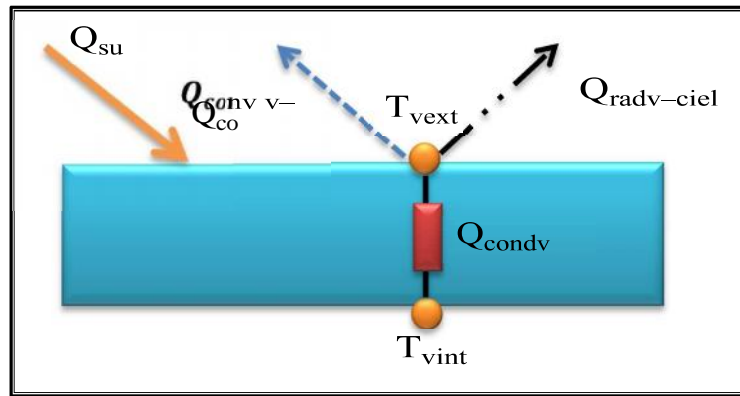


Figure II -6-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure

➤ Pour la face intérieure du verre:

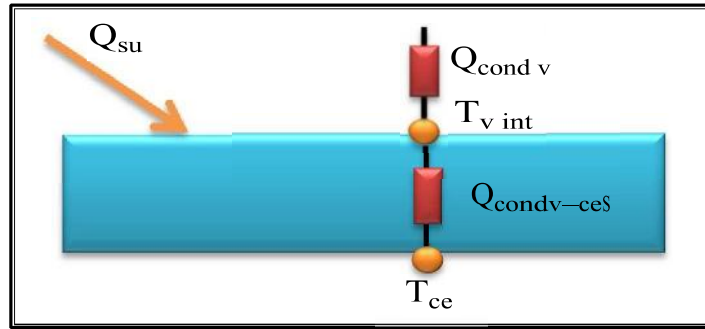
L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face intérieur est comme suit:

$$M_v c_v \frac{dT_{vint}}{dt} = Q_{sun} + Q_{condv} - Q_{convdv-cel} \dots\dots\dots( II .9)$$

$$M_v c_v \frac{dT_{vint}}{dt} = A_v G \tau_{verre} + h_{condv} A_v (T_{vext} - T_{vint}) - h_{condv-cel} A_v (T_{vint} - T_{cel})$$

$$h_{condv-cel} = \frac{\lambda_{cel}}{\delta_{cel}} \dots\dots\dots( II .10)$$

- $\lambda_{cel}$  : La conductivité thermique du verre
- $\delta_{cel}$  : L'épaisseur de verre



Figur II -7-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure

➤ Pour la cellule solaire:

L'équation de l'énergie au niveau de la cellule photovoltaïque est comme suit :

$$M_{cel}C_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} = A_{verre}G\tau_{verre}\alpha_{cel} + Q_{convdv-cel} - Q_{convdcel-ted} - Q_{ele} \dots\dots(II.11)$$

$$M_{cel}C_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} = A_v G\tau_{verre}\alpha_{cel} + h_{condv-cel}A_v (T_{vint} - T_{cel}) - h_{condcel-ted}A_{cel} (T_{cel} - T_{ted}) - Q_{ele}$$

$$h_{condcel} = \frac{\lambda_{cel}}{\delta_{cel}} \dots\dots\dots( II.12)$$

$$h_{condcel-ted} = \frac{\lambda_{ted}}{\delta_{ted}} \dots\dots\dots( II.13)$$

$$Q_{ele} = \frac{Q_{sun}}{\alpha_{cel}} \eta_{ref} e^{(\beta(T_{cel}-T_{ref}))} \dots\dots\dots (II.14)$$

$\eta_{ref}$ : Est le rendement de référence est mesuré pour une température de référenc

$T_{ref}$  : prise à égale 25°C

$\beta$  : Le coefficient de température qui représente la relation le rendement de la cellule solaire et température ( environ 0.004 pour une cellule solaire ou silicim

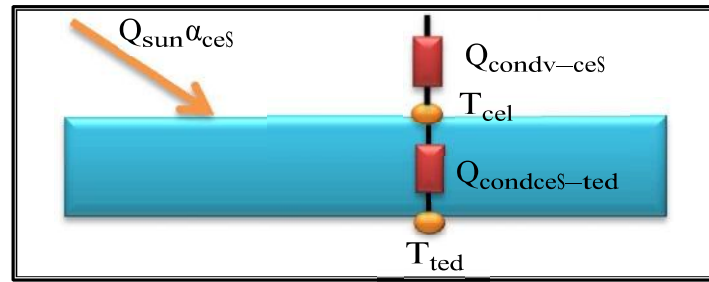


Figure II -8 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la Cellule photovoltaïque

➤ Pour la couche de Tedlar:

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de Tedlar est donnée comme suit :

$$M_{ted}c_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = Q_{condcel-ted} - Q_{condted-p} \dots\dots\dots( II .15)$$

$$M_{ted}c_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = h_{condted}A_{ted} ( T_{cel} - T_{ted} ) - h_{condted-p}A_{ted} ( T_{ted} - T_p )$$

$$h_{condted} = \frac{\lambda_{ted}}{\delta_{ted}} \dots\dots\dots( II .16)$$

$$h_{condted-p} = 2 \frac{\lambda_p}{\delta_p} \dots\dots\dots( II .17)$$

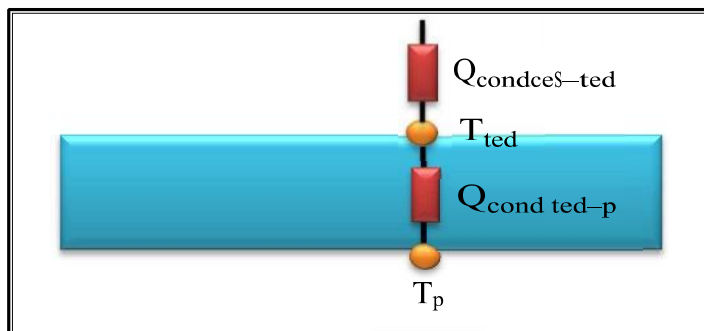


Figure II -9: Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar

□ Au niveau de la plaque absorbante

La figure II.10-a: permet d'observer que chaque élément du tube reçoit un apport d'énergie par chacun de ses côtés.

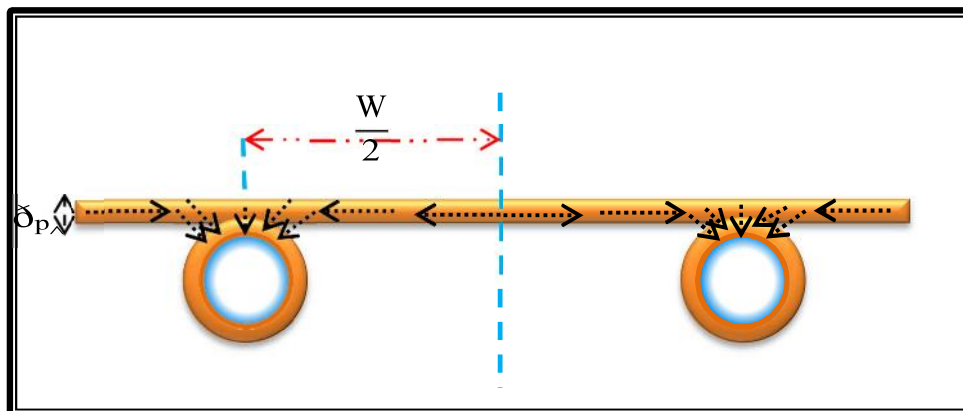


Figure 2-10-a: Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante

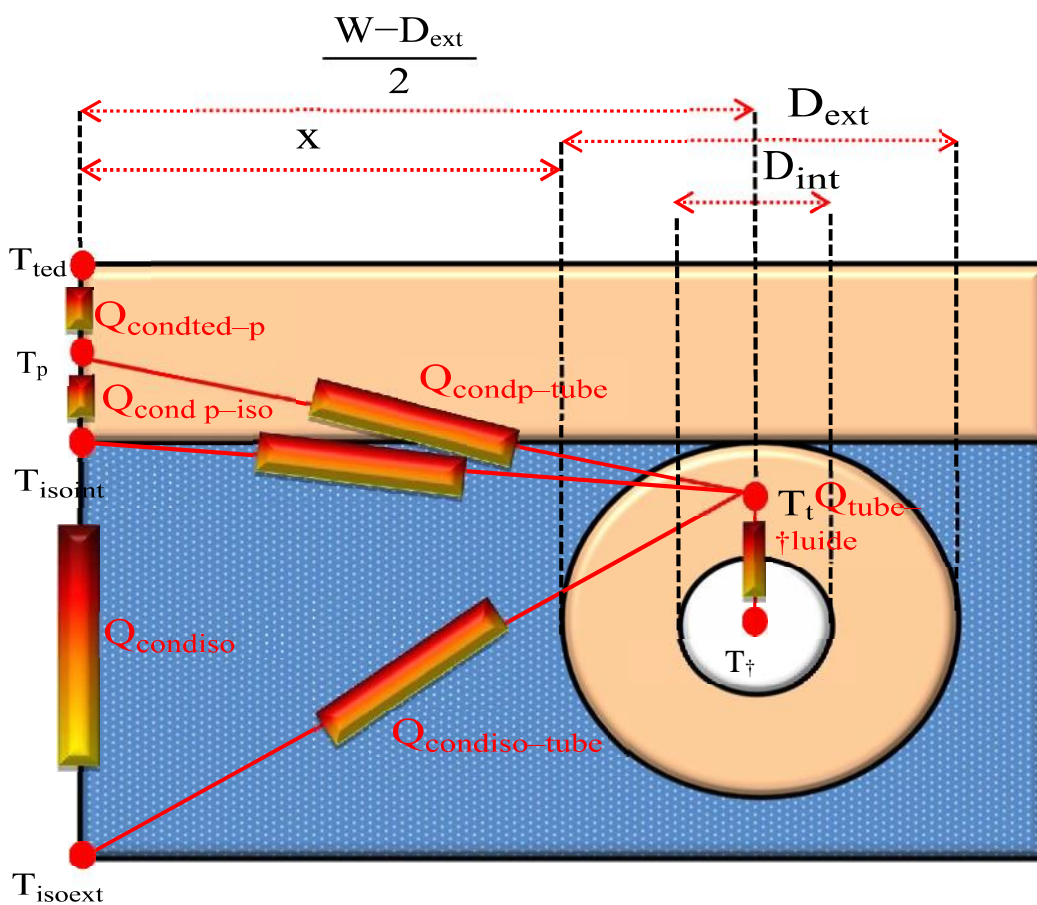


Figure II -10-b: Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de la plaque absorbante est donnée comme suit :

$$M_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_{condted-p} - Q_{condp-tube} - Q_{convdp-iso} \dots\dots\dots(II.18)$$

$$M_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{condted-p} (T_{ted} - T_p) - A_{p-tube} h_{condp-tube} (T_p - T_t) - A_{p-iso} h_{condp-iso} (T_p - T_{isoext}) \dots\dots\dots(II.19)$$

La surface de contact entre le tube et la plaque absorbante c'est :

$$A_{p-tube} = A_p \frac{W - D_{ext}}{W} \dots\dots\dots(II.20)$$

La surface de contact entre la plaque absorbante et l'isolant, face intérieure est :

$$A_{p-iso} = A_p \left( 1 - \frac{W - D_{ext}}{W} \right) \dots\dots\dots(II.21)$$

$$h_{condp-tube} = \frac{1}{2 \left( \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\left( \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} \right)}{\lambda_p} \right)} \dots\dots\dots(II.22)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par conduction entre la plaque absorbante et l'isolant, face intérieure est:

$$h_{condp-iso} = 2 \frac{\lambda_p}{\delta_p} \dots\dots\dots(II.23)$$

➤ **Au niveau du tube:**

L'équation de l'énergie au niveau du tube est donnée comme suit :

$$M_t c_t \frac{dT_t}{dt} = Q_{condp-tube} - Q_{convtube-fluide} - Q_{condtube-iso} \dots\dots\dots(II.24)$$

$$M_t c_t \frac{dT_t}{dt} = A_{p-tube} h_{condp-tube} (T_p - T_t) - A_{fluide} h_{convtube-fluide} (T_t - T_f) - A_{iso-tube} h_{condtube-iso} (T_t - T_{isoext}) \dots\dots\dots(II.25)$$

Nous avons considéré que la surface de contact entre le tube et l'isolant est :

$$A_{iso-tube} = \frac{D_{ext}}{2} \pi L \dots\dots\dots(II.26)$$

$$A_{fluide} = \frac{D_{int}^2}{2} \pi \dots\dots\dots(II.27)$$

Le :  $h_{convt-f}$  est le coefficient de transfert de chaleur de convection entre le fluide et le mur de tube.

Pour l'écoulement de l'eau dans le tube :

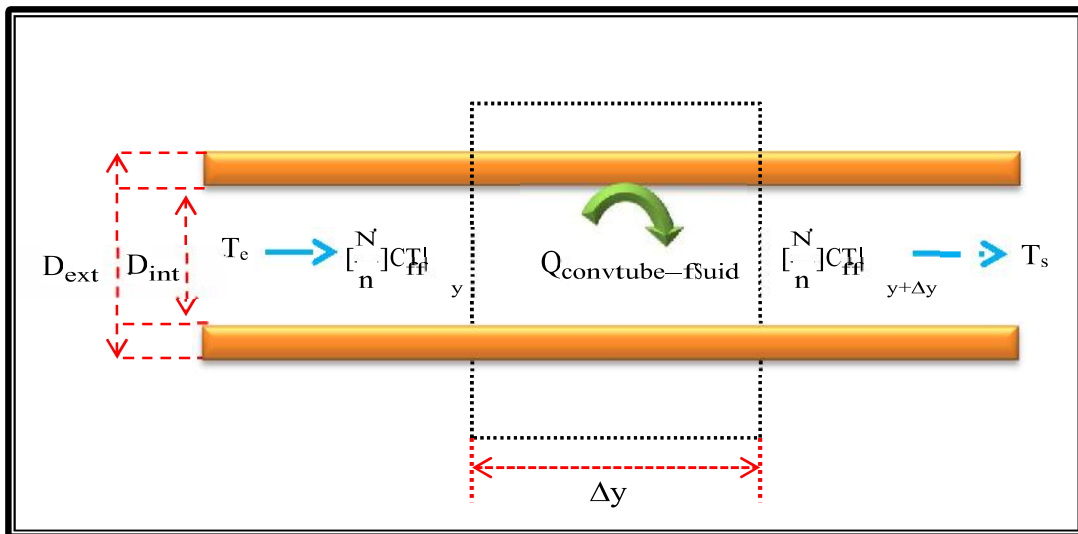
$$Nu = \frac{h_{convt-f} D_h}{\lambda_f} \dots\dots\dots (II .28)$$

$$D_u = \frac{4A_{fluide}}{p}$$

p: est le périmètre du tube

➤ **Pour le fluide caloporteur:**

La distribution de la température dans le sens d'écoulement du fluide, si on considère que le fluide a une température d'entrée  $T_e$  et une température de sortie  $T_c$ , et les diamètres extérieur et intérieur du tube sont respectivement  $D_{ext}$  et  $D_{int}$ , pour un segment de l'eau dans le tuyau de communication (**figure II.11**) :



**Figure II -11- Ecoulement du fluide dans un tube**

L'équation de l'énergie pour le fluide caloporteur est donnée comme suit :

$$M_f c_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{convtube-fluide} + Q_{th} \dots\dots( II .29)$$

$$M_f c_f \frac{dT_f}{dt} = A_{fluide} h_{convtube-fluide} (T_t - T_f) + nWF S - U_{p\alpha} (T_f - T_\alpha) ] \dots\dots\dots( II. 30)$$

$$S = \left( \tau_{verre} \alpha_{cel} \left( \frac{\eta_{ref} A_{cel}}{A_{capteur}} \right) \right) G$$

➤ Pour la couche d'isolant

L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant ; face intérieure est donnée par :

$$M_{iso} c_{iso} \frac{dT_{iso\text{int}}}{dt} = Q_{condp-iso} - Q_{condiso} \dots\dots\dots( II.31)$$

$$M_{iso} c_{iso} \frac{dT_{iso\text{int}}}{dt} = A_{p-iso} h_{condp-iso} (T_p - T_{iso\text{int}}) - h_{condiso} A_{iso} (T_{iso\text{int}} - T_{iso\text{ext}}) \dots\dots\dots( II .32)$$

$$h_{condiso} = \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}$$

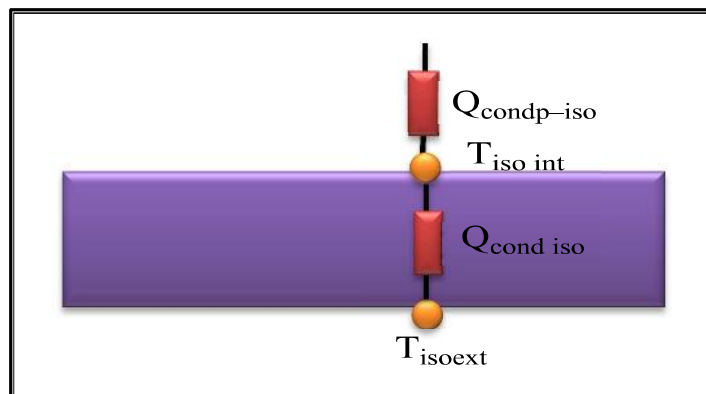


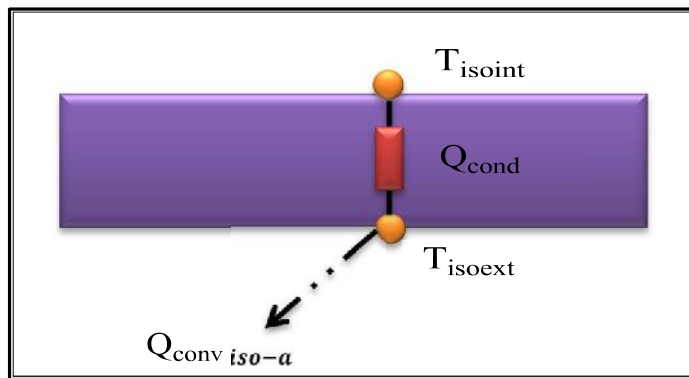
Figure II -12: Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face intérieure



L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant ; face extérieure est donnée par :

$$M_{iso}c_{iso} \frac{dT_{isoext}}{dt} = Q_{condtube-iso} + Q_{condiso} - Q_{condiso-\alpha} \dots\dots\dots( II .33)$$

$$M_{iso}c_{iso} \frac{dT_{isoext}}{dt} = A_{iso-tube}h_{condtube-iso} (T_t - T_{isoext}) + h_{condiso}A_{iso} (T_{isoint} - T_{isoext}) - h_{conviso-\alpha}A_{iso}(T_{isoext} - T_{\alpha}) \dots\dots\dots( II .34)$$



**Figure II -13:Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face extérieure**

Le gain utile de la chaleur peut être calculé comme suit :

$$Q_{util} = A_{capteur}F_R ( (\tau\alpha)_{PV}G - U_{p-a}(T_e - T_a) ) \dots\dots\dots( II .35)$$

Dans cette équation le gain utile de la chaleur  $Q_{util}$  est représenté en fonction du surface de capteur  $A_{capteur}$ , du facteur d'extraction de la chaleur  $F_R$ , du produit de Transmittivité-absorptivité des cellules photovoltaïques  $(\tau\alpha)_{PV}$ , du rayonnement solaire  $G$ , du coefficient de perte de chaleur de capteur  $U_{p-a}$  qu'on va expliquer par la suite, et de la différence du température entre le température de refroidissement  $T_e$  et la température ambiante  $T_a$ .

Le facteur d'extraction de la chaleur  $F_R$  c'est la proportion du gain réel de l'énergie utile du collecteur au maximum du gain utile possible si la surface du collecteur entière était à la température d'entrée du fluide, il peut être calculé comme suit :

$$F_R = \frac{N c_f}{A_{capteur}U_{p-a}} \left( 1 - \exp\left( \frac{-A_{capteur}U_{p-a}F^u}{N c_f} \right) \right) \dots\dots\dots( II .36)$$

L'efficacité corrigée d'ailette  $F^u$  peut être calculée comme suit :

$$F' = \frac{\frac{1}{U_{p-a}}}{\frac{1}{W} + \frac{1}{U_{p-a} D_{ext}} + \frac{1}{W - D_{ext} F} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_{convv-f}}} \dots\dots\dots(\text{II .37})$$

Avec :

$$F = \frac{\tanh m \frac{W - D_{ext}}{2}}{m \frac{W - D_{ext}}{2}} \dots\dots\dots(\text{II .38})$$

Cette équation détermine l'efficacité du secteur à ailette entre les tubes adjacents en tenant compte de l'influence du lancement de tube  $W$  et du diamètre extérieur de tube  $D_{est}$  .

Le coefficient global de perte de chaleur  $U_{p-a}$  du capteur représente la somme des pertes vers l'avant du capteur et extérieur du bord, dans cette équation on l'on supposé que le coefficient de perte vers l'avant  $U_{top}$ , pourrait être calculé en utilisant l'équation empirique de Klein comme donné par **Duffie et Beckman (2006)**:

$$U_{top} = \frac{1}{\frac{c}{T_{pm}} \frac{T_{pm} - T_a}{N - f} e^{+h_{convv-a}}} + \frac{\sigma T_{pm} + T_a}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591 N h_{convv-a}} + \frac{T_{pm}^2 - T_a^2}{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p - N}} \frac{T_{pm}^2 - T_a^2}{\varepsilon_v} \dots\dots\dots(\text{II .39})$$

$$C = 520 - 0.000051 \beta^2 \dots\dots\dots(\text{II .40})$$

$$f = 1 + 0.089 h_{convv-a} - 0.1166 h_{convv-a} \varepsilon_p \frac{1}{1 + 0.07866 N} \dots\dots\dots e = 0.430 \frac{1}{1 - \frac{100}{T_{pm}}} \dots\dots\dots(\text{II .42})$$

$\beta$  Est l'inclinaison du capteur,  $a$  est la constante de Stefan-Boltzmann,  $N$  est le nombre de couvertures ou de couches de verre,  $\varepsilon_v$  l'émissivité de la couverture ou de verre,  $\varepsilon_p$  l'émissivité du plaque et  $\square_{convv-a}$  est le transfert thermique de convection dû au vent.

$$U_b = \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \dots\dots\dots(\text{II .43})$$

### II.6 Performances thermiques des capteurs hybrides

Les paramètres nécessaires pour la détermination des performances thermiques du capteur hybride sont la température d'entrée et de sortie, la température ambiante et le volume de fluide qui coule à travers le capteur, ainsi que l'irradiation solaire et la vitesse du vent.

Comme pour les capteurs solaires thermiques, le rendement thermique d'un capteur hybride est exprimé en fonction de la température réduite  $T$  telle que :

$$T = \frac{(T_e - T_a)}{G} \dots\dots\dots (II.44)$$

Pour calculer l'énergie utile fournie par le capteur hybride on va utiliser la même équation pour le cas d'un capteur thermique plan une modification simple car en fait une partie du rayonnement absorbé est convertie en énergie électrique, l'énergie utile est donc:

$$q_{util} = A F_R \tau \alpha G - U_L T_e - T_a \dots\dots\dots (II.45)$$

Telle que  $\tau$  est le facteur d'absorptivité [58] exprimé par :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_{eau} (T_s - T_e)}{A G} \dots\dots\dots (II.46)$$

Le facteur d'absorptivité d'un capteur solaire thermique est plus grand que celui d'un capteur hybride à cause de la présence d'une couche sélective sur l'absorbeur du capteur solaire thermique. Une telle couche n'est pas présente au surface du capteur hybride.

Le rendement thermique du capteur hybride est déterminé expérimentalement par la formule suivante :

## II.7 Résolution numérique du système

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes et des paramètres internes :

- Les températures au niveau de chaque couche du composant du capteur
- L'efficacité globale thermique et électrique du capteur

La résolution du système est effectuée par la méthode de **RK4**

### II.7.1 Méthode de Range-Kutta:

La méthode de Runge-Kutta est une méthode d'analyse numérique d'approximation de solution d'équation différentielle 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.

Considérons le problème suivant :

$$T' = f(t, T), T(t_0) = T_0$$

La méthode RK4 est donnée par l'équation :

$$T_{n+1} = T_n + \frac{1}{6} k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4$$

Où

$$\begin{aligned} k_1 &= f(t_n, T_n) \\ k_2 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{h}{2}k_1\right) \\ k_3 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{h}{2}k_2\right) \\ k_4 &= f(t_n + h, T_n + hk_3) \end{aligned}$$

L'idée est que la valeur suivante ( $T_{n+1}$ ) est approchée par la somme de la valeur actuelle ( $T_n$ ) et du produit de la taille de l'intervalle ( $h$ ) par la pente estimée.

Nous supposons connues, les températures des différents nœuds à l'instant initial, et avec l'algorithme de calcul (**organigramme**),

Nous obtenons un système d'équations, dont la résolution permet de calculer nos inconnues.

## II.7.2 Traitement informatique

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes:

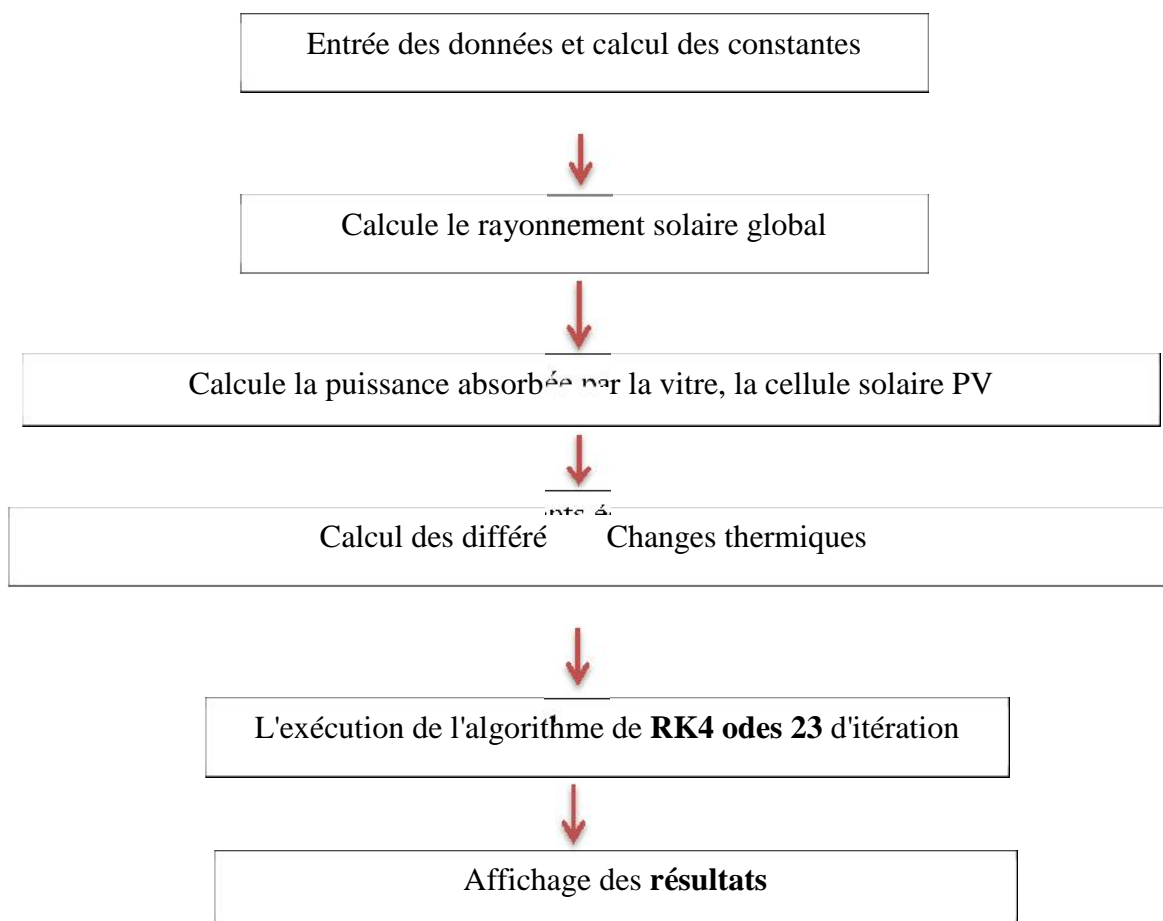
- Entrée des données et calcul des constantes.
- la température ambiante.
- Calcul le rayonnement solaire global.
- Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir:
  - 1) Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers les composants du module PV, l'absorbeur, et l'isolant.
  - 2) Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- Nous supposons au départ que chaque composant du capteur est à la température ambiante  $T_a$ ,
- Calcul de coefficient d'échange thermique par rayonnement entre:
  - La vitre (côté extérieur) et l'ambiance.
- Calcul les coefficients d'échange thermique par convection entre:
  - a. La vitre (côté extérieur) et l'ambiance.

b. Le tube et le fluide caloporteur.

- Calcul des coefficients d'échange thermique par conduction entre les différentes couches du PVT.
- L'exécution de l'algorithme de **RK4** d'itération.

Toutes ces étapes sont représentées dans l'organigramme qui suit. Le programme principal a été développé en **MATLAB 6**.

### II.7.3 Organigramme :



### II.8 Conclusion

La modélisation numérique du capteur hybride de la nouvelle configuration a été présentée dans ce chapitre. Nous avons commencé par une étude théorique qui a permis la détermination du profil de température dans les différentes couches du capteur et les puissances thermiques et électriques produites ainsi que les rendements thermiques et électriques.

# ***CHAPITRE 3***

***Etude expérimentale***

***d'un capteur PVT***

## ***Chapitre III***

### ***Etude expérimentale d'un capteur PVT***

#### **III.1 Introduction**

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de notre étude expérimentale et analysons les données. L'étude comparative des performances électriques et thermiques du notre capteur sont comparés avec celles du capteur photovoltaïque classique.

On va analyser et interpréter les résultats obtenus pour les mesures relevées dans les jours de tests.

#### **III.2 Description du système PV/T**

Nous avons réalisé par Monsieur R. MAOUDJ un prototype, un capteur hybride photovoltaïque-thermique a l'équipe de Potentialité Energétique Solaire et Eolienne EPSE a l'Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien.

Ce capteur hybride de nouvelle conception est constitué essentiellement d'un module photovoltaïque de type Isophoton I-75/12 en technologie monocristallin et une vitre avec une épaisseur de 4 mm collée au-dessous du module photovoltaïque.

Un fluide caloporteur l'eau peut circuler à l'intérieur entre la face arrière du panneau photovoltaïque et la vitre pour l'extraction de la chaleur absorbée par les cellules solaires.

##### **III.2.1 Description technique du système PV/T**

- o Panneau photovoltaïque Isophoton I-75/12 .
- o Boite de jonction qui contient les deux pôles (+ et le -).
- o Une plaque de verre est collée dans le cadre (en acier) du panneau par la silicone.
- o Circuit hydraulique qui assure l'entrée et la sortie du fluide caloporteur entre la face arrière du Panneau photovoltaïque et la vitre au-dessous du module.

##### **III.2.2 Dimensions du capteur solaire hybride PV/T**

On présente les dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude :

##### **Dimensions du capteur solaire hybride PV/T :**

Longueur 1224,0 mm

Largeur 545.0 mm

Epaisseur 39.5 mm

#### **III.3 Banc d'essai**

L'étude expérimentale a pour but de déterminer l'influence de la température sur la puissance électrique produite par le panneau PV constituant le capteur hybride. Pour cela, nous avons utilisé deux panneaux PV de mêmes caractéristiques montées sur une seule structure, le premier panneau

est utilisé comme un témoin et le deuxième panneau PV pour réaliser le capteur hybride et nous avons étudié le comportement de l'ensemble.



**Figure III.1 : Photo du prototype de capteur PV/T étudié (URERMS Adrar)**

#### **Carte technique du panneau photovoltaïque :**

##### **Caractéristiques électriques**

Puissance maximale  $P_{max}$  (Wc) 75

Courant de court-circuit  $I_{cc}$  (A). 4,67

Tension en circuit ouvert  $V_{oc}$  (V) 21,6

Courant Optimum  $I_{op}(A)$  4,34

Courant Optimum  $I_{op}(A)$  17,3

##### **Coefficients de température**

Coefficient de la variation du courant en fonction de la température  $0.06 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$

Coefficient de la variation de la tension en fonction de la température  $0.36 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$

##### **Caractéristiques mécaniques**

Type de cellules monocristallin

Nombre de cellules 36



Dimensions 1224,0 × 545.0 × 39.5mm

Poids 9,0 kg

### III.4 Caractéristiques géographique et météorologique du site d'Adrar :

#### Données géographiques du site d'Adrar

Site Longitude 17'

Latitude 27° 49'

Altitude 263 m

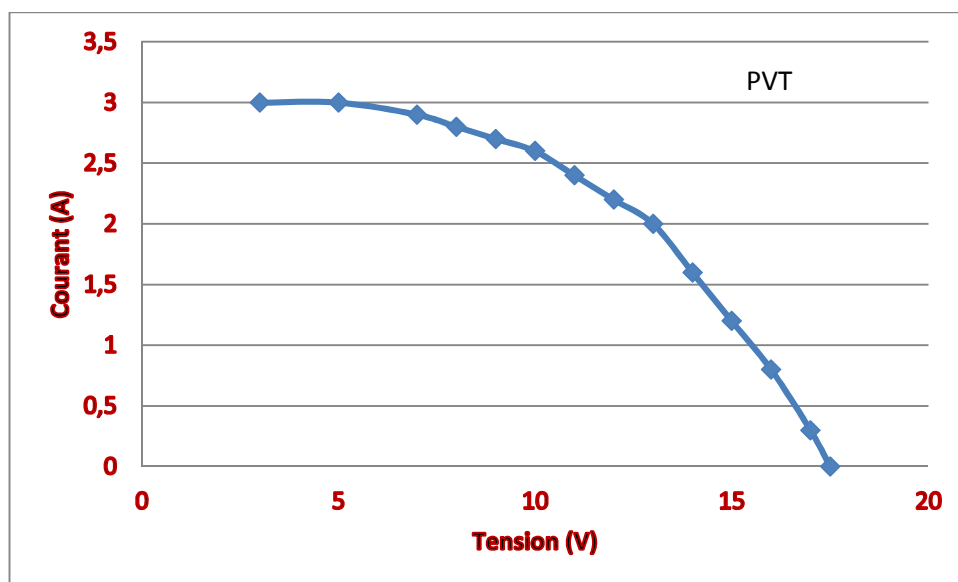
Situation topographique Adrar 27° 49' N 00° 17' W 263 Sahara

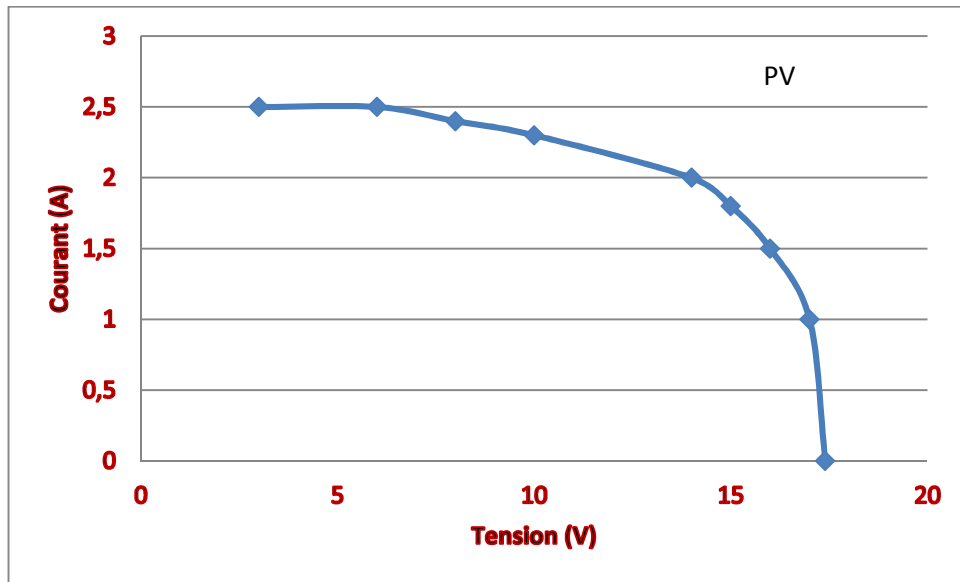
### III.5 Résultats et Discussions

#### III.5.1 La variation de l'éclairement globale

L'éclairement globale pendant les journées de l'acquisition varie de 0 W/m<sup>2</sup> la matinée jusqu'à environ 1000 W/m<sup>2</sup> vers midi TSV d'après les mesures de la station météorologique installée au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables d'Adrar, Ces données sont enregistrées durant les journées typiques. Les données seront importantes et utilisables pour notre étude.

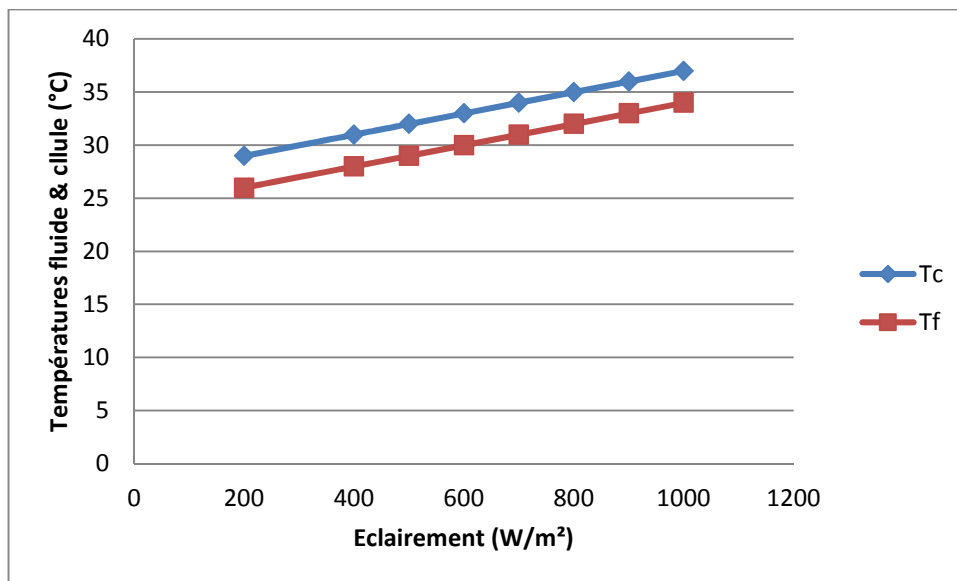
Le débit de l'eau (fluide caloporteur) à l'entrée du capteur PV-T n'est pas stable qui a créé un problème dans le refroidissement du panneau.



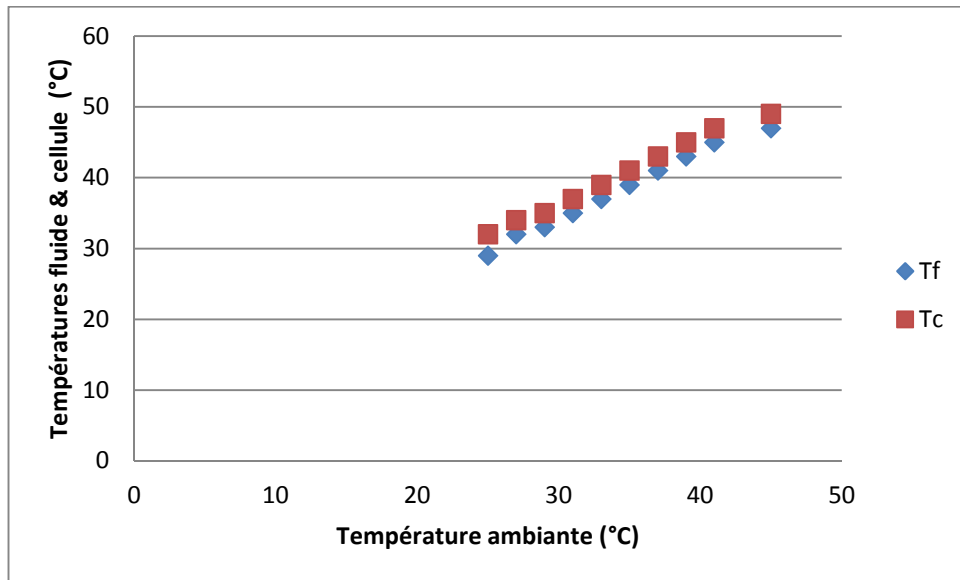


**Figure III.2 : Caractéristiques I-V du système PVT et de témoin PV**

En remarque que la puissance produite du panneau PV du capteur PV-T est supérieure à celle du panneau PV1.

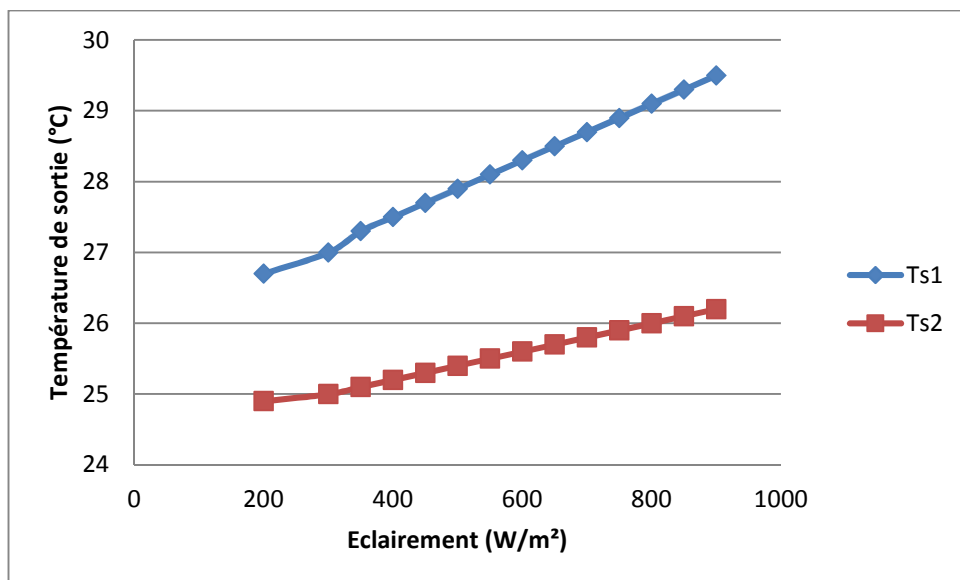


**Figure III.3: Variation des températures de fluide et de la cellule en fonction de l'éclairement**



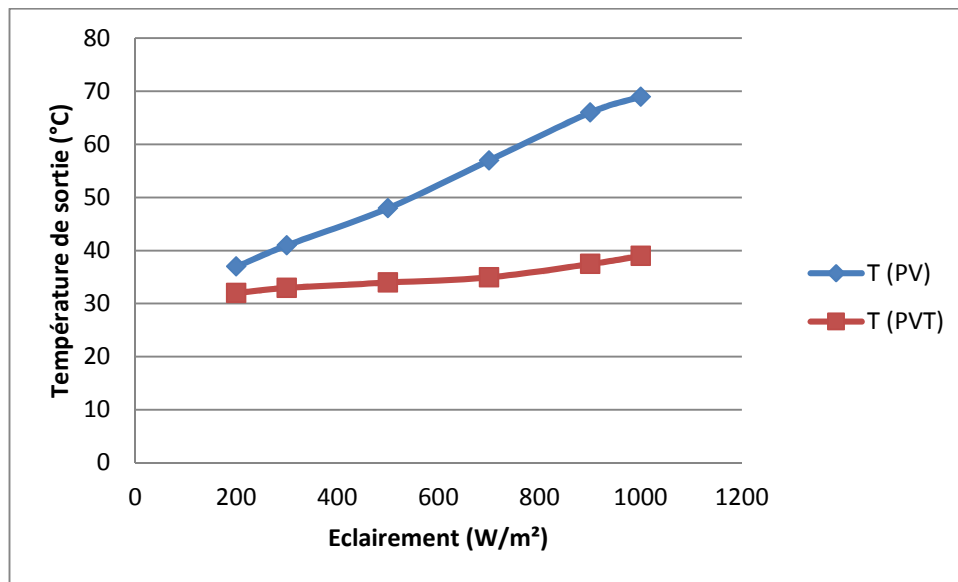
**Figure III.4 : Variation des différentes températures en fonction de la température ambiante**

L'ajout d'une vitre supplémentaire au-dessus du capteur peut provoquer une augmentation de la température de toutes les couches, car la vitre ajoutée engendre un effet de serre entre la vitre et la face arrière du capteur PV-T, ce qui a eu pour effet une augmentation des températures.



**Figure III.5 : Effet de radiation solaire dans la température de sortie pour différentes valeurs de débit massique (Débit 2 > Débit1)**

La température du fluide à la sortie diminue en fonction du débit massique et sa valeur augmente avec l'augmentation du rayonnement



**Figure III.6 : Température de la cellule solaire en fonction de l'éclairement**

Dans la figure III.6, on remarque que la température de la cellule dans le cas d'un module PV est plus élevée que celle dans le cas d'un capteur hybride PVT qui assure le refroidissement des modules PV. Et par conséquent, on trouve que le rendement électrique dans le cas d'un capteur hybride PVT est plus élevé que celui dans le cas d'un module PV

### III.6 Conclusion

Nous avons proposé un système de cogénération basé sur les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques destiné à approvisionner en énergie électrique et thermique et aussi une solution pour diminuer la température du panneau PV et l'amélioration de leur rendement. En remarque que :

- L'ajout d'une vitre supplémentaire au-dessus du capteur provoque une augmentation de la température de toutes les couches.
- La puissance produite par le capteur PVT est supérieure à celle du panneau PV.

Les résultats obtenus permettent de penser que le système de cogénération à base des nouveaux capteurs hybrides PVT constitue un système énergétique complet pour l'alimentation en énergies électrique et thermique.

# *Conclusion Générale*

### Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié le capteur hybride PV-T expérimentalement à travers l'étude d'un prototype à l'unité de recherche URER-MS. Adrar. Le système PVT est constitué par un panneau photovoltaïque de type (Isophoton I-75/12).

Le but principal de ce travail était l'étude de l'influence de la température sur les performances du panneau photovoltaïque du capteur PV-T. Les résultats obtenus montrent que le capteur hybride PV-T constitue une bonne solution aux capteurs photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques séparément installés.

En remarque que :

- L'ajout d'une vitre supplémentaire au-dessus du capteur a provoqué une augmentation de la température de toutes les couches.

- La puissance produite du panneau PV du capteur PV-T est supérieure à celle du panneau PV1.

Les résultats trouvés expérimentalement montrent l'avantage du système PV-T et l'influence du refroidissement sur les caractéristiques thermiques et électriques du panneau constituant le capteur hybride et l'augmentation de leur production et de leurs efficacité globale.

Les travaux futurs qui pourraient être envisagés à partir des résultats obtenus de cette recherche sont :

- Etude de l'influence du débit (débit stable et débit libre) d'eau à l'entrée du capteur PV-T.

- Etude théorique, modélisation et expérimentation d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique PVT avec le refroidissement par un fluide caloporteur qui circule dans tuyauterie sous forme de serpentin.

Les conclusions qui peuvent être tirées de ce qui précède dans cette étude sont :

- Fournir un refroidissement approprié des cellules d'un panneau photovoltaïque peut obtenir des augmentations remarquables de la puissance électrique générée par eux.
- C'est l'installation d'un absorbeur de chaleur dans le panneau solaire photovoltaïque, vous pouvez obtenir de l'eau chaude, avec une efficacité suffisante pour être utilisé dans des différentes applications chauffage, etc...
- Il est possible de réduire l'espace nécessaire à l'installation solaire photovoltaïque et thermique.
- Il est possible de réduire les matériaux nécessaires pour construire les capteurs solaires et donc de réduire les effets négatifs sur l'environnement.

Notre étude a principalement cherché à explorer de nouvelles méthodes pour accroître l'efficacité de l'énergie solaire, parce que, comme mentionné, est maintenant si faible qu'il n'est pas souvent mise en œuvre rentable.

# ***Bibliographie***

## Références Bibliographiques

- [1] Kamel Ait Cherif, Les enjeux et les défis de la transition énergétique en Algérie . 21 mars 2017.
- [2] Khelifa Abdelkrim, Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV/T . Université Hadj Lakhdar de Batna Département des Sciences de la matière, 2011.
- [2] Khelifa Abdelkrim, Contribution a la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque-thermique PVT . Université Hadj Lakhdar de Batna Département des Sciences de la matière, 22/01/2017.
- [3] Zitani Brahim, Etude et modélisation du comportement en régime transitoire d'un capteur solaire. Université Annaba 2007
- [4]Tabaet Ismail, Etude réalisation et simulation d'un capteur solaire. Université des frères Mentouri Constantine, département de physique, 2016
- [5] A. Harrouz, Ilhami Colak, Korhan Kayisli, "Control of a small wind turbine system application", Journal "IEEE Xplore" of IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2016, Pages: 1128 – 1133.
- [6] I. Yaichi, S. AbdelHafid, Y. Hammaoui, M. Djilaila, A. Harrouz, S. Mansouri and Y. Bakou, "Modelling and control doubly fed induction machine, application for a wind turbine system", Journal "IEEE Xplore" of the International Renewable and Sustainable energy Conference (IRSEC'16), 2017, Marrakech, Marco. ISSN: 2380-7393.
- [7] O. Harrouz, B. Brémond, M. Habi, A. Harrouz, "Modèle De Simplification Des Réseaux D'eau Potable", arhyss Journal, ISSN: 1112-3680, n°30, Juin 2017, pp. 253-272
- [8] A. Harrouz, Meriem Abbes, Ilhami Colak, Korhan Kayisli, "Smart grid and renewable energy in Algeria", IEEE Xplore of IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Electronic ISSN: 2572-6013 , 2017.
- [9] A. Harrouz. "Renewable Energy in Algeria and Energy Management Systems". International Journal of Smart Grids, ijSmartGrid, Vol. 2, N. 1, March, p. 34-39, mar. 2018. ISSN 2602-439X.
- [10] Ghaitaoui T, Laribi S, Arama Fz, Benattilah A. Preparation and Characterization of Polymer Solar Cell. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),119-124. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.1>
- [11] Benabdelkrim B, Benattilah A, Ghaitaoui T. Study of Degradation of Amorphous PV Module Performance under Different Climatic Conditions. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),125-135. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.2>



- [12] Fillali M, Dennai B, Gani A. Contribution of the Doping of the Lower Window Layer to Improve the Performances of the Tandem Solar Cell. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),136-143. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.3>
- [13) Damba N, Oudrane A, Aour B, Bennouna M. S, Belkahella N. Numerical Modelling of the Behaviour of the Cervical Spine under the Effect of a Flexion / Extension. Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development, 2019, 1(2),144-153. <https://doi.org/10.46657/ajresd.2019.1.2.4>

**Résumé :**

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats avec une production intermittente. L'exploitation des ressources renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. L'Algérie a fourni un grand effort pour l'électrification rurale et saharienne. Dans ce contexte, l'interconnexion de plusieurs sources d'énergie renouvelable (éolien- photovoltaïque) dans un système d'énergie hybride (SHE) peut avoir un apport profitable sur la production d'énergie électrique en termes de coût et de disponibilité. Nous présentons dans ce travail, la modélisation numérique du capteur hybride de la nouvelle configuration. Nous avons commencé par une étude théorique qui a permis la détermination du profil de température dans les différentes couches du capteur et les puissances thermiques et électriques produites ainsi que les rendements thermiques et électrique.

**Mots clés :** Système Photovoltaïque, Energies renouvelables, gisement solaire, aérogénérateur, champ photovoltaïque, batteries, modélisation énergétique.

:

يجب أن يستند مستقبلنا على الموارد الطاقة المتجددة فهي موارد غير ملوثة لبيئتنا. إن استعمال الموارد المتجددة لتوليد الطاقة عرف تطورا كبيرا في البلدان المصنعة وأيضا في بعض الدول السائرة في طريق النمو. لقد وفرت الجزائر جهدا كبيرا لتوفير الكهرباء في المناطق الريفية والصحراوية. وفي هذا السياق ' يعد ربط العديد لمصادر الطاقة المتجددة في نظام الطاقة الهجينة ذو تأثير إيجابي على إنتاج الطاقة الكهربائية من حيث التكلفة .  
نقدم في هذا العمل النمذجة الرقمية للمستشعر الهجين للتكوين الجديد. بدأنا بدراسة نظرية سمحت بتحديد ملف درجة الحرارة في طبقات مختلفة من المستشعر والقوى الحرارية والكهربائية المنتجة وكذلك المخرجات الحرارية والكهربائية.

**المفاتيح:** النظام الكهرو , 'مولد هوائي 'حقل كهرو ضوئي البطاريات'

**Summary :**

Our energy future must be based on non-polluting energies with significant resources. Renewable energies are the best candidates with intermittent production. The exploitation of renewable resources is booming in industrialized countries and even in some underdeveloped countries. Algeria has made a great effort for rural and Saharan electrification. In this context, the interconnection of several sources of renewable energy (wind-photovoltaic) in a hybrid energy system (SHE) can have a profitable contribution on the production of electric energy in terms of cost and availability. We present in this work, the digital modeling of the hybrid sensor of the new configuration. We started with a theoretical study that allowed the determination of the temperature profile in the different layers of the sensor and the thermal and electrical powers produced as well as the thermal and electrical outputs.

**Keywords:** Photovoltaic System, Renewable energies, solar field, wind generator, photovoltaic field, batteries, energy modeling.