



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 :** Physique

**Spécialité :** Physique énergétique et énergies renouvelables

**Intitulé**

**Réalisation et expérimentation d'un capteur  
hybride photovoltaïque-thermique PV-T**

**Présenté par :**

**Melle. MERZOGUI Fatma**

**Melle. BEN LAICHI Meriem**

Soutenu publiquement le 31/05/2018

**Devant le jury :**

<b>Président :</b>	Mr. OMARI Boumediene	<b>M.A</b>	<b>Univ. Adrar</b>
<b>Promoteur :</b>	Dr. MOUEDJ Rachid	<b>M. R. A</b>	<b>URER-MS. Adrar</b>
<b>Examineur :</b>	Dr. BENMEDJAHDE Miloud	<b>M.R.A</b>	<b>URER-MS. Adrar</b>
	Mr. SAADI Zine	<b>M.R.A</b>	<b>URER-MS. Adrar</b>

Année Universitaire : 2017/2018



# Dédicaces

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que Dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes **frères**.

A mes **sœurs**.

A ma meilleure amie Meriem.

A mes professeurs.

A mes amies et mes collègues de promotion.

**Fatma**  
Fatma





# Dédicaces

Avant tout, je remercie **Dieu** le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère **mère**, qui n'a jamais cessé de prier pour moi, Zohra.

A mon très cher **père**, pour ses encouragements, Salem.

A mes très chers **frères** Rokiia, Mostapha, Abdelkrim, Ahmed, Mohamed, khawla, Taher, Boufldja et Sid laiche.

A ma meilleure amie **Fatma**.

A mes amis et mes collègues de promotion

A la fin je dédie très chaleureusement ce mémoire à mes enseignants.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# Meriem



# Remerciements

*Avant toute chose, Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donnée le courage, la patience et la force durant toutes ces années d'étude.*

*Le présent travail a été réalisé à l'Unité de recherche en énergies renouvelables au milieu saharienne (URMER) d'ADRAR, sous la direction du Docteur **Maouedj Rachid**.*

*Nous remercions en particulier notre Encadreur **Dr. Maouedj Rachid**, Maitre de recherche "A" à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR, pour le soutien et pour tout le bagage scientifique qui nous a transmis durant ce projet.*

*Nos vives reconnaissances et remerciements vont à Monsieur le **M. OMARI Boumediene** enseignant à l'Université Ahmed Draia Adrar, qui a accepté la présidence de l'éminent jury de ce mémoire.*

*Nos vives reconnaissances et remerciements vont à Monsieur le **Dr. BENMEDJAHED** Maitre de recherche "A" à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR (URER-MS), qui a accepté d'examiner et de juger ce travail.*

*Nos sincères remerciements vont également à Monsieur le **M. SAADI Zine**, Chercheur à l'unité de recherche des énergies renouvelables au milieu saharienne d'ADRAR (URER-MS), d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*Nous remercions l'ensemble des enseignants du département des sciences de la matière pour leur patience durant notre étude.*

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	1
<b>Chapitre I</b>	<b>Rayonnement solaire</b>
1. Introduction .....	3
2. Situation géographique de l'Algérie.....	3
3. Mouvement Terre- Soleil .....	3
3.1. a. Mouvement de rotation.....	3
3.1. b. Mouvement de translation.....	3
4. La distance terre – soleil.....	4
5. Correction de distance.....	5
6. Equation du temps .....	6
7. Repérage d'un site sur la surface terrestre.....	6
8. Les coordonnées du soleil .....	7
8.a. Coordonnées équatoriales.....	7
8.a.1. La déclinaison du soleil $\delta$ .....	7
8.a.2. L'angle horaire du soleil H.....	8
8.b. Coordonnées horizontales.....	9
8.b.1. La hauteur du soleil h.....	9
8.b.2. L'azimut du soleil a.....	10
9. Orientation d'un capteur .....	10
a. La hauteur du capteur $\gamma$ .....	10
b. Azimut du capteur $\alpha$ .....	10
10. Durée d'ensoleillement $D_{IS}$ d'un capteur ( $\alpha, \gamma$ ).....	10
11. Durée du jour.....	12
12. Spectre du rayonnement solaire.....	12
13. Puissance solaire reçue par terre .....	13
14. Modélisation du rayonnement solaire .....	14
a. Rayonnement direct .....	15
b. Rayonnement diffus.....	15
c. Rayonnement global .....	15
d. L'albédo du sol.....	15
15. Appareils de mesure.....	15
15.1. Mesure de la durée d'ensoleillement et du rayonnement solaire.....	15
15.2. Mesure de la vitesse et de la direction du vent.....	18
16. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair) .....	19
17. Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert).....	20
18. Estimation d'énergie journalière incidente.....	21
19. Estimation d'énergie annuelle incidente.....	21
20. Conclusion.....	22
21. Référence.....	

## Chapitre II

## L'énergie solaire photovoltaïque

1. Introduction.....	23
2. L'histoire de l'énergie solaire.....	23
3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire .....	24
a. Les avantages .....	24
b. Les inconvénients.....	24
4. Le fonctionnement des panneaux solaires.....	24
5. La Technologie Photovoltaïque .....	27
5.1. 1 <sup>ère</sup> génération: Silicium cristallin (mono et poly).....	27
5.2. 2 <sup>ème</sup> génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin.....	28
5.3. Technologies photo-électro-chimiques (DyeSensitisedCell et Organic PV)..	28
5.4. Procédé de fabrication .....	29
5.5. Modules et cellules photovoltaïques.....	29
5.6. Critères de choix d'une installation solaire .....	31
5.7. Système solaire.....	31
5.8. Applications.....	32
5.8.1. Pompage photovoltaïque.....	32
5.8.2. L'éclairage photovoltaïque.....	34
6. Les paramètres qui influent sur le rendement d'un panneau solaire.....	35
6.1. Influence de la température sur le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque.....	35
6.2. Influence de la 'intensité de la radiation lumineuse.....	36
7. Les différents types des systèmes énergétiques solaires .....	36
7.1. Système autonome.....	36
7.2. Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique.....	37
8. Conclusion.....	38
9. Référence .....	38

## Chapitre III

## L'énergie solaire thermique

1. Introduction.....	40
2. La conversion photo thermique.....	40
3. Type des capteurs solaires thermiques.....	40
3.1. Le capteur solaire à eau.....	40
3.2. Le capteur solaire à air .....	41
4. Applications.....	42
4.1. Les distillateurs solaires.....	42
4.1.1. Les dispositifs de distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre.....	42
4.1.1. a. Les distillateurs à simple effet.....	42
4.1.1. b. Les distillateurs à multiple effet.....	43
4.1.2. Les distillateurs d'eau classiques.....	43
4.2. Le chauffe-eau solaire.....	44
4.3. Les séchoirs solaires .....	45
4.3.1. Le séchoir solaire direct.....	45
4.3.2. Les séchoirs solaires indirects.....	46
5. Conclusion.....	46

6. Référence.....	47
<b>Chapitre IV</b>	<b>Traitement des données et interprétation des résultats</b>
1. Introduction.....	48
2. Description du système PV/T.....	48
2.1. Description technique du système PV/T.....	48
2.2. Dimensions du capteur solaire hybride PV/T.....	48
3. Banc d'essai.....	48
3.1. Panneau photovoltaïque.....	49
3.2. Acquisition de données.....	50
3.3. Thermocouple de type « K ».....	50
3.4. Capteur de courant et capteur de tension.....	51
3.5. Une charge .....	52
4. Caractéristiques géographique et météorologique du site d'Adrar .....	52
5. Résultats et discussions.....	52
5.1. La variation de l'éclairement globale.....	52
5.2. Distribution de la température dans le capteur Photovoltaïque PV/T.....	56
6. Conclusion.....	60
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>61</b>

# Liste des figures

<b>Chapitre I</b>	<b>Rayonnement solaire</b>	
Figure 1: Les mouvements de la terre.....		4
Figure 2 : Variation de la distance terre –soleil en fonction du nombre du jour de l'année. ....		5
Figure 3: Repérage d'un site sur la surface terrestre.....		7
Figure 4: Repère équatorial.....		7
Figure 5: Mouvement de rotation de la Terre.....		8
Figure 6 : Angle horaire $\omega$ du soleil.....		9
Figure 7: Spectre du rayonnement solaire.....		12
Figure 8 : Évolution annuelle de la constante solaire corrigée.....		14
Figure 9 : Les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal		14
Figure 10 : Pyranomètre .....		16
Figure 11: Héliographe .....		17
Figure 12: Pyrhéliomètre .....		17
Figure 13 : Anémomètre .....		18
Figure 14 : Girouette .....		18
Figure 15 : Capteur de température.....		18
Figure 16 : Station de mesure de rayonnement solaire.....		19
<b>Chapitre II</b>	<b>L'énergie solaire photovoltaïque</b>	
Figure 1: Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.....		25
Figure 2 : Plaque photovoltaïque (Mouvement de déplacement des électrons).....		26
Figure 3 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.....		26
Figure 4 : Cellule mono cristalline et poly cristalline .....		27
Figure 5: Etapes de fabrication des cellules .....		28
Figure 6 : Association des cellules.....		29
Figure 7 : Le module photovoltaïque.....		29
Figure 8 : Constitution d'un module photovoltaïque.....		30
Figure 9 : Schéma de principe du système de pompage d'eau.....		32
Figure 10 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie		33
Figure 11: principe de photovoltaïque.....		34
Figure 12 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire.		35
Figure 13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire....		36
Figure 14: Système autonome .....		36
Figure 15 : Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique .....		37
<b>Chapitre III</b>	<b>L'énergie solaire thermique</b>	
Figure 1 : Etapes de la conversion photo thermique.....		40
Figure 2.a: Capteur solaire thermique à eau, vue en coupe. Les conduits d'eau sont ici intégrés dans l'absorbeur.....		41
Figure 2.b: Capteur à air.(Analyse-des-pertes-thermiques Gisement solaire).....		42



Figure 3: Distillateur à simple effet .....	42
Figure 4 : Distillateur à multiple effet .....	43
Figure 5: Distillateur solaire à simple effet à vitre plane.....	43
Figure 6 : Coupe transversale du distillateur à double compartiments adapté à la distillation alcoolique .....	44
Figure 7: Distillateur solaire sphérique .....	45
Figure 8 : Schéma de principe de la piscine solaire.....	45
Figure 9 : Coupe d'un séchoir solaire dire.....	45
Figure 10 : Schéma du séchoir solaire indirect.....	46

#### **Chapitre IV                            Traitement des données et interprétation des résultats**

Figure 1 : Photos du prototype de capteur PV/T étudié.....	49
Figure 2 : Photos du panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12.....	49
Figure 3 : Photos de l'acquisition de données de type FLUKE.....	50
Figure 4 : Photos des thermocouples de type « K » .....	51
Figure 5: Photo du capteur de courant et capteur de tension.....	51
Figure 6: Photo de la lampe à courant continue .....	52
Figure 7 : L'évolution de l'éclairement solaire (Expérimental).....	55
Figure 8 : Distribution de la température théorique et expérimentale dans les différentes couches du capteur hybride PV/T.....	57
Figure 9 : Distribution de la température expérimentale dans les différentes couches du capteur hybride PV-T sans refroidissement et panneau PV.....	58
Figure 10 : Evolution de la puissance du panneau PV du capteur PV-T et du panneau PV .....	59

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre I**

### **Rayonnement solaire**

Tableau 1: Les constantes caractéristiques l'état de l'atmosphère.....	20
--	----

### **Chapitre IV**

### **Traitement des données et interprétation des résultats**

Tableau 1 : Dimensions du capteur solaire hybride PV/T.....	48
Tableau 2 : Caractéristiques du module solaire « Isophoton I-75/12 ».....	50
Tableau 3: Données géographiques du site d'Adrar.....	52
Tableau 4 : Comparaison entre la température maximum du panneau PV et les températures différentes couches du capteur hybride PV-T.....	57

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

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

# Introduction générale

---

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 PV-T 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 établi une synthèse bibliographique à travers laquelle nous avons retenu des modèles proposés dans la littérature, permettant de calculer les paramètres influençant le rayonnement solaire (le mouvement terre soleil, la position du soleil, l'orientation des capteurs, la situation géographique et les conditions atmosphériques), afin de déterminer l'angle d'inclinaison optimal des capteurs solaires.

Dans le deuxième chapitre, un modèle mathématique détaillé sera présenté pour la modélisation des caractéristiques I-V du générateur photovoltaïque et les influences des différents paramètres (éclairage, température, facteur de qualité, résistance série, ...), ainsi que les différentes spécifications électriques du générateur.

Le troisième chapitre est consacré à des rappels sur l'énergie solaire thermique et les différentes applications.

Enfin nous avons présenté les résultats des testes expérimentaux obtenus dans le quatrième chapitre.

Notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

## **Références Bibliographiques :**

[1] Kamel Ait Cherif, « Les enjeux et les défis de la transition énergétique en Algérie ». *Algerie-eco*. 21 mars 2017.

[2] Khelifa Abdelkrim, « Contribution à 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.

# CHAPITRE I

## RAYONNEMENT SOLAIRE

**1. Introduction :**

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'énergie captée par un système PV :

Le mouvement terre soleil, la position du soleil, l'orientation du capteur, la situation géographique...

Dans ce chapitre nous présentons les paramètres essentiels pour l'estimation des énergies captées par les systèmes PV.

**2. Situation géographique de l'Algérie:**

L'Algérie est un pays d'Afrique du Nord bordé au nord par la mer Méditerranée (1200 km), à l'est par la Tunisie (965 km) et la Libye (982 km), au sud-est par le Niger (956 km), au sud-ouest par le Mali (1 376 km) et la Mauritanie (463 km), à l'ouest par le Maroc (1 559 km) et le Sahara Occidental (42 km). Sur le continent africain, l'Algérie est la première pays par sa superficie (2 381 741 km<sup>2</sup>), dont les quatre cinquièmes sont occupés par le Sahara [1].

**3. Mouvement Terre- Soleil :**

Dans l'univers tout est en mouvement. On peut décomposer le mouvement de la terre en deux mouvements [2]:

**3.1. a. Mouvement de rotation:**

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :

$$T_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h.} \quad (1)$$

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;

$$V_r \approx 0,465\text{km/s,}$$

Elle est variable en fonction de latitude  $\varphi$  telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r(\cos(\varphi)) \quad (2)$$

**3.1. b. Mouvement de translation:**

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période  $T_t = 365\text{jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25 \text{ jours}$ . Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le

soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne  $V_t \approx 29,77\text{km/s}$  [vitesse maximale en hiver 30,27 km/s et minimale en été 29,77 km/s]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons [2,7].

Le plan équatorial, perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre, fait avec le plan de l'écliptique un angle constant appelé obliquité et noté  $\delta_o$  qui est égal à  $23.45^\circ$  [2,8].

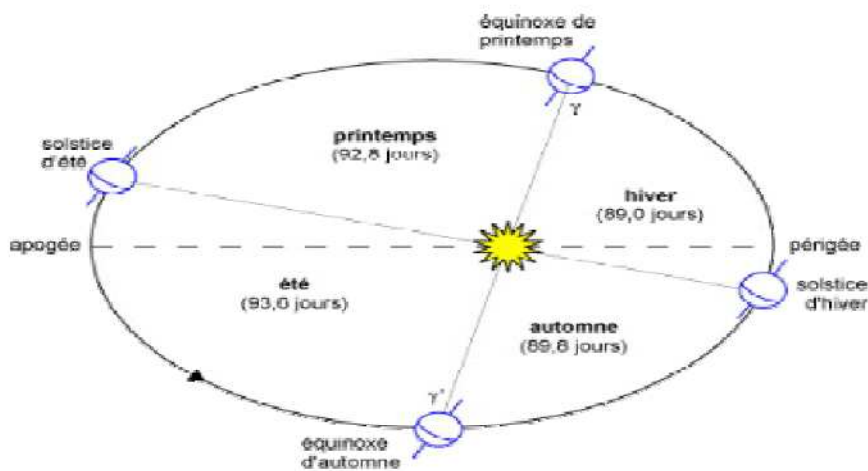


Figure 1: Les mouvements de la terre [2,6].

**4. La distance terre - soleil:**

La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [2,7]:

$$d(N) = 1 - 0.017 \cos [(360/365). (N-2)] \tag{3}$$

Avec:

N : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

Année civile : N = (1, 365) jours

Année bissextile : N = (1, 366) jours

dTS(min) = 0,983 UA vers le 2 janvier (Périgée).

dTS(max) = 1,017 UA vers le 5 juillet (Apogée).

Avec :

$$1UA = 149\,597\,890 \pm 500 \text{ km} \approx 150 \text{ million km}$$

La variation de la distance terre-soleil est présentée par la figure (2).

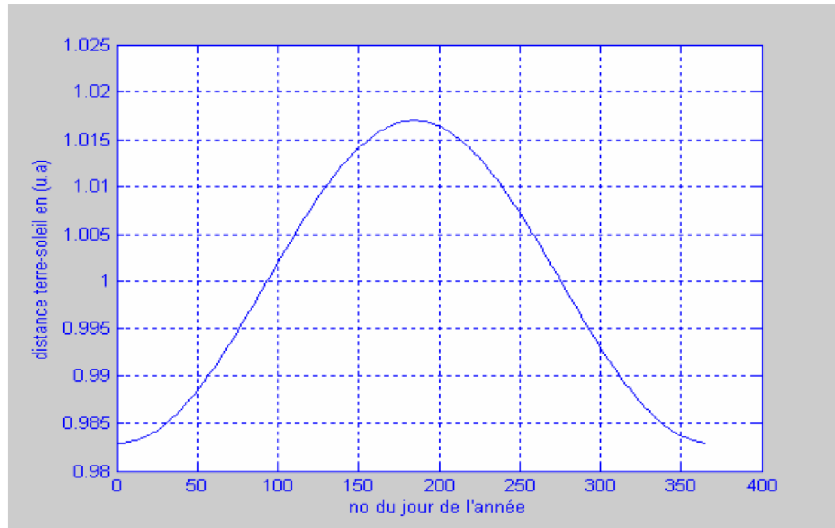


Figure 2 : Variation de la distance terre –soleil en fonction du nombre du jour de l'année [2].

**5. Correction de distance:**

Les variations annuelles de la distance Terre-soleil sont dues au fait que la trajectoire autour du soleil est une ellipse. Elles se traduisent par des variations du rayonnement hors atmosphère (l'éclairement solaire direct extra-terrestre) [3].

Le coefficient de correction dû à cette variation de la distance a été déterminé à partir de la position de la Terre sur son orbite en fonction du jour de l'année et est donné par la relation [3]:

$$E_0 = (r_0/r)^2 = 1.0001 + 0.034221 \cos \square + 0.001280 \sin \square + 0.000719 \cos 2\square + 0.000077 \sin 2\square$$

(4)

Avec :

$r_0$  : La distance moyenne entre la Terre et le soleil (150 millions Km).

$r$  : La distance actuelle entre la Terre et le soleil.

$\square$  : L'angle du jour exprimé en Radians est donné par l'équation (I.1.b)

Ou encore

$$E_0 = (r_0/r)^2 = 1 + 0.033 \cos[(2(nj)/365)]$$

(5)



### 6. Equation du temps :

C'est une équation qui tient compte de la variation de la vitesse de rotation de la Terre, elle est donnée par [3]:

$$ET = 9.87 \sin(2\beta_0) - 7.53 \cos(\beta_0) - 1.5 \sin(\beta_0), \text{ (Minute)} \quad (6)$$

L'angle  $\beta_0$  est défini en fonction du numéro du jour de l'année :

$$\beta_0 = \frac{360}{365} (nj - 81), \text{ (Degrés)} \quad (7)$$

Ainsi, un Jour Solaire peut varier entre 24 h 00 mn 30s et 23 h 59 mn 40s. D'un jour à l'autre il n'y a que quelques secondes de variation (jusqu'à 30 secondes aux alentours de la fin décembre, quand même). Mais toutes ces variations s'accumulent. La conséquence essentielle est que, au cours de l'année, l'instant du passage du Soleil au méridien (le midi solaire) se décale lentement jour après jour par rapport au midi qui serait indiqué par notre horloge parfaite et bien régulière. Cette variation peut atteindre 17 min.

### 7. Repérage d'un site sur la surface terrestre:

Les coordonnées géographiques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont :

La latitude et la longitude, qui sont calculées en angle et qui s'expriment en degrés, minutes et secondes d'angle [2].

- **La latitude  $\phi$**  : donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de  $0^\circ$  à l'équateur à  $90^\circ$  N (ou S) aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur [2].

$\Phi$  varie de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$  tel que:

$\phi > 0$  Vers le Nord

$\phi < 0$  Vers le Sud

- **La longitude  $\psi$**  : permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord-Sud de référence appelée le méridien Greenwich.

$\psi$  varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$  tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi > 0 \text{ à l'est du méridien de Greenwich} \\ \psi < 0 \text{ à l'ouest du méridien de Greenwich.} \end{array} \right.$$

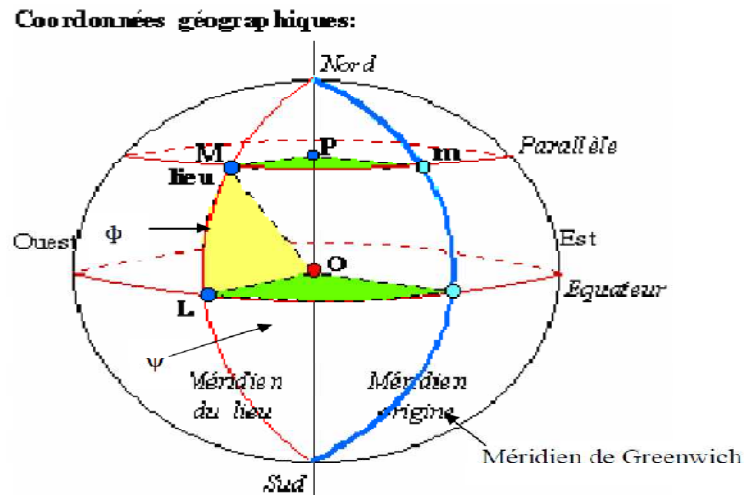


Figure 3: Repérage d'un site sur la surface terrestre [2,7].

**8. Les coordonnées du soleil :**

**8.a. Coordonnées équatoriales:**

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la Terre à l'aide de deux angles ; la déclinaison  $\delta$  et l'angle horaire  $\omega$  [3].

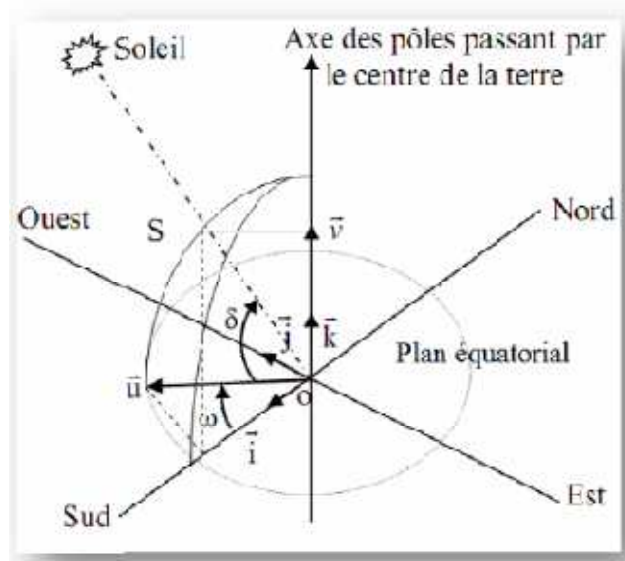


Figure 5: Repère équatorial

**8.a.1. La déclinaison du soleil  $\delta$**

La déclinaison solaire est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons. La Figure 6 donne les valeurs remarquables

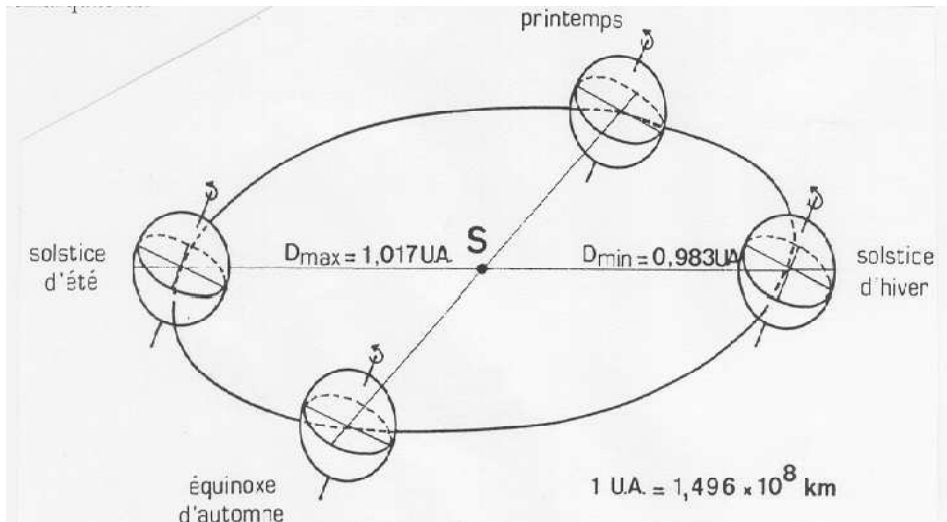


Figure 6: Mouvement de rotation de la Terre [4].

Equinoxe de printemps :	21 Mars	$\delta = 0$
Solstice d'été :	22 Juin	$\delta = + 23^{\circ} 27'$
Equinoxe d'automne :	23 Septembre	$\delta = 0$
Solstice d'hiver :	22 Décembre	$\delta = - 23^{\circ} 27'$
Approche maximale :	Périhélie 2 Janvier	
Approche minimale :	Aphélie 2 Juillet	

Entre ces 4 points remarquables,  $\delta$  prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation [4]:

$$\sin \delta = 0.4 \sin t \tag{8}$$

Où  $t = N \cdot \frac{360}{365}$  avec N, nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps.

Ou par la relation :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \tag{9}$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1<sup>er</sup> Janvier.

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des équinoxes (0.4 °/ jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver.

### 8.a.2. L'angle horaire du soleil $\omega$

L'angle horaire  $\omega$  (encore noté AH) du soleil est déterminé par la rotation durant de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le

plan méridien du lieu. Exprimé en ° d'angle,  $\omega=15(\text{TSV}-12)$  où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures

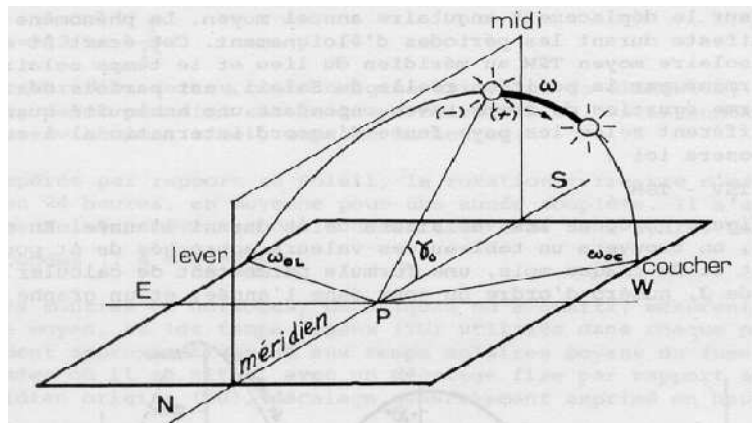


Figure 7 : angle horaire  $\omega$  du soleil [4].

Chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de  $15^\circ$ , soit encore 4mn de temps par ° de longitude (soit 24mn de différence entre Chambéry et Bordeaux). A la latitude de  $45^\circ$ , une mn de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur [4].

AH=  $90^\circ$  à 18h (temps solaire vrai).

### 8.b. Coordonnées horizontales:

#### 8.b.1. La hauteur du soleil h:

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [5]:

$$\sin h = \cos H \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi \quad (10)$$

h varie entre  $+90^\circ$  et  $-90^\circ$

On prend:

$h > 0$  le jour

$h < 0$  la nuit

$h = 0$  aux lever et coucher

**8. b.2. L'azimut du soleil a :**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud.  
L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante [5] :

$$\sin a = (\cos \delta \sin H) / \cos h \quad (11)$$

a : varie entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$

**9. Orientation d'un capteur :**

Un capteur quelconque R est défini par deux angles ( $\gamma$ ,  $\alpha$ ) en coordonnées horizontales [2]:

**b. La hauteur du capteur  $\gamma$  :**

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal

$$\gamma \text{ varie entre } -90^\circ \text{ et } +90^\circ \left\{ \begin{array}{ll} \gamma > 0 & \text{plan tourné vers le haut} \\ \gamma < 0 & \text{plan tourné vers le bas} \\ \gamma = +90 & \text{plan horizontal tourné vers le haut} \\ \gamma = -90 & \text{plan horizontal tourné vers le bas} \\ \gamma = 0 & \text{plan vertical} \end{array} \right.$$

**b. Azimut du capteur  $\alpha$  :**

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

$$\alpha \text{ varie entre } -180^\circ \text{ et } +180^\circ \left\{ \begin{array}{ll} \alpha > 0 & \text{Vers l'ouest} \\ \alpha < 0 & \text{Vers l'est} \\ \alpha = 0 & \text{Plan Sud} \\ \alpha = -90^\circ & \text{Plan Est orienté vers Est} \\ \alpha = +90^\circ & \text{Plan ouest orienté vers ouest} \\ \alpha = 180^\circ & \text{Plan orienté vers Nord} \end{array} \right.$$

**10. Durée d'insolation  $D_{IS}$  d'un capteur ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ):**

La durée d'insolation ( $D_{IS}$ ) est la durée effective d'insolation d'un capteur mesurée par héliographe. Elle est définie à partir d'un seuil minimum ( $\approx 250 \text{w/m}^2$ ).

Pour un plan ( $\alpha, \gamma$ ), un lieu  $\varphi$  et un jour donné,  $i$  est uniquement fonction de l'angle horaire  $H$ , on exprimera donc  $\cos i$  en faisant bien apparaître la variable  $H$  [6, 9, 10,11].

$$\cos(i) = A.\sin(H) + B.\cos(H) + C \quad (12)$$

Avec:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = A' \cos(\delta) \quad A' = \sin(\alpha) \cos(\gamma) \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} B = B' \cos(\delta) \quad B' = \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cos(\varphi) \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = C' \sin(\delta) \quad C' = -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \sin(\varphi) \end{array} \right. \quad (15)$$

Le lever  $H_L'$  et le coucher  $H_C'$  du soleil sur un capteur sont définis pour

$$i = \pm 90^\circ \Rightarrow \cos(i) = 0$$

$$\Rightarrow A \cdot \sin(H) + B \cdot \cos(H) + C = 0$$

La résolution de cette équation nous donne deux solutions l'une pour le lever et l'autre pour le coucher :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_{L'} = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) - \arccos\left(\frac{-C'}{D'} \operatorname{tg}(\delta)\right) \\ H_{C'} = \rho(\alpha) \arccos\left(\frac{B'}{D'}\right) + \arccos\left(\frac{-C'}{D'} \operatorname{tg}(\delta)\right) \end{array} \right. \quad (16)$$

Avec :

$$D' = \sqrt{A'^2 + B'^2}$$

$$\rho(\alpha) = \operatorname{Singe} \text{ de } \alpha$$

La durée d'ensoleillement d'un capteur est donnée par :

$$D_{IS} = \frac{H_2 - H_1}{15} \quad (17)$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{ll} H_1 = H_{L'} & \text{si } |H_{L'}| \leq |H_L| \\ H_1 = H_L & \text{si } |H_{L'}| \geq |H_L| \\ H_2 = H_{C'} & \text{si } |H_{C'}| \leq |H_C| \\ H_2 = H_C & \text{si } |H_{C'}| \geq |H_C| \end{array} \right.$$

**11. Durée du jour**

La durée du jour  $d$  en heures est par définition [2]:

$$d = (H_c - H_l) / 15 = 2 H_c / 15 \tag{18}$$

D'où :

$$d = (2/15) \text{ arc cos } (- \text{tg } \delta \cdot \text{tg } \varphi) \tag{19}$$

On retrouve donc :

- si  $T = -1$       $H_c = 180^0$       $d = 24$  heures jour polaire
- si  $T = 1$       $H_c = 0^0$       $d = 0$  heures nuit polaire

Pour un lieu donné, la durée maximale et la durée minimale du jour se produisent aux solstices :

- Maximum      $d_M = (2/15) \text{ arcos } (-0.434 \text{ tg } [\varphi])$
- Minimum      $d_m = (2/15) \text{ arcos } (+ 0.434 \text{ tg } [\varphi])$

**12. Spectre du rayonnement solaire:**

Le soleil nous envoie un rayonnement électromagnétique qui se situe dans le domaine de la lumière. Ce rayonnement est composé d'infrarouge, de lumière visible et d'ultraviolet [3]:

- La lumière visible à des longueurs d'onde comprises entre  $0.4\mu\text{m}$  et  $0.8\mu\text{m}$ , elle comprend 48% du rayonnement;
- Le rayonnement ultraviolet (UV) à des longueurs d'onde inférieures à  $0.4\mu\text{m}$ , il représente 6% du rayonnement;
- Le rayonnement infrarouge (IR) à des longueurs d'onde supérieures à  $0.8\mu\text{m}$ , il englobe 46% du rayonnement.

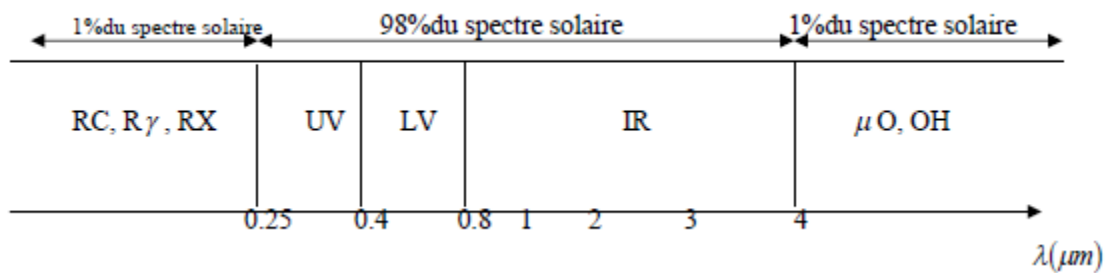


Figure 8: Spectre du rayonnement solaire

### 13. Puissance solaire reçue par la terre :

Le soleil est considéré comme un corps noir de rayon  $r = R_S$  porté à la température  $T = T_S$ . La puissance du soleil rayonnée par unité de surface est par unité de temps est donnée par la loi de Stephan [6, 9,10] :

$$W_S = \sigma \cdot T_S^4 \quad [W_S] = W/m^2 \quad (19)$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  = la constante de Stephan.

La puissance rayonnée par toute la surface du soleil et par seconde :

$$\begin{aligned} P_S &= W_S \cdot (4\pi R_S^2) \\ &= \sigma \cdot T_S^4 \cdot (4\pi R_S^2) \end{aligned} \quad (20)$$

En supposant que la terre est démunie d'atmosphère et qu'il n'y a aucune absorption dans l'univers, une surface d'un  $m^2$  placée perpendiculairement au rayonnement solaire reçoit une puissance  $W_T$  donnée par la relation suivante :

$$W_T \frac{(\sigma T_S^4 \cdot 4\pi R_S^2)}{4\pi D_{TS}^2} = \frac{\sigma T_S^4 R_S^2}{D_{TS}^2} \quad (21)$$

$$[W_T] = W/m^2$$

$D_{TS}$  : varie en fonction du jour de l'année selon la relation :

$$D_{TS} = 1 - 0,017 \cos \left[ \frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad (22)$$

- Lorsque  $D_{TS} = 1$ .U.A (aux équinoxes), la puissance reçue par  $m^2$  de la terre  $W_T$  (hors atmosphère) est appelée "constante solaire" notée  $I_0$ .

Les mesures de  $I_0$  hors atmosphère (sur 10 ans) ont donné une valeur moyenne :

$I_0 = (1367 \pm 7) \text{ W/m}^2$  au lieu de  $I_0 = (1353 \pm 21) \text{ W/m}^2$  adapté en 1971.

- Lorsque  $D_{TS} \neq 1$ .U.A, la puissance reçue par  $m^2$  de la terre  $W_T$  (hors atmosphère) est notée  $I$ , elle est donnée par la relation (23) :

$$I = 1367 \left[ 1 + 0,034 \cos \frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad (23)$$



Lors des fortes activités solaires, caractérisées par l'apparition des taches solaires et des éruptions chromosphériques, les rayonnements émis par le soleil peuvent s'écarter notablement de leurs valeurs habituelles. Ces variations apparaissent sensibles surtout pour les rayonnements de très courtes longueurs d'ondes. Dans le domaine du rayonnement électromagnétique, relatif aux applications solaires, ces variations sont considérées comme négligeables.

La figure 9 représente l'évolution annuelle de la constante solaire corrigée.

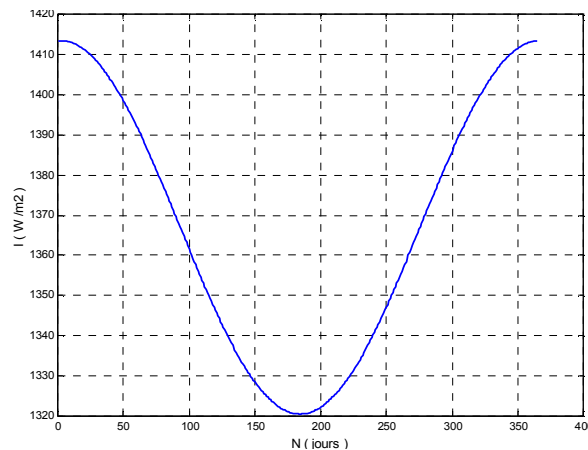


Figure 9 : Évolution annuelle de la constante solaire corrigée

De la figure 9, nous remarquons que le maximum est obtenu au mois de janvier avec une valeur  $1413 \text{ W/m}^2$ , le minimum est estimé au débit de Juillet de  $1320 \text{ W/m}^2$ .

#### 14. Modélisation du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire arrivant au sol a au moins deux composantes: une composante directe I et une composante diffuse D, le tout formant le rayonnement global G [3].

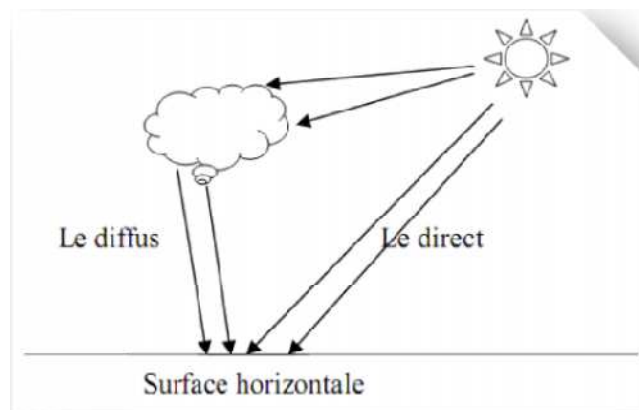


Figure 10 : Les différentes composantes du rayonnement solaire sur un plan horizontal

**a) Rayonnement direct**

C'est la composante parvenant directement de l'angle solide de limite par le disque solaire.

C'est un rayonnement, dont le parcours entre le soleil et la surface terrestre est direct.

**b) Rayonnement diffus**

Le diffus parvient de toute la voute céleste et n'a pas d'orientation privilégiée a cause des effets de l'atmosphère et les nuages.

**c) Rayonnement global**

On appelle rayonnement global le rayonnement solaire parvenant au niveau du sol sur une surface horizontale, soit directement, soit après diffusion. Il s'exprime simplement comme la somme du rayonnement diffus et du rayonnement direct.

$$G=I+D$$

**d) L'albédo du sol**

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps sans aucune réflexion, et 1 correspondant au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption, tout le rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit.

Certaines matières ont un albédo très variable, comme les nuages. En revanche, les corps solides ont bien souvent des albédos fixes qui caractérisent leur composition chimique. Par exemple, la lave a un albédo de 0,04, l'albédo du sable varie entre 0,25 et 0,30, celui de la glace entre 0,30 et 0,50, la neige (épaisse et fraîche) a son albédo qui peut atteindre jusqu'à 0,90. L'albédo moyen terrestre est de 0,2, toutes surfaces confondues [3].

**15. Appareils de mesure:**

Le principe classique des mesures d'éclairements est l'effet thermoélectrique: un corps noir reçoit le rayonnement solaire, l'augmentation de sa température est mesurée par une série de couples thermoélectriques; on enregistre donc une force électromotrice. Une mesure précise est toujours délicate d'autant plus que l'appareil est situé à l'extérieur [4].

**15.1. Mesure de la durée d'ensoleillement et du rayonnement solaire****➤ Le pyranomètre :**

Les pyranomètres mesurent le rayonnement global (direct + diffus) de tout l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0.3 à 3 μm. Le pyranomètre d'Eppley est une thermopile adaptée à cet usage. La surface réceptrice comporte deux anneaux

concentriques en Argent; l'anneau intérieur est recouvert de noir, l'anneau extérieur recouvert de blanc. La différence de température mesurée entre les deux anneaux par des thermocouples en contact thermique avec les surfaces intérieures des anneaux mais isolés électriquement, peut être enregistrée à raison d'une lecture par heure sous forme d'une tension de sortie de l'ordre du mV (en fait  $10\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ ) [4].



Figure 11: Pyranomètre [6]

➤ **L'héliographe :**

L'héliographe mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil. Tant que l'on peut observer des ombres sur le sol ( $E > 120 \text{ W}/\text{m}^2$ ), les météorologistes parlent de radiation directe à laquelle est sensible l'héliographe. La somme de ces périodes représente la durée d'insolation journalière permettant de définir la fraction d'insolation. Dans l'héliographe de Campbell-Stokes, une sphère de verre concentre le rayonnement direct en un point qui brûle un papier spécial. En se déplaçant le point brûlé décrit le mouvement apparent du soleil en traçant une courbe dont la longueur est proportionnel à la durée d'insolation. L'héliographe de Jordan utilise du papier photographique. On utilise maintenant des héliographes automatiques constitués de cellules Photovoltaïques disposées sur une bande cylindrique dont l'axe est perpendiculaire au plan de la trajectoire apparente du soleil. Un dispositif électronique totalise les intervalles de temps d'enseillement ; il faut veiller à ce que chaque héliographe ait le même seuil, c'est-à-dire l'éclairement direct minimal enregistré [4].



Figure 12: Héliographe [6]

➤ **Le pyréliomètre :**

Les pyréliomètres mesurent le rayonnement direct. Ils comportent une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à  $5.7^\circ$  (le diamètre apparent du soleil est de  $0.5^\circ$ ). Le tube est fixé sur une monture équatoriale. On mesure la température du disque d'argent à intervalles réguliers en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil [4].



Figure 13: Pyréliomètre [6]

## 15.2. Mesure de la vitesse et de la direction du vent:

### ➤ Anémomètre

L'anémomètre est un instrument destiné à la détermination de la vitesse du vent [4].



Figure 14 : Anémomètre [6]

### ➤ Girouette

Dispositif généralement métallique, la plupart du temps installé sur un toit, constitué d'un élément rotatif monté sur un axe vertical fixe. Sa fonction est de montrer la direction du vent [4].



Figure 15 : Girouette [6]

### ➤ Capteur de température

Il sert à de déterminer la température de l'air sous abri.



Figure 16 : Capteur de température [6]

Ces appareils de mesure sont installées au niveau de l'unité de recherche des énergies renouvelables en milieu saharien à Adrar par l'équipe de gisement solaire (Division conversion photovoltaïque), cette équipe est chargée de la collecte, de l'exploitation et du traitement des données météorologiques nécessaires à l'évaluation du gisement solaire [4].



Figure 17 : Station de mesure de rayonnement solaire [6]

- 1 : Pyranomètre à inclinaison optimale (rayonnement global sur un plan à inclinaison optimale)
- 2 : sonde de température (température de l'air sous abri)
- 3 : Pyranomètre incliné à la latitude du lieu (rayonnement global sur un plan incliné à la latitude de Adrar (27.88°))
- 4 : Pyranomètre horizontal (rayonnement global sur un plan horizontal)
- 5 : Pyrliomètre (rayonnement direct)
- 6 : Pyranomètre avec pare-soleil (rayonnement diffus)

**16. Estimation de l'énergie instantanée (ciel clair) :**

Les puissances du rayonnement direct  $E_S$ , diffus  $E_D$  et global  $E_G$  reçues par un capteur ( $\alpha, \gamma$ ) incliné de  $\beta$  par rapport au plan horizontal sont donnés par les relations suivantes [5,11] :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_S = A \cos(i) e^{-\frac{1}{B \cdot \sin((h)+2)}} \\ E_D = \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) D_H + \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) a^* G_H \\ E_G = E_S + E_D \end{array} \right. \quad \text{Avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} D_H = A' (\sin(h))^{0,4} \\ G_H = A'' (\sin(h))^B \end{array} \right.$$

$$[ES] = [ED] = [EG] = W/m^2.$$

DH : éclairement diffus reçu par une surface horizontale.

GH : éclairement global reçu par une surface horizontale.

$a^*$  : l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$a^* = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 \text{ neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 \text{ sol clair,} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 \text{ verdure} \end{cases}$$

Tableau 1: Les constantes caractéristiques l'état de l'atmosphère

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncée	1300	6	87	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	2.5	187	990	1.25

**17. Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert):**

Le ciel couvert est un ciel gris totalement rempli de couches nuageuses, plus ou moins denses optiquement, mais au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire, dans ces conditions le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que de rayonnement diffus [5,11].

Si la couverture nuageuse est homogène on peut considérer que le rayonnement diffus du ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol.

Le rayonnement global par le ciel couvert est [5,12] :

$$EG' = ED' = K EG (1 + 0.3 \sin h) \tag{24}$$

Avec :

K=0.6 pour le ciel bleu foncée.

K=0.3 pour le ciel bleu clair.

K=0.15 pour le ciel bleu laiteux.

A titre d'exemple pour le site de Tlemcen on prend le cas de ciel clair (k=0.3).

**18. Estimation d'énergie journalière incidente:**

L'énergie journalière reçue par un capteur plan quelconque dépend en générale de la latitude des couches atmosphériques et des conditions météorologique est donnée par [5,12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{JS} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_S \\ E_{JD} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_D \\ E_{JG} = \frac{1}{K} \Delta T \sum_K E_G \end{array} \right.$$

$E$  : l'énergie instantanée (directe, diffus, globale) incidente sur le capteur.

$K$  : le nombre d'intervalle entre le lever et le coucher sur le capteur.

$\Delta T$ : la différence entre le temps du lever et du coucher sur le capteur.

$EJ$  : l'énergie journalière (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

### 19. Estimation d'énergie annuelle incidente:

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est déterminée par un programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières [5,12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{aS} = \sum_1^N E_{JS} \\ E_{aD} = \sum_1^N E_{JD} \\ E_{aG} = \sum_1^N E_{JG} \end{array} \right.$$

$E_a$  : L'énergie annuelle (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

### 20. Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons décrit en premier temps le mouvement terre-soleil à chaque instant de la journée et de l'année. L'étude de ce mouvement est nécessaire pour déterminer l'orientation d'un capteur pour un site donné.

Ensuite nous avons présenté brièvement les atténuations du rayonnement solaire et les paramètres essentiels à l'estimation des énergies captées par les systèmes PV, le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.



**21. Références:**

- [1] [www.worldtravelguide.net/Algeria/weather-climate-geography](http://www.worldtravelguide.net/Algeria/weather-climate-geography).
- [2] Benbouza Naima, « Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna », Université de Batna, 2008.
- [3] Cheknane Ali et M. Rougab Ilyes ; « Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications », Université Amar Telidji. Laghouat.
- [4] Alain Ricaud; « Gisement solaire et transferts énergétiques », Université de Cery-Pontoise 2011.
- [5] F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen. Juillet 2004.
- [6] Maouedj Rachid; « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd. 2005.
- [7] Michel Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie», tome 1,2; O.P.U. 1986.
- [8] J. M. Chassériaux, « Conversion thermique du rayonnement solaire », bordas Paris.1984.
- [9] F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen. Juillet 2004.
- [10] M. Capderou, « Atlas Solaire de l'Algérie », Tome1, Vol 1 : Modèles théoriques et Expérimentaux, Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [11] M M. Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie », Tome 2, OPU, 1986.
- [12] :P.De Brichambaut « Evaluation énergétique d'un gisement solaire », Tec et Doc ,1984.

# **CHAPITRE II**

## **L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE**

## **1. Introduction**

L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité c'est l'énergie photovoltaïque [1].

Abondante, inépuisable et non polluante, ce sont ces caractéristiques qui ont suscité l'intérêt à ce type d'énergie, malgré le cout d'exploitation lourd au départ (couts de l'installation que ce soit photovoltaïque, thermique ou hybride), qui fait qu'elle n'est pas totalement gratuite. L'utilisation de cette énergie nécessite une certaine connaissance [1].

## **2. Histoire de l'énergie solaire**

En 212 avant JC, Archimède a utilisé le soleil pour arrêter la flotte romaine en se servant des miroirs en bronze poli. Avec ces miroirs il a réussi à mettre le feu à la flotte à distance. L'humanité connaît la force du soleil depuis toujours et il est intéressant d'observer comment l'utilisation d'énergie provenant du soleil a évolué [2].

En 1839 la transformation de la lumière du soleil en courant électrique. Elle a été découverte par Antoine-César Becquerel [2].

Au XIXe siècle, quelques moteurs à miroirs ont été construits. Mais même malgré la découverte de l'effet du sélénium photovoltaïque en 1877 il faudra attendre jusqu'en 1955 que les chercheurs de Bell Telephone Laboratories (aux Etats-Unis) soient capables de produire la cellule qui avait le rendement de conversion énergétique au moins 6% (ratio entre l'énergie utilisée pendant la fabrication et l'énergie que le système est capable de produire) [2].

Enfin pour pouvoir annoncer la naissance de la photopile solaire. Cet effet a surtout été utilisé pendant les exploitations dans l'univers qui elles aussi commençaient à se développer. Mais en exploitant toujours de plus en plus le charbon, le pétrole et développant l'énergie nucléaire les industriels ne se sont pas sérieusement intéressés aux possibilités de l'énergie solaire avant la crise pétrolier de 1973[2].

Les années 70 peuvent être considérées comme le berceau de l'énergie solaire (photovoltaïque). La notion « photovoltaïque » provient du mot grec [phos] = lumière et du nom d'un physicien italien Alessandro Volta. Ensuite, c'est l'augmentation de la consommation mondiale de l'énergie et la diminution des réserves mondiales de pétrole et de charbon qui a amené de nouveau à développer et utiliser des sources renouvelables pour fournir de l'énergie. Cette augmentation de besoins et d'exigences énergétiques est due aux

changements démographiques, à la croissance industrielle et au développement du commerce. [2].

### **3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire :**

#### **c. Les avantages :**

- ❖ L'énergie solaire est une excellente source d'énergie alternative, car il n'y a pas de pollution générée pendant qu'elle est utilisée [3].
- ❖ Les installations solaires sont facilement modulables. Il est assez facile d'augmenter ou de diminuer la taille de l'installation [3].
- ❖ Une installation solaire peut s'implanter n'importe où dès qu'il y a un ensoleillement suffisant. C'est donc un réel avantage pour les endroits très isolés qui ont ainsi accès à l'électricité [3].
- ❖ Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles [3].
- ❖ Une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- ❖ Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication [4].

#### **d. Les inconvénients**

- ❖ installations industrielles
- ❖ Un système solaire coûte cher à son installation.
- ❖ Un système solaire nécessite un ensoleillement constant et intense surtout pour l'usage commercial. Beaucoup d'endroits dans le monde ne bénéficient pas d'ensoleillement suffisant pour assurer une rentabilité de l'installation [4].

### **4. Le fonctionnement des panneaux solaires**

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.

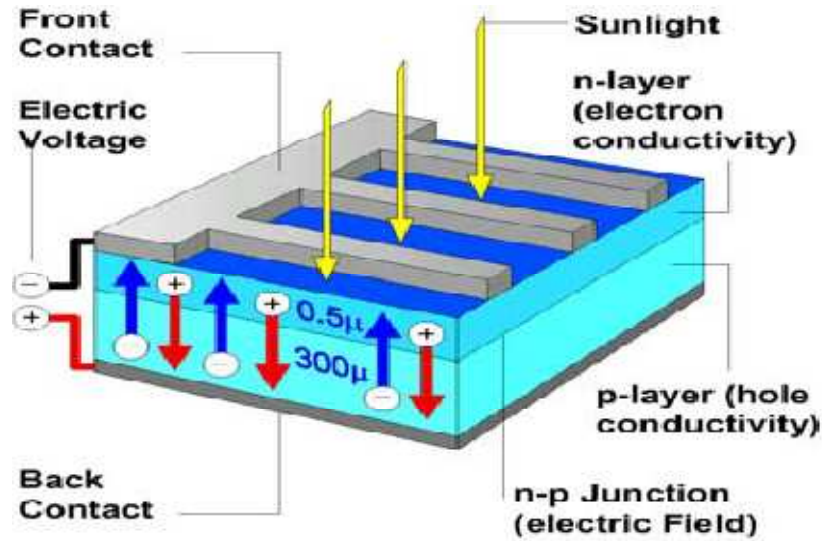


Figure 1: Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés P (positif) et N (négatif), dénommé comme jonction P-N (ou N-P). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face inférieure [5].

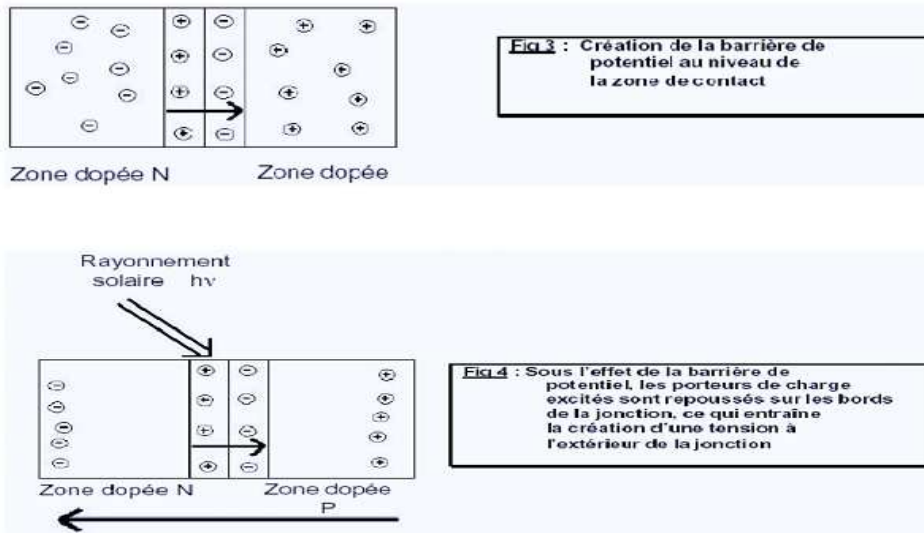


Figure 2 : Plaque photovoltaïque (Mouvement de déplacement des électrons) [6].

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. La figure 3 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [7].

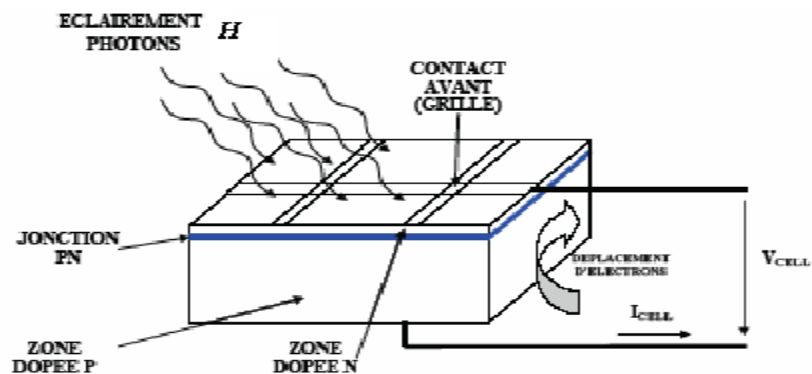


Figure 3 : Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque

## 5. La Technologie Photovoltaïque

### 5.1. 1<sup>ère</sup> génération: Silicium cristallin (mono et poly)

Cette génération de cellule repose sur les wafers (fine tranches) de silicium cristallin. Ces wafers sont sciés dans des lingots de silicium. Ces lingots sont le résultat d'un processus de purification de manière à obtenir un matériau contenant 99.99999% de Silicium [7].

Les cellules cristallines se subdivisent en 2 catégories : mono- et poly- cristalline selon le type de structure. Ces deux types de cellules proviennent de procédé de purification et de solidification différents (processus Czochralski (Cz) et processus Siemens). Les procédés de purification Cz et Siemens ont des structures d'approvisionnement différentes et sont généralement réalisées par des industries différentes [7].

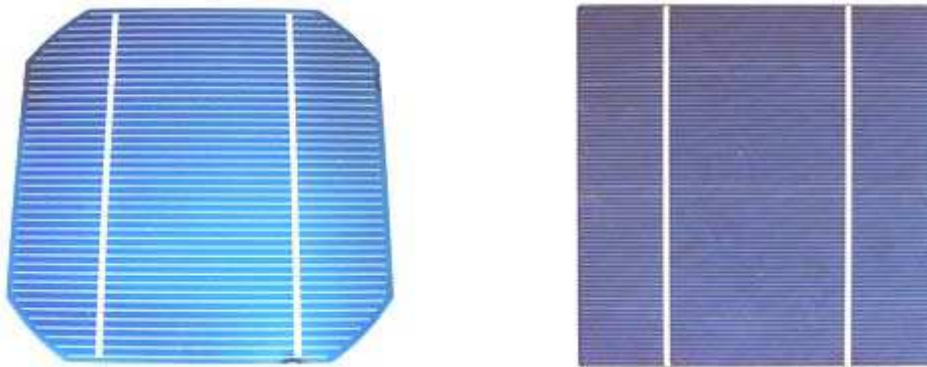


Figure 4: Cellule mono cristalline et poly cristalline

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Les cellules poly-cristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe [8]. Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 12% à 14% (poly-cristallin) et de 13% à 19% (monocristallin), au niveau des modules commerciaux les plus largement utilisés [8].

### 5.2. 2<sup>ème</sup> génération: CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi conducteurs en couches minces (*thin film*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapeur De position) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération [8].

Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse), on distingue [8].

**CdTe** : Cadmium Telluride (telluride de cadmium)

**CIS / CIGS**: Copper Indium Gallium Selenide

Silicium en couche mince : silicium amorphe  $\alpha$ Si et microcristallin.

Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% ( $\alpha$ Si) à 5 à 11% (CdTe) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules). A noter que le tellurure de cadmium est un alliage de métal lourd, très toxique, et peut –tout comme le plomb ou le mercure- se concentrer dans la chaîne alimentaire. L'UE en a interdit l'usage pour les appareils électriques... exception faite pour les cellules PV [8].

### 5.3. Technologies photo-électro-chimiques (DyeSensitisedCell et Organic PV)

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types:

- Les cellules photovoltaïques organiques moléculaires
- Les cellules photovoltaïques organiques en polymère [8].



#### 5.4. Procédé de fabrication :

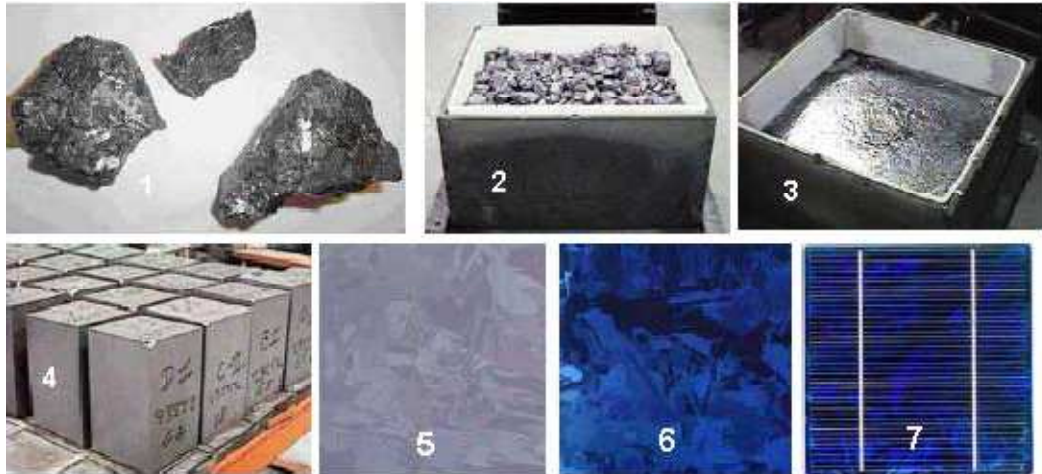


Figure 5 : Etapes de fabrication des cellules :

- (1) minerai de Silicium
- (2) raffinage (pour augmenter la pureté)
- (3) Silicium en fusion donnant des lingots
- (4) après solidification
- (5) wafer obtenu par sciage du lingot
- (6) traitement de surface par procédés physico chimiques
- (7) cellule finie avec électrodes

#### 5.5. Modules et cellules photovoltaïques

##### ❖ Association des cellules

Afin d'obtenir des modules de puissances élevées, les cellules sont associées en série ou en série / parallèle. Pour cela les connexions des pôles négatives situées sur les faces avant des cellules sont connectées aux pôles positifs situés sur les faces arrière des cellules suivantes.

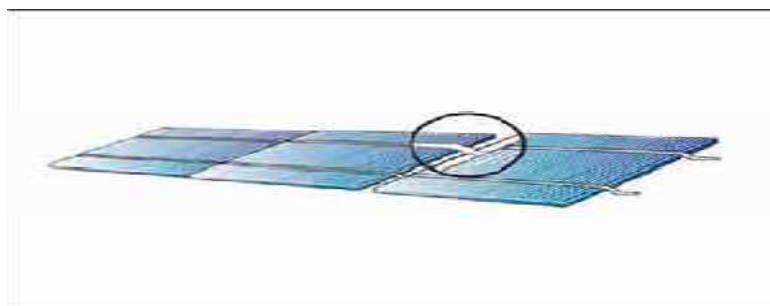


Figure 6 : Association des cellules

Le module photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Il joue donc le rôle de générateur dans le système photovoltaïque. L'énergie produite par un module photovoltaïque dépend du niveau du rayonnement solaire. Ainsi, durant la journée, l'énergie produite va varier en fonction de la variation du rayonnement solaire.

Le module photovoltaïque est obtenu après association des cellules avec les éléments constitutifs ci-après :

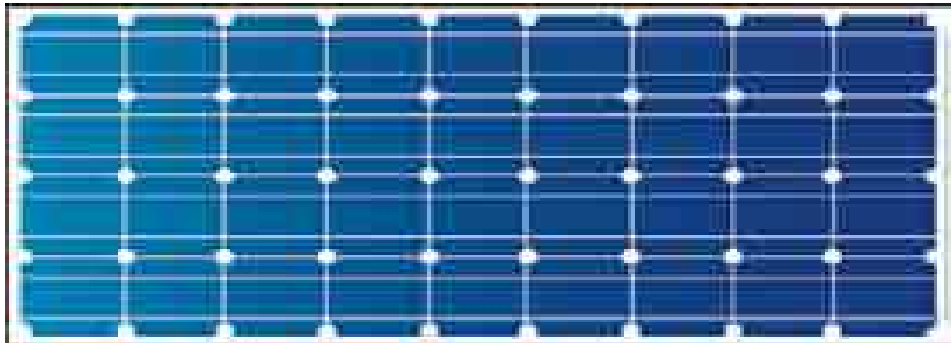


Figure 7 : Le module photovoltaïque

### Constitution d'un module

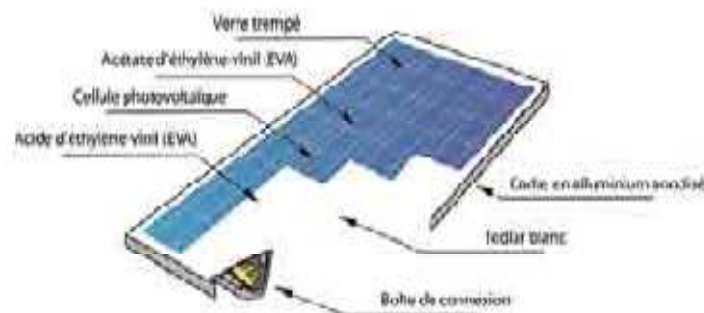


Figure 8: Constitution d'un module photovoltaïque

Un module est constitué des cellules associées en série/parallèle encapsulées et protégées en face avant du module.

La face avant du module doit être en verre ayant les caractéristiques suivantes :

- Bonne transparence
- Résistance à l'impact et à l'abrasion (grêle, jet de pierres, vent de sable, nettoyage au chiffon).
- Etanchéité à l'humidité.

**L'enrobage des cellules ayant les caractéristiques suivantes :**

- Transparence (à l'avant)
- Souplesse pour «enrober» les cellules et connexions.
- Adéquation aux indices optiques du verre et des cellules.

Le matériau généralement utilisé est de l'Acétate d'éthylène-vinyl (EVA).

**En Face arrière, un matériau ayant les caractéristiques suivantes :**

- Protection mécanique contre le poinçonnement et les chocs (risque de mise à nu et de bris des cellules).
- Etanchéité à l'humidité.
- Bonne évacuation de la chaleur.
- La face arrière est généralement réalisée soit en verre (modules dits «bi-verre») soit en composite tedlar/alu/tedlar (plus fragile).

**Un Boîtier de connexion qui permet :**

- Le repérage des sorties (+, -, éventuellement point milieu),
- La connexion et le passage des câbles de liaison,
- Le logement des diodes de protection,
- L'étanchéité à l'humidité.

**Un joint périphérique**

Il évite les pénétrations d'humidité entre la face avant et la face arrière [10].

**Un cadre**

- Il permet le montage et la fixation mécanique, tout en participant si nécessaire à la rigidité du module. Il doit résister à la corrosion (inox, aluminium...) et la visserie doit être choisie afin d'éviter des problèmes de corrosion.
- Le cadre est généralement en aluminium ou en aluminium anodisé avec une visserie en matériau inoxydable [10].

**5.6. Critères de choix d'une installation solaire**

a-Installation du régulateur de charge

b-Installation de la batterie

c-Installations intérieures (câblage)

**5.7. Système d'énergie solaire**

- ❖ Définition d'un système d'énergie solaire :

Le système solaire est un système constitué d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie solaire reçue, directement ou indirectement en énergie électrique [11].

Il existe deux différents types de systèmes solaires :

- A- **Le système solaire à conversion directe** : Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique avec l'utilisation d'une seule technologie nommée PHOTOPILE (effet physique de certains matériaux « l'effet photovoltaïque ») [11].
- B- **Le système solaire à conversion indirecte** : Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique avec l'intermédiaire de deux technologies au minimum [11].

5.8. Applications

5.8.1 Pompage photovoltaïque

Définition générale du système de pompage d'eau:

La différence entre un système de pompage solaire et un système de pompage classique est l'utilisation de panneaux photovoltaïques, d'un convertisseur et d'une pompe adéquate.

Les pompes utilisées peuvent être de surfaces ou immergées selon la condition d'utilisation :

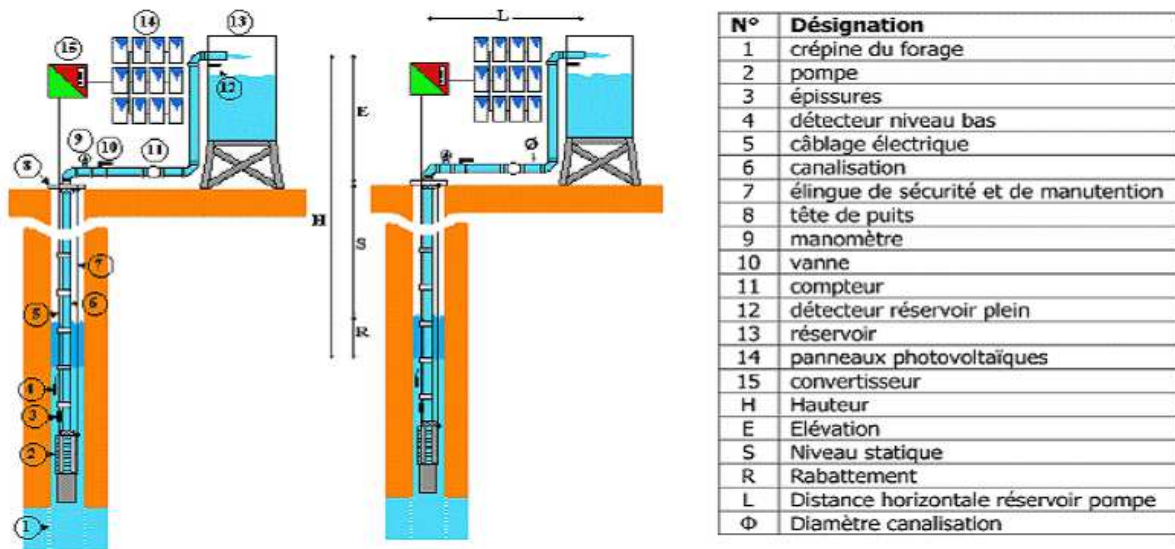


Figure 9 : Schéma de principe du système de pompage d'eau.

Le pompage photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, le pompage sans batterie, plus communément appelée « pompage au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [12].

**a. le pompage avec batterie** permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe. L'utilisation des batteries influe sur le coût global du système [12].

Les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent en outre un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie [12].

**b. Le pompage au fil du soleil** permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours [12].

Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement.

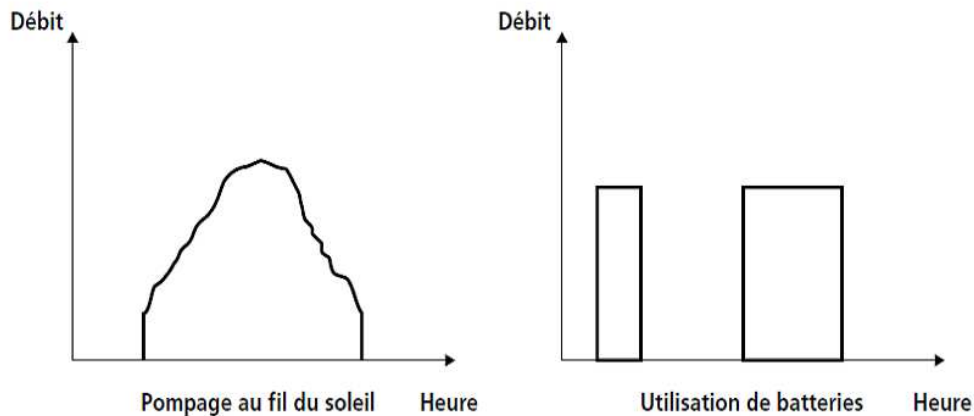


Figure 10 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie.

Compte tenu du coût additionnel du système avec batterie, des problèmes de maintenance des batteries et de l'obligation de les remplacer après 3 à 5 ans d'usage, la solution au fil du soleil est présentement préférée. Néanmoins, celle-ci présente certains inconvénients qu'il ne faut pas négliger :

- Il est impossible de pomper au-dessous d'un certain niveau d'éclairement, la pompe ne pouvant être amorcée sous une certaine puissance fournie. Il y a donc perte d'énergie au début et à la fin de la journée [12].
- Parce que le rendement des pompes diminue en dehors de leur puissance nominale de fonctionnement, le système nécessitera l'utilisation d'un adaptateur de charge. Ceci est particulièrement nécessaire pour les pompes volumétriques [12].
- Le débit de la pompe ne sera pas constant et le rabattement du puits ou du forage peut être trop élevé durant certaines périodes de la journée [12].

### **5.8.2. Eclairage photovoltaïque**

-Le principe

Un capteur solaire, placé sur le toit, reçoit la lumière du soleil et la convertit en électricité. Cette électricité est une tension continue d'une vingtaine de volts, qui varie en fonction des conditions d'éclairement : plus il y a de lumière, plus on produit d'énergie. Bien entendu, la nuit la production est arrêtée.

L'énergie du panneau est envoyée à un régulateur qui la transforme en une tension stable de 12 volts.

Les 12 volts du régulateur sont utilisés pour charger une batterie qui accumule l'énergie au fur et à mesure de sa production.

Le régulateur joue également un rôle de distributeur, il délivre 12 volts pour la consommation mais c'est lui qui détermine d'où vient l'énergie : soit directement du panneau (si il y a de la lumière) soit de la batterie si le panneau ne produit pas (la nuit par exemple) [14].

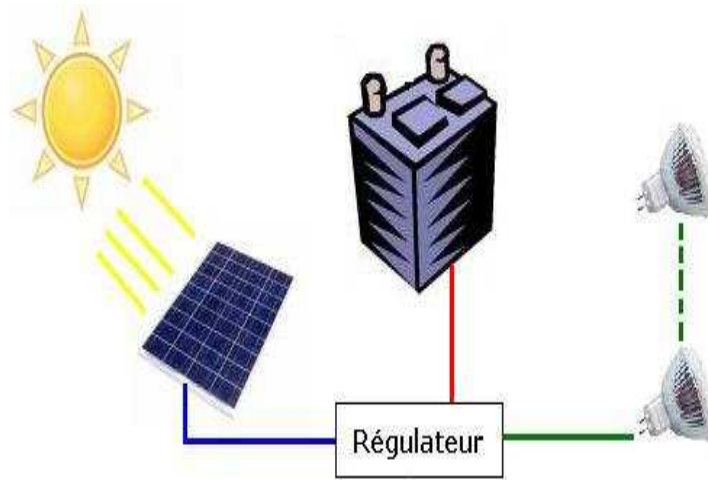


Figure 11: principe de photovoltaïque

## 6. Les paramètres qui influent sur le rendement d'un panneau solaire

### 6.1. Influence de la température sur le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La figure montre l'influence de la température, sur la caractéristique  $I(V)$  de la cellule solaire lorsque la température varie.

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant de court circuit ( $I_{cc}$ ), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert ( $V_{CO}$ ). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension ( $V_m$ ) et un léger accroissement du courant ( $I_m$ ) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale ( $P_m$ ) [15].

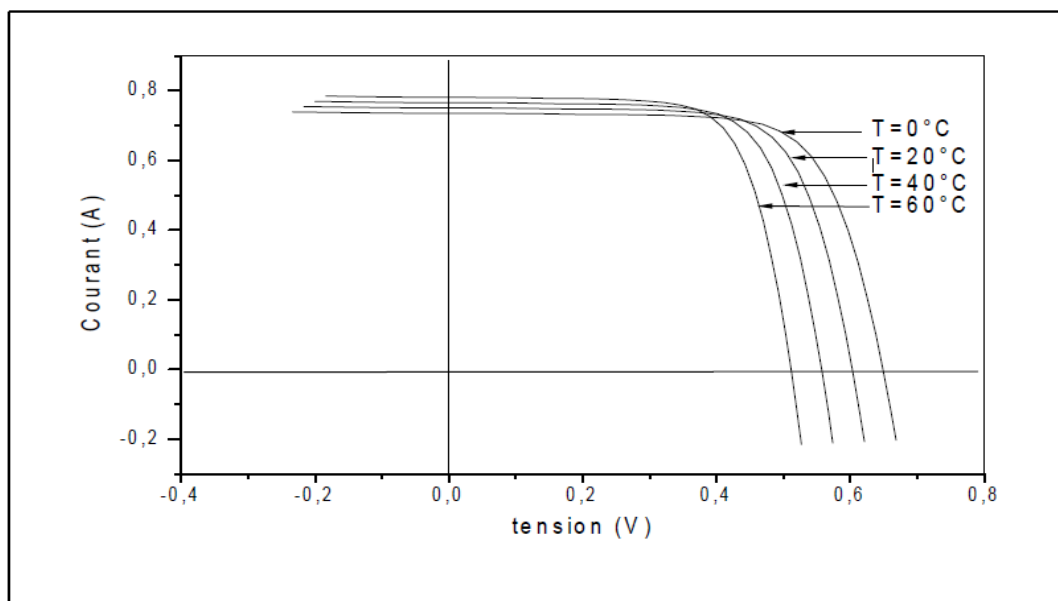


Figure12 : Influence de la température sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire [15]

## 6.2. Influence de l'intensité de la radiation lumineuse

Présente les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de  $(10 \times 10)$  cm<sup>2</sup> pour plusieurs intensités du rayonnement solaire. On remarque que le courant du court circuit  $I_{CC}$  est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente; la variation de  $I_{CC}$  avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante :

$$I_{CC} \approx I_{ph} = \alpha(T) \times E \times S \quad (1)$$

Où

- ❖  $E$ : est l'éclairement en W/m<sup>2</sup>.
- ❖  $S$ : est la surface de la cellule en m<sup>2</sup>.
- ❖  $\alpha(T)$ : coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  [15].

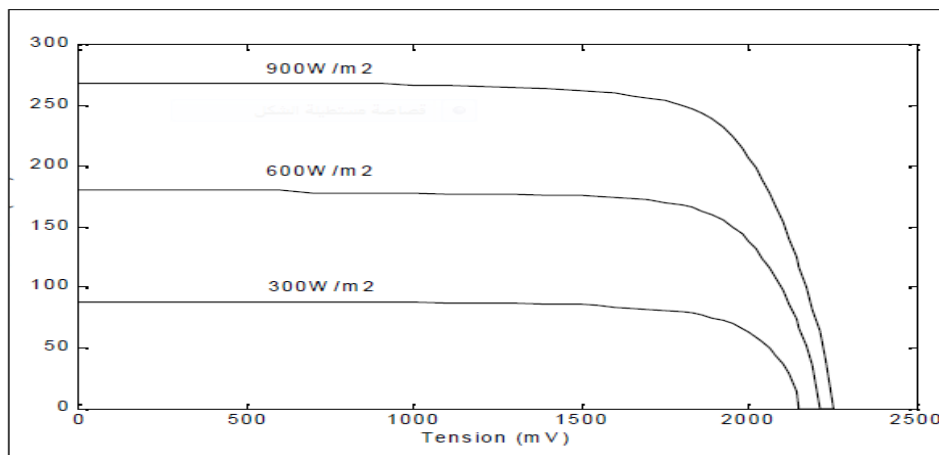


Figure 13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V d'une cellule solaire [15]

## 7. Les différents types des systèmes énergétiques solaires

### 7.1. Système photovoltaïque autonome.

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Ils peuvent comporter des accumulateurs – qui emmagasinent l'énergie produite par les modules au cours de la journée – servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins d'une application (par exemple, le pompage de l'eau) sans recours aux accumulateurs.

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut tout de même opter pour un système



hybride pour des raisons environnementales ou parce qu'on a besoin d'un système fiable ou qui fonctionne sans être relié à un réseau [15].

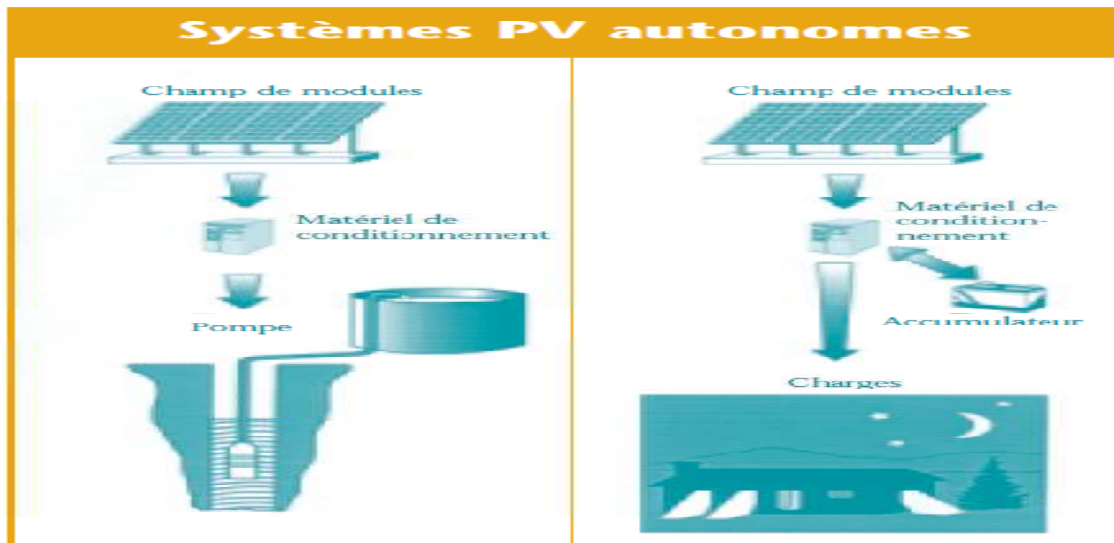


Figure 14: Système autonome [16]

### 7.2. Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau. Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement [15].

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité (sinusoïdale) [15].

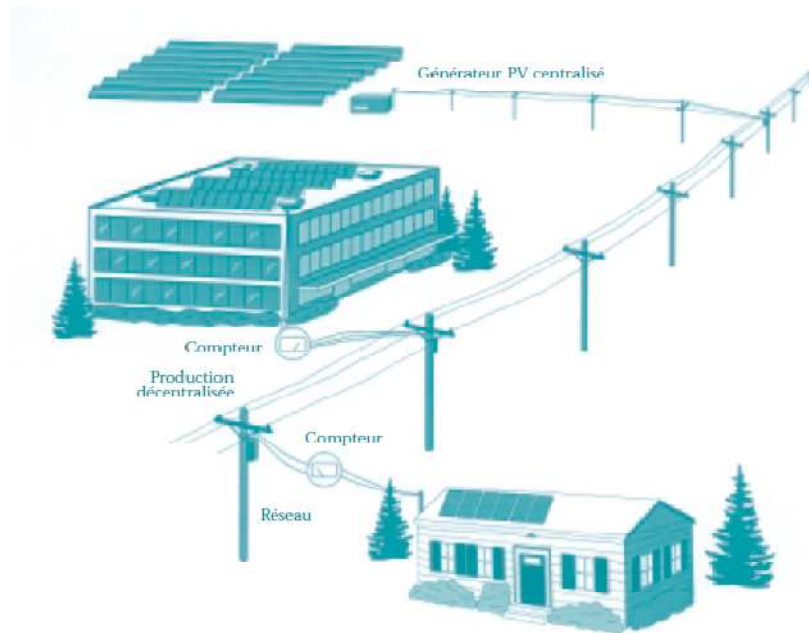


Figure 15 : Système photovoltaïque raccordée au réseau électrique [16]

## 8. Conclusion:

Dans ce chapitre nous pouvons dire que la conversion photovoltaïque base sur la qualité du matériau utilisé dans la fabrication d'une cellule.

Les systèmes photovoltaïque sont composé par deux types qui sont l'autonome et le raccordé au réseau.

## 9. Références :

[1] Benbouza Chaouki, " Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie ", Université Constantine1 faculté des sciences de l'ingénieur département de génie climatique, 2014.

[2] Monika kokrdova, " L'énergie solaire", université palackého v olomouci filozofická fakulta 2011.

[3] <http://www.energiesrenouvelable.fr/energie-solaire.php>.

[4] <http://unblogsurlaterre.com>.

[5] " Le photovoltaïque fonctionnement et technologies ". IBGE- Institut Bruxellois Pour La Gestion De L'Environnement. Novembre 2010.

[6] Chapitre I : Gisement solaire.

<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf>

[7] Benhachani Zohra, " Elaboration d'un modèle de dimensionnement d'un système hybride (solaire-éolien) alimentant une ferme dans la région des Aures", Université Hadj Lakhdar, Batna, 2011.

[8][http://document.environnement.brussels/opac\\_css/elecfile/IF%20ENERGIE%20Mod3%20Fonctionnement%20technologies%20PV%20FR](http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/IF%20ENERGIE%20Mod3%20Fonctionnement%20technologies%20PV%20FR)

[9] Cécile Miquel, "Systèmes photovoltaïques, fabrication et impact environnemental", Juillet 2009.

[10] Mansour Assani Dahouénon, technicien-photovoltaïque, 2011

[11] Ameziane Sadek, "Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien", Université de Batna ,2009.

[12] Lary Ligring; " Étude pour la mise en place du système de pompage solaire d'un champ de neuf hectare pour une irrigation goutte à goutte a Seheba au Tchad ". Mémoire de Master. Institut International d'Ingénierie. Ouagadougou. BURKINA FASO.

[13][http://www.solener.com/pregunta\\_f.html#Preg15](http://www.solener.com/pregunta_f.html#Preg15).

[14] Cuisine-facile.com

[15] Anne Labouret et Michel Viloz ; " Energie solaire photovoltaïque ". Série environnement et sécurité. Edition le monteur.

[16] " Les systèmes Photovoltaïques, Guide de l'acheteur ". ISBN : 0-662-86306-2. Canada.

# **CHAPITRE III**

## **L'ENERGIE SOLAIRE THERMIQUE**

## 1. Introduction

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.) ou indirectement (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.) [1].

Le capteur solaire est l'instrument utilisé pour transformer le rayonnement solaire en chaleur. Les principes physiques fondamentaux sur lesquels se basent cette production d'énergie sont notamment l'absorption, et la conduction thermique [1].

## 2. La conversion photo thermique

La conversion thermique est le mode de conversion qui transforme l'énergie solaire en chaleur. Cette conversion se fait à travers un capteur solaire ou capteur héliothermique. Dans certains cas, un fluide caloporteur (air, eau, huile...) est utilisé pour amener la chaleur produite au niveau du collecteur vers la distribution. Cette chaleur peut dans certains cas, être envoyée dans un stockeur avant d'être acheminée vers la distribution [2].

Le schéma ci-dessous résume les éléments qui peuvent intervenir dans le système de conversion :

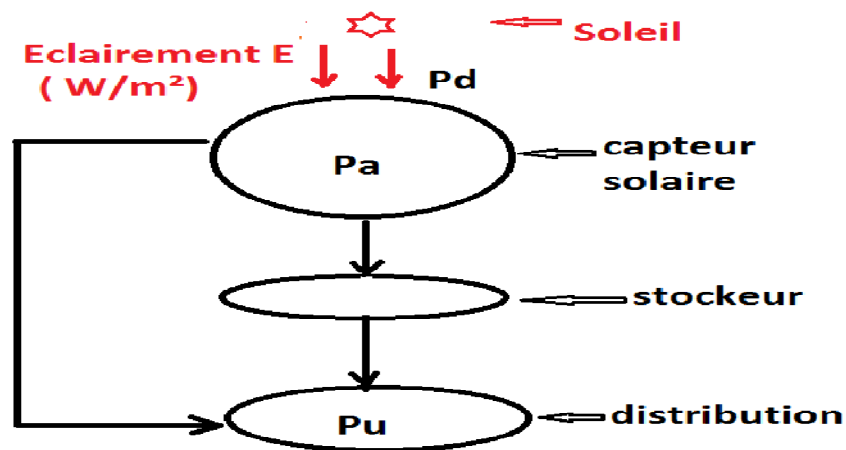


Figure 1 : Etapes de la conversion photo thermique

## 3. Type des capteurs solaires thermiques

**3.1. Le capteur solaire à eau:** Le capteur solaire thermique à eau est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant [2].

La figure représente le principe de fonctionnement d'un tel capteur

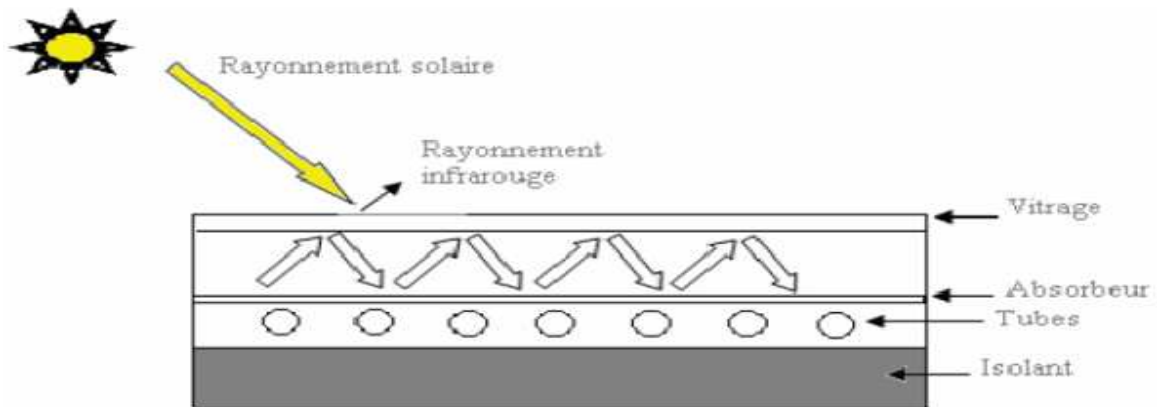


Figure 2.a: Capteur solaire thermique à eau, vue en coupe. Les conduits d'eau sont ici intégrés dans l'absorbeur

Le principe est le suivant : le rayonnement solaire, dont le spectre se situe essentiellement dans les longueurs d'onde du visible (courtes longueurs d'onde), passe à travers la couverture transparente (constituée ici d'un vitrage), et arrive à l'absorbeur, celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et réémet du rayonnement thermique vers l'extérieur (grande longueur d'onde). L'isolant permet de réduire les pertes thermiques du capteur [3].

On peut distinguer deux types de systèmes :

- Les systèmes à basse pression de circulation très simple, à eau chaude sans pression.
- Les systèmes à haute pression, à eau chaude à haute pression utilisant une pompe [3].

### 3.2. Le capteur solaire à air :

Contrairement au capteur à eau où le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en générale formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeurs plus faible que celui de l'eau [3].

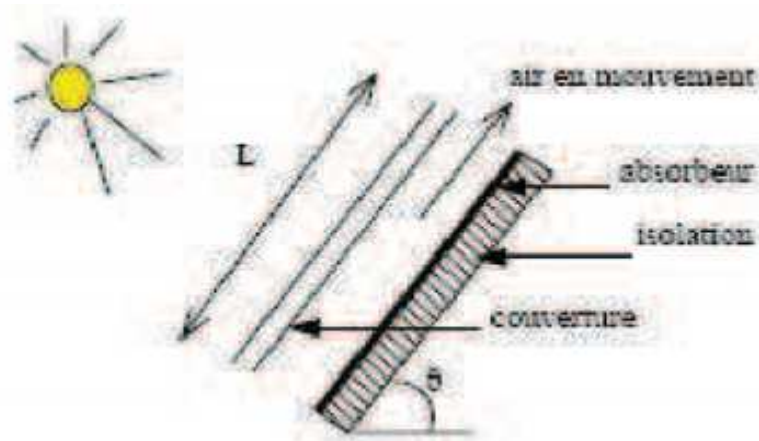


Figure 2.b: Capteur à air.

## 4. Applications

### 4.1. Les distillateurs solaires

La disponibilité de l'eau potable est aujourd'hui une préoccupation majeure de l'humanité. La terre est recouverte d'eau à 71%, mais 98% de ce volume à une concentration en sel trop élevée. Cette eau n'est donc pas potable. Elle ne peut pas non plus être utilisée dans l'irrigation ou dans l'industrie. La distillation permet de débarrasser l'eau impure non potable (eaux saumâtres tirées du sous-sol, eau de mer) de ses impuretés pour obtenir de l'eau potable [3].

Les distillateurs classiques utilisent les sources d'énergies thermiques habituelles, qui contribuent au réchauffement climatique [3].

#### 4.1.1 Les dispositifs de distillation pour le dessalement de l'eau saumâtre

On distingue les distillateurs à simple effet et les distillateurs à multiple effet [2].

##### 4.1.1. a. Les distillateurs à simple effet

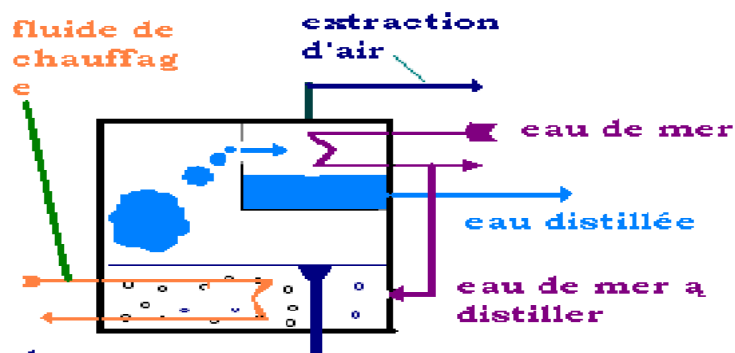


Figure 3: Distillateur à simple effet

## 4.1.1. b. Les distillateurs à multiple effet

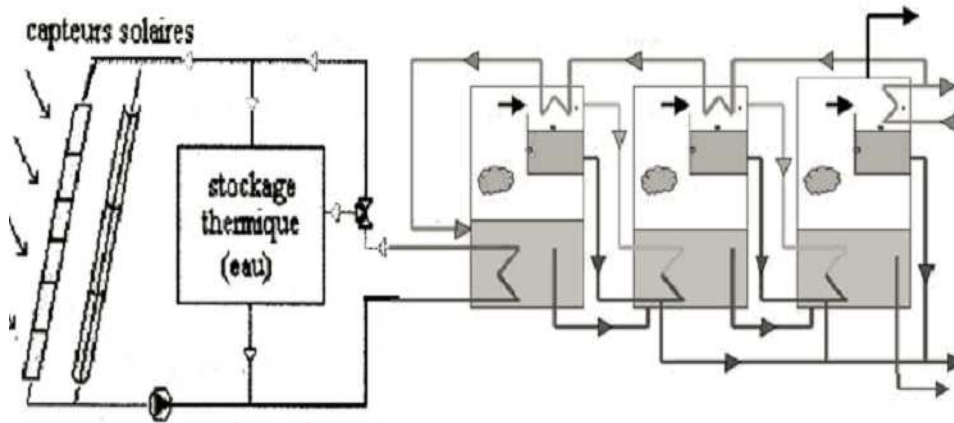


Figure 4 : Distillateur à multiple effet

## 4.1.2 Les distillateurs d'eau classiques

Les distillateurs solaires peuvent être à simple ou à multiple effet. Le couvercle vitré peut être plan ou sphérique [2].

- ✓ Un distillateur à simple effet est représenté ci-dessous. Le couvercle vitré sert de condenseur

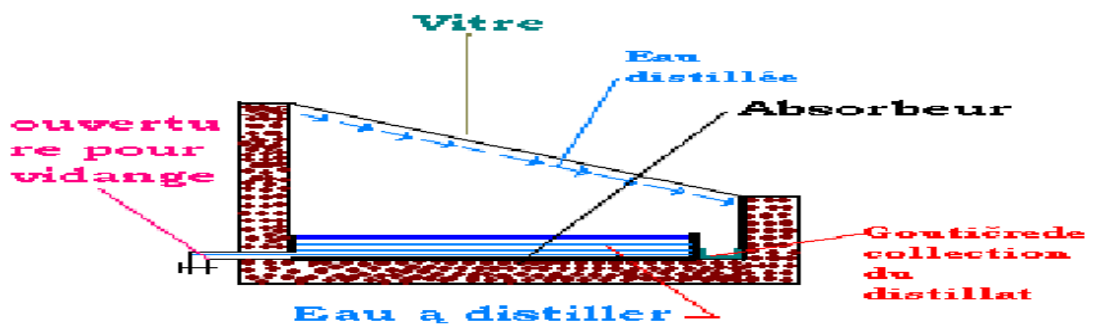


Figure 5: Distillateur solaire à simple effet à vitre plane

- ✓ Un distillateur à double compartiments est représenté ci-dessous. Il est adapté à la distillation alcoolique



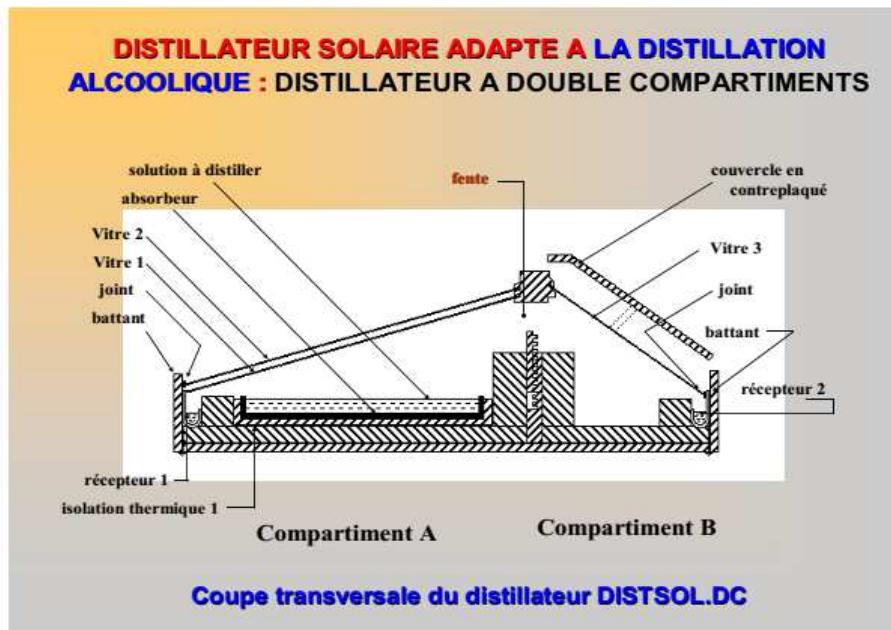


Figure6 : Coupe transversale du distillateur à double compartiments adapté à la distillation alcoolique [2]

✓ Un distillateur à vitre sphérique est représenté ci-dessous.

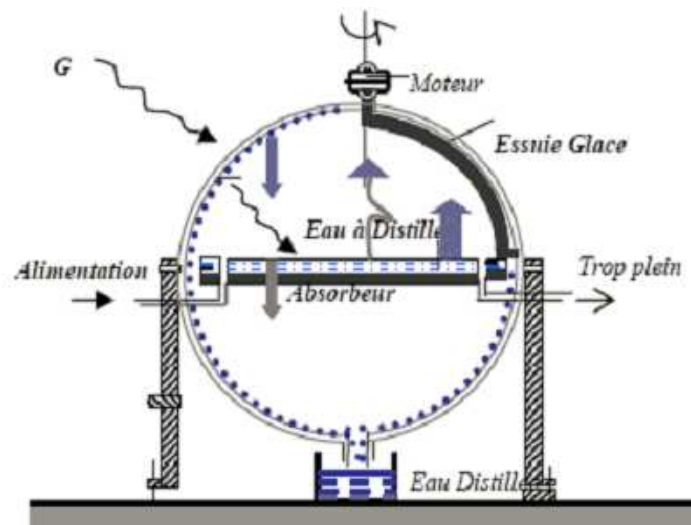


Figure 7: Distillateur solaire sphérique [2]

#### 4.2. Le chauffe-eau solaire

Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaires :

Dans certains cas, **la circulation du fluide caloporteur (l'eau) est naturelle** et le stockage est situé au-dessus du capteur solaire.

Le système comporte une boucle thermique avec **un échangeur** situé au cœur du ballon de stockage et le capteur est plan [2].

Dans d'autres cas, le ballon de stockage est situé au-dessous du capteur. Le système ne comporte alors ni boucle thermique, ni échangeur [2].

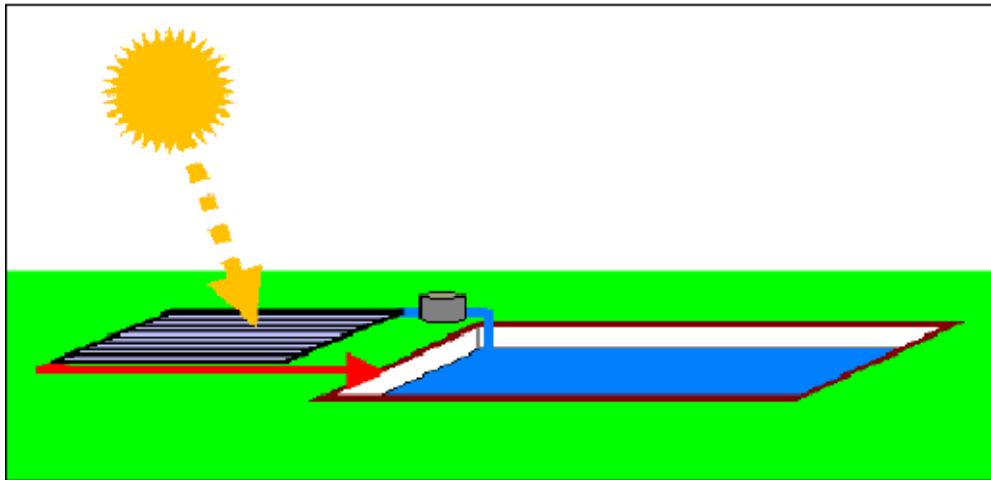


Figure 8 : Schéma de principe de la piscine solaire

### 4.3. Les séchoirs solaires :

Il existe deux types de séchoirs solaires

#### 4.3.1. Le séchoir solaire direct

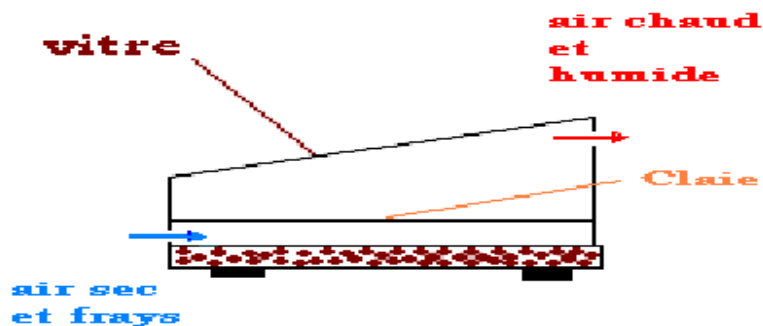


Figure 9 : Coupe d'un séchoir solaire direct

- Le séchoir solaire est généralement un capteur plan.
- La chaleur est transférée aux produits à sécher (qui sont installés sur les claies) par convection et par rayonnement [2].
- La circulation d'air dans le séchoir se fait par thermosiphon (tirage naturel) [2].

## 4.3.2. Les séchoirs solaires indirects

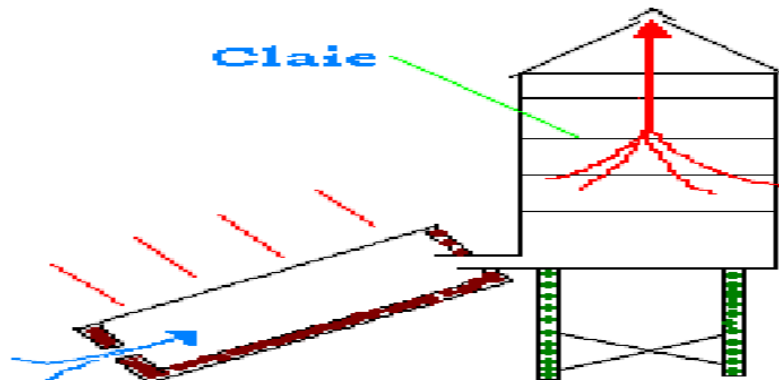


Figure 10 : Schéma du séchoir solaire indirect

-Le capteur solaire (générateur d'air chaud) et la cellule de dessiccation sont séparés par une conduite [2].

-Le tirage de l'air chaud est soit naturel (effet de cheminée), soit forcé (utilisation d'une pompe ou d'un ventilateur) [2].

**5. Conclusion:**

Le troisième chapitre est consacré en premier lieu à la définition de l'énergie solaire thermique et aussi à la description des différentes applications de l'énergie solaire thermique et leurs principes de fonctionnement.

**6. Références**

[1] Énergie solaire thermique. [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie\\_solaire\\_thermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_thermique)

[2] Siaka Toure;" Les Applications du Solaire Thermique Basse Température ", Laboratoire d'Énergie Solaire, Université Félix Houphouët-Boigny Abidjan Cocody Côte d'Voire, 25-27 juin 2015 OUAGADOUGOU.

[3] [Chapitre I : Gisement solaire.](#)

<http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf>

# **CHAPITRE IV**

## **TRAITEMENT DES DONNEES ET INTERPRETATION DES RESULTATS**

## 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 testes.

## 2. Description du système PV/T

Nous avons réalisé un prototype, un capteur hybride photovoltaïque thermique à l'équipe de Potentialité Energétique Solaire et Eolienne EPSE à l'Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu.

Ce capteur hybride de nouvelle conception est constitué essentiellement d'un module photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 » en technologie monocristallin et un vitre avec une épaisseur de 4 mm collé 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 absorbé par les cellules solaires.

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

- Panneau photovoltaïque « Isophoton I-75/12 ».
- Boîte de jonction qui contient les deux pôles (+ et le -).
- Une plaque de verre est collée dans le cadre (en acier) du panneau par la silicone.
- 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.

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

Le tableau suivant présente les dimensions du capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude expérimentale :

Tableau 1 : Dimensions du capteur solaire hybride PV/T

Longueur	1224,0 mm
Largeur	545.0 mm
Epaisseur	39.5 mm

## 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 1 : Photos du prototype de capteur PV/T étudié

### 3.1. Panneau photovoltaïque

Panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 ».



Figure 2 : Photos du panneau photovoltaïque de type « Isophoton I-75/12 »

Tableau 2 : Caractéristiques du module solaire « Isophoton I-75/12 ».

Caractéristiques électriques	
Puissance maximale Pmax (Wc)	75
Courant de court-circuit Icc (A).	4,67
Tension en circuit ouvert Voc (V)	21,6
Courant Optimum Iop(A)	4,34
Courant Optimum Iop(A)	17,3
Coefficients de température	
Coefficient de la variation du courant en fonction de la température	0.06 %/ °c
Coefficient de la variation de la tension en fonction de la température	0.36 %/°c
Caractéristiques mécaniques	
Type de cellules	monocristallin
Nombre de cellules	36
Dimensions	1224,0 × 545.0 × 39.5mm (21,5 × 48,2 × 1,6 pouces)
Poids	9,0 kg

### 3.2. Acquisition de données

Nous avons utilisé une acquisition de données de type FLUKE Hydra data logger.



Figure 3 : Photos de l'acquisition de données de type FLUKE

### 3.3. Thermocouple de type « K »

Le thermocouple de type « K » pour mesurer les températures :

- Température de la face arrière du premier panneau
- Température du deuxième panneau constituant le capteur hybride.
- Température de l'eau à l'entrée du capteur hybride.
- Température à la sortie du capteur hybride.
- Température de la vitre du capteur hybride.





Figure 4 : Photos des thermocouples de type « K »

### 3.4. Capteur de courant et capteur de tension

Un capteur de courant pour mesurer le courant électrique à la sortie du panneau PV et le capteur hybride.

Un capteur de tension pour mesurer la tension aux bornes du panneau PV et le capteur hybride.

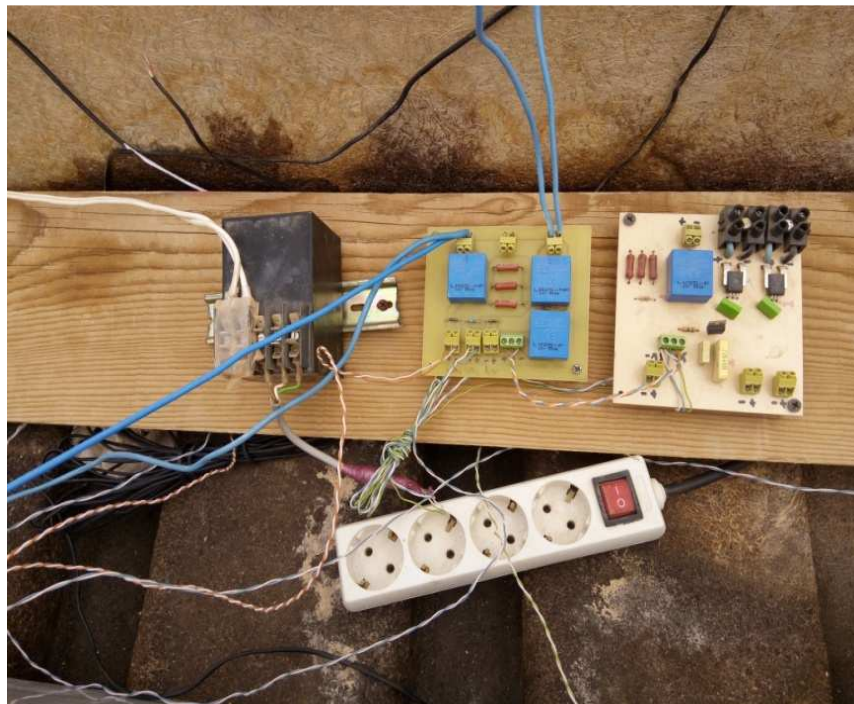


Figure 5: Photo du capteur de courant et capteur de tension

### 3.5. Une charge

Deux lampes à courant continue de type : 12 Volt, DC, Compact Fluorescent Bulb 30 Watt.



Figure 6: Photo de la lampe à courant continue

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

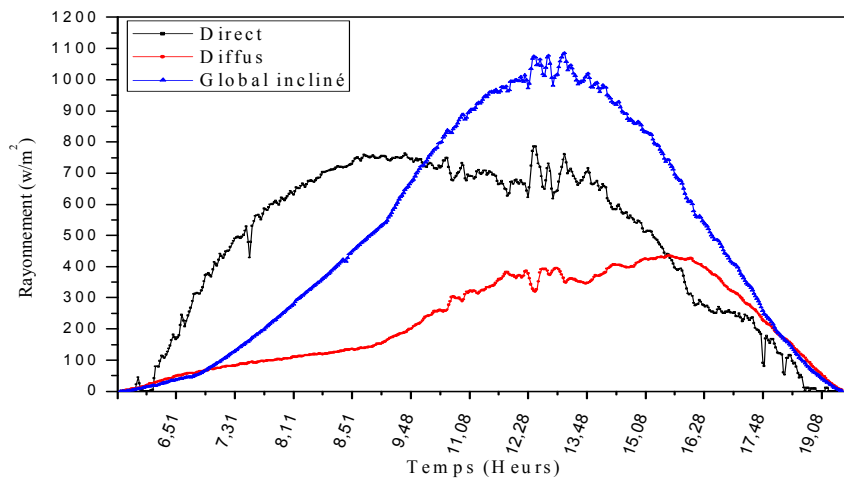
Tableau 3 : Données géographiques du site d'Adrar

Site	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Situation topographique
Adrar	27° 49' N	00° 17' W	263	Sahara

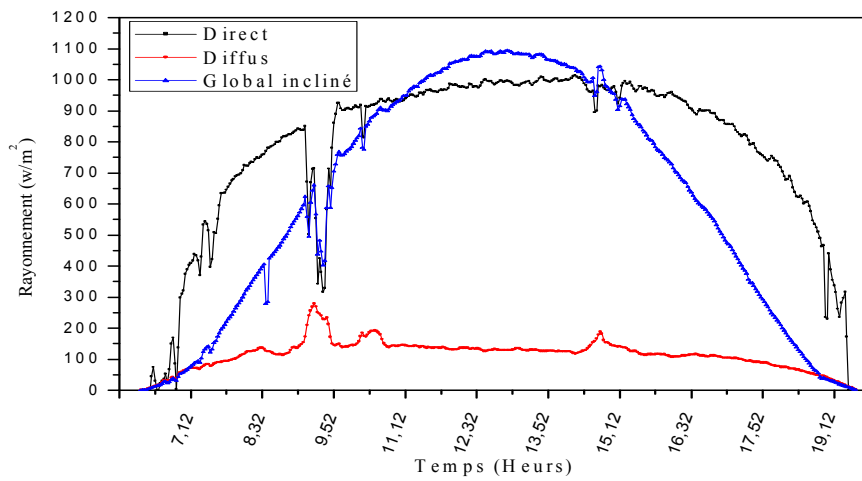
## 5. Résultats et Discussions

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

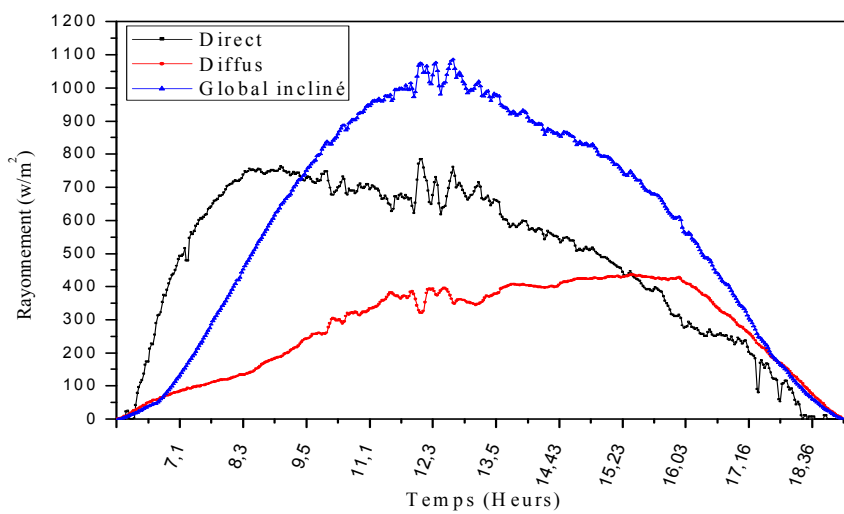
La figure 7 montres l'allure de l'éclairement globale pendant les journées de l'acquisition, les données seront importantes et utilisables pour notre étude. Ces données sont enregistrées durant les journées typiques.



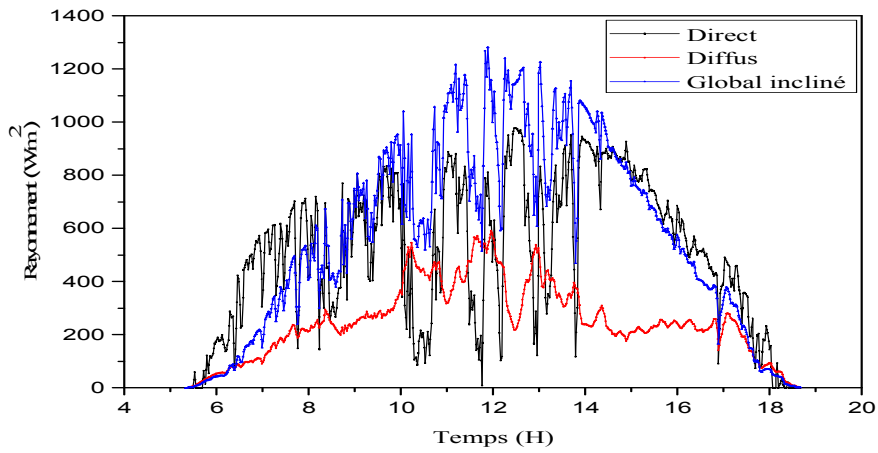
04/05/2018



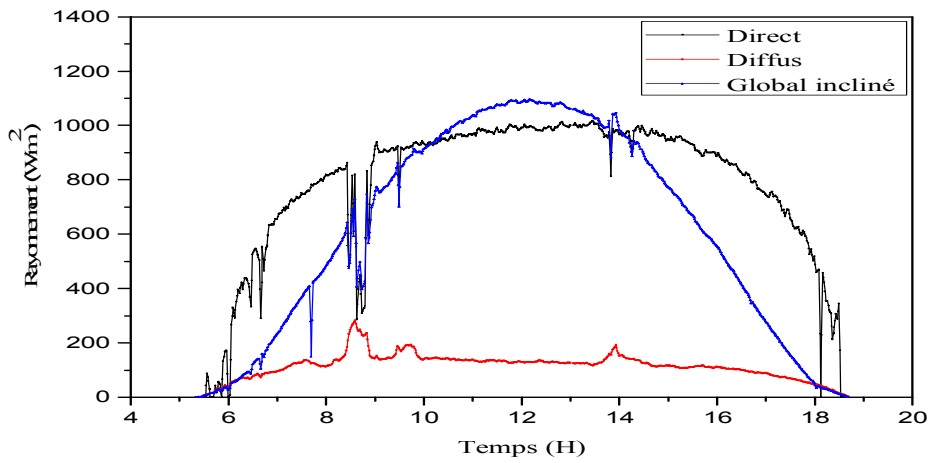
05/05/2018



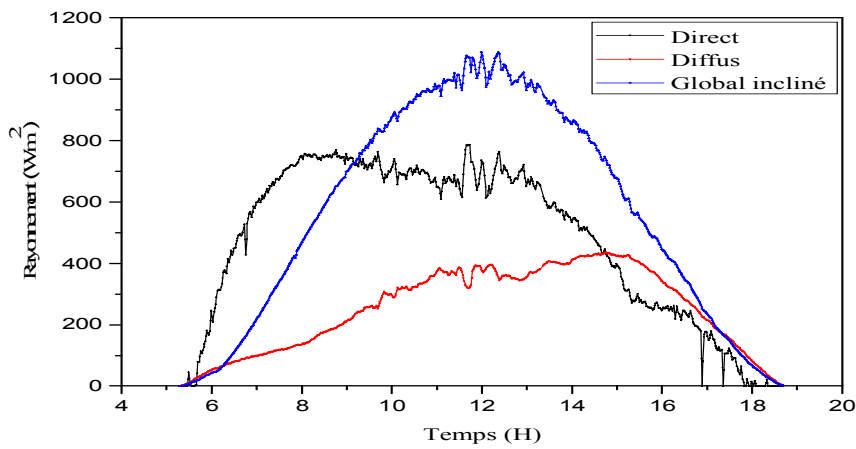
06/05/2018



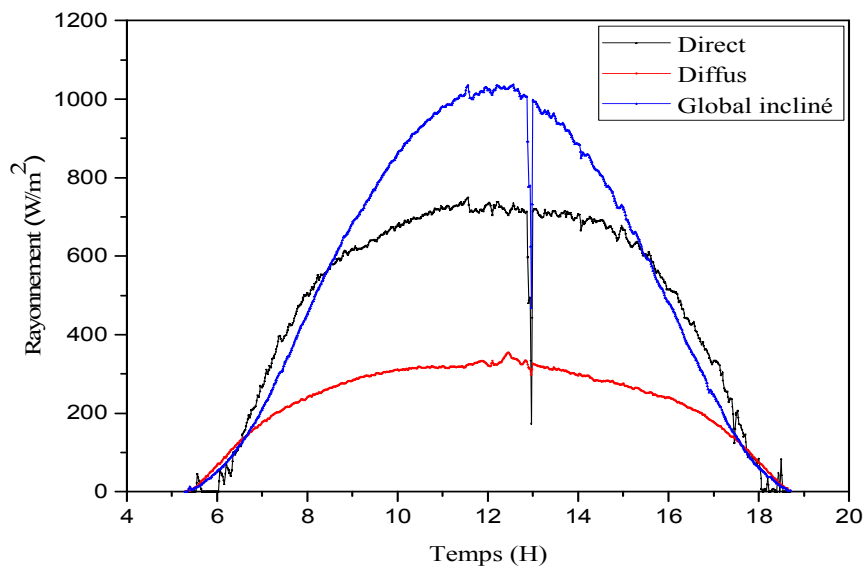
07/05/2018



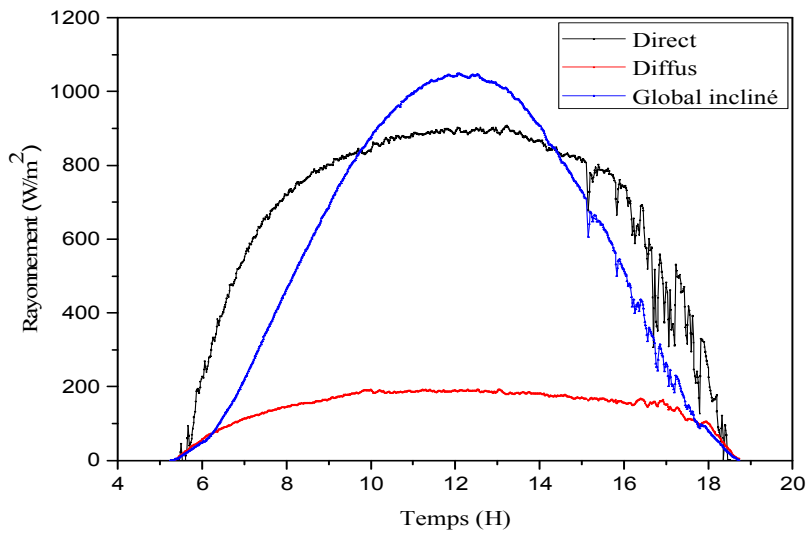
08/05/2018



09/05/2018



**10/05/2018**



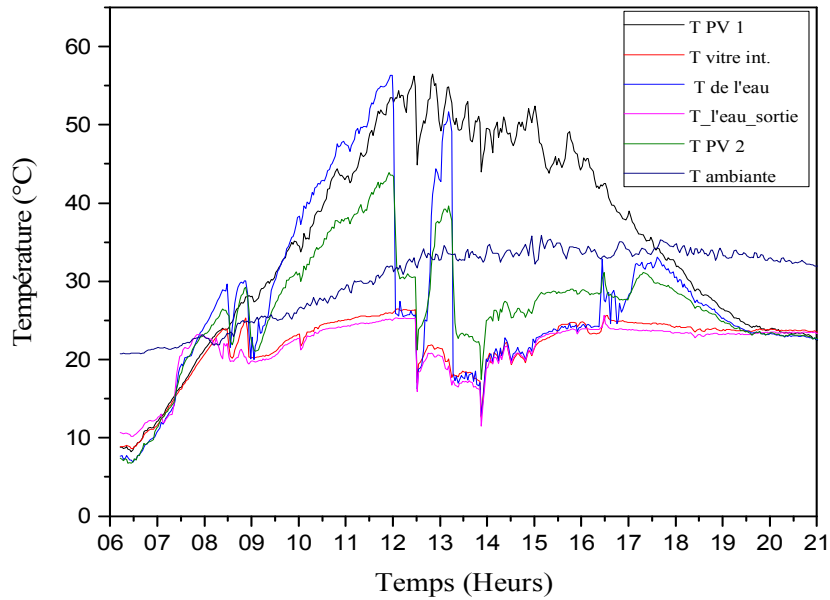
**13/05/2018**

Figure 7 : L'évolution de l'éclairement solaire (Expérimental)

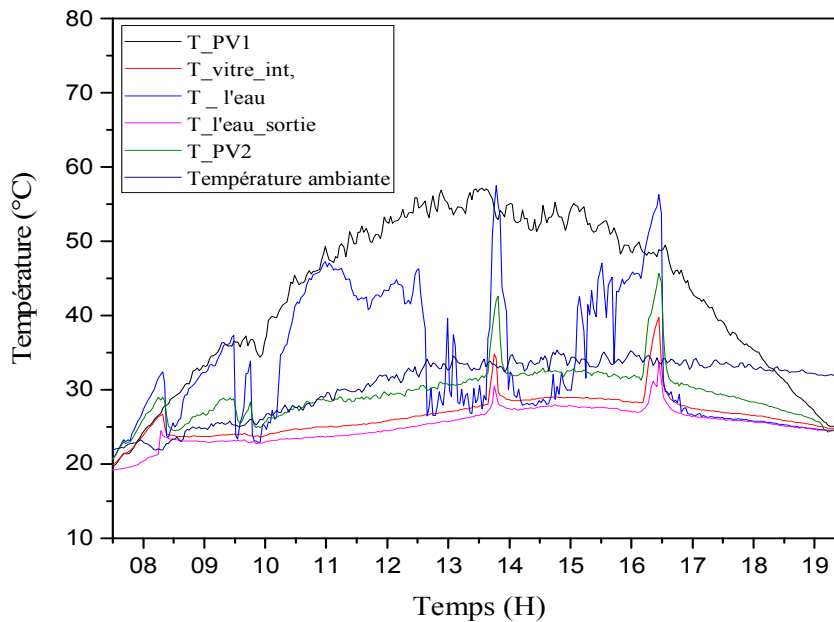
On remarque que la courbe de l'éclairement solaire du 10/05/2018 est lisse car le ciel pendant la journée est clair par contre du 07/05/2018 le ciel n'est pas clair.

5.2. Distribution de la température dans le capteur Photovoltaïque PV/T

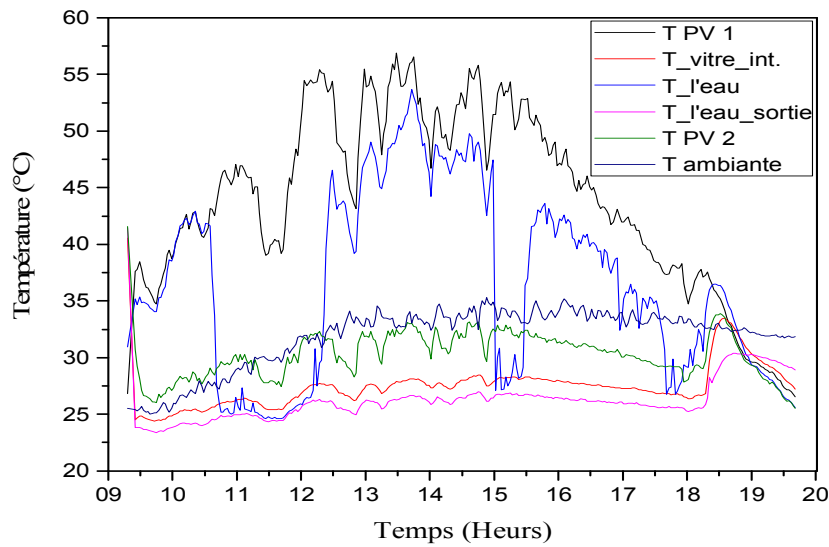
Nous avons mesuré la température au niveau de chaque couche du capteur. La figure 8 montre la distribution de la température en fonction du temps et de l'éclairement G.



07/05/2018



08/05/2018



09/05/2018

Figure 8 : Distribution de la température expérimentale dans les différentes couches du capteur hybride PV-T et panneau PV.

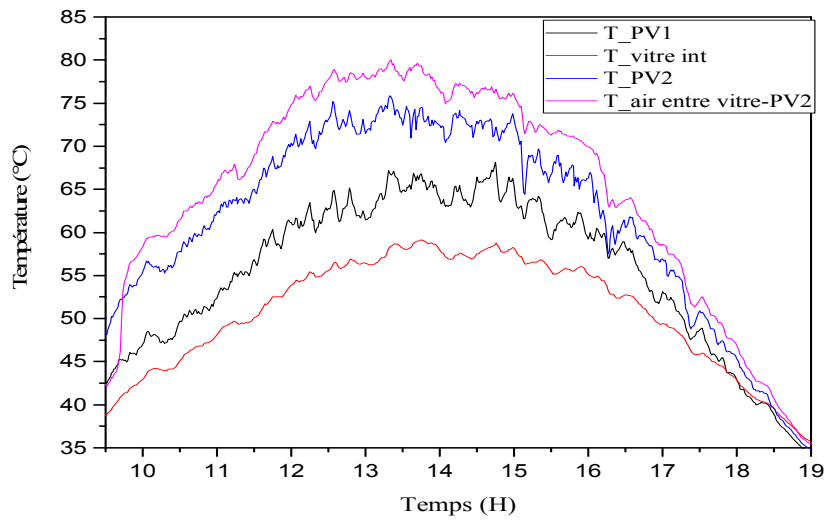
- Le débit de l'eau (fluide caloporteur) à l'entrée du capteur PV-T n'est pas fixe (réseau public) qui a créé un problème dans le refroidissement du panneau.

Tableau 4 : Comparaison entre la température maximum du panneau PV et les températures des différentes couches du capteur hybride PV-T

	Temps	Tpv 1 Max °C	T intérieur vitre °C	T PV2 °C	T Ambiante °C	TPV 1 - TPV2 °C
07/05/2018	13:29:02	56,9	27,9	32,5	32,57	24 ,4
08/05/2018	13:33:02	57,1	27,8	31,9	33,67	25 ,2
09/05/2018	12:51:02	56,5	21,8	33,7	32,79	22 ,8

On constate que la température au niveau du panneau PV1 maximum atteinte est de 56.9 °C et la température au niveau du panneau PV2 du capteur PV-T est 32,5 °C avec une différence 24 ,4°C.

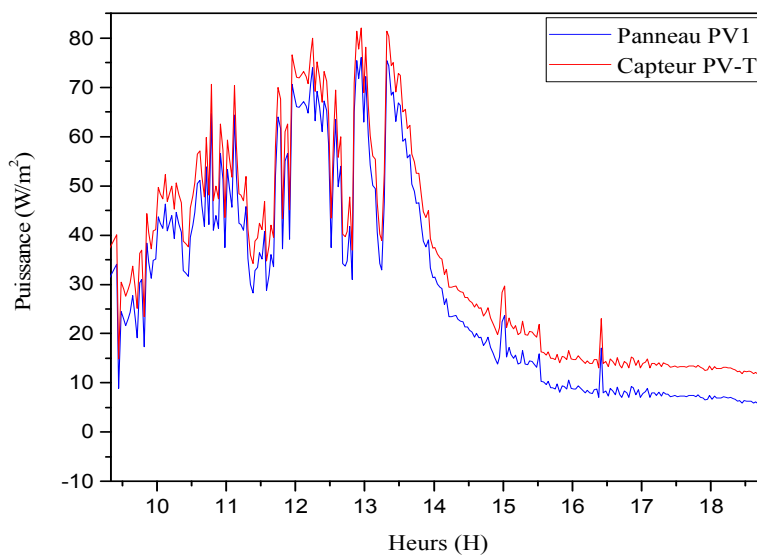
Le point maximum de température pour les différentes couches du capteur hybride est atteint entre 12 :00h et 14 :00h.



13/05/2018

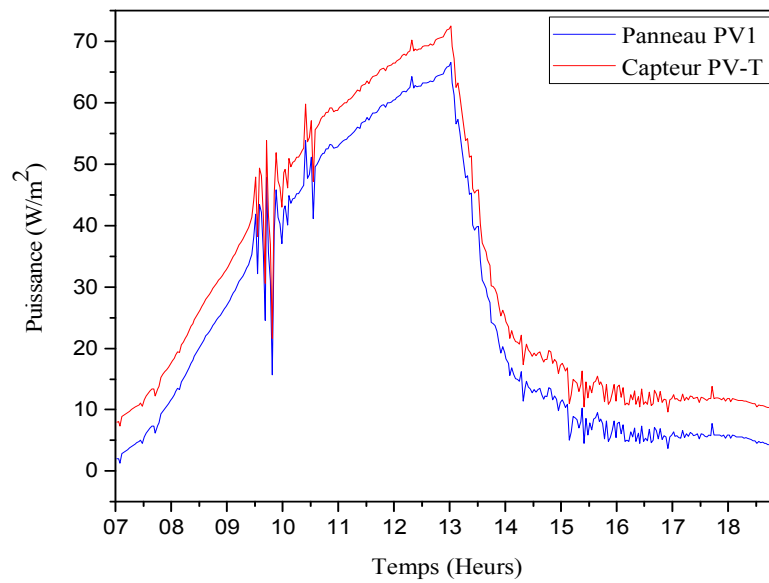
Figure 9 : Distribution de la température expérimentale dans les différentes couches du capteur hybride PV-T sans refroidissement et du panneau PV1.

L'ajout d'une vitre supplémentaire au-dessus du capteur a provoqué une augmentation de la température de toutes les couches. À 13h :20, elle a atteint 75.9 °C sur la face arrière panneau PV2 du capteur PV-T et 66.9°C sur la face arrière panneau PV1 et 58.3°C sur la vitre, car la vitre ajoutée a provoqué 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.

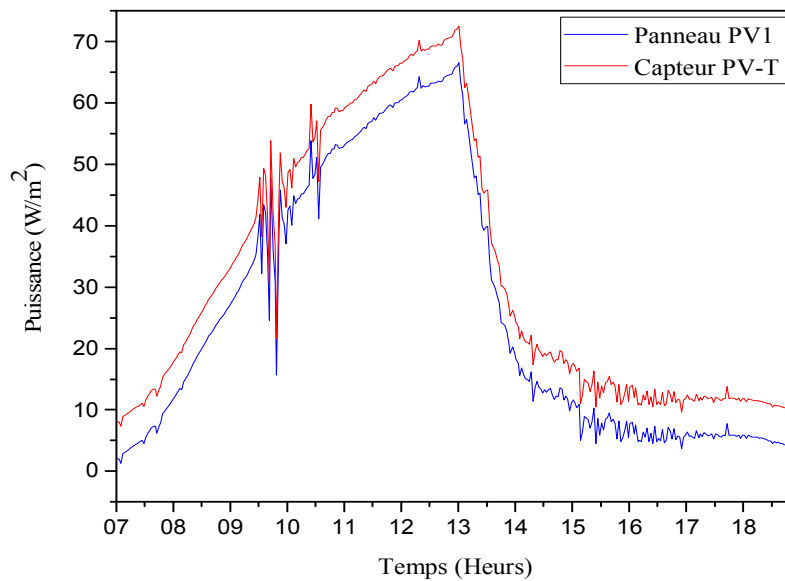


07/05/2018





08/05/2018



09/05/2018

Figure 10 : Evolution de la puissance du panneau PV du capteur PV-T et du panneau PV1

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

**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 a provoqué une augmentation de la température de toutes les couches.
- La puissance produite du panneau PV du capteur PV-T est supérieur a celle du panneau PV1.

Les résultats obtenus permettent de penser que le système de cogénération à base des nouveaux capteurs hybrides PV-T constitue un système énergétique complet pour l'alimentation en énergie électrique.

## **CONCLUSION GENERALE**

### Conclusion générale

Dans ce travail nous avons étudié le capteur hybride PV-T expérimentalement à travers la réalisation d'un prototype à l'unité de recherche URER-MS. Adrar. Le système PV-T 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 supérieur 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, réalisation et expérimentation d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique PV-T avec le refroidissement par un fluide caloporteur qui circule dans tuyauterie sous forme de serpent.
- Une analyse technico-économique des différents capteurs hybride photovoltaïque-thermique PV-T.

# Réalisation et expérimentation d'un capteur hybride photovoltaïque-thermique PV-T

## Résumé:

Le capteur hybride PV-T est l'assemblage d'un capteur solaire thermique (T) et d'un module photovoltaïque (PV).

Le capteur PV-T produit en même temps de l'électricité grâce à l'énergie solaire photovoltaïque et de la chaleur grâce à l'énergie thermique.

L'augmentation de la chaleur à l'intérieur du module est l'une des principales causes de baisse de rendement des panneaux solaires photovoltaïque. D'où la nécessité d'un système d'évacuation thermique.

L'avantage d'un système hybride est le refroidissement des cellules photovoltaïques grâce à la circulation d'un liquide que sera chauffé lors de son passage dans le capteur.

L'objectif de ce travail est la réalisation et l'expérimentation d'un capteur PV-T et aussi l'étude de l'influence de divers paramètres sur les performances énergétiques du capteur PV-T.

**Mots clés:** Capteur thermique, module photovoltaïque, capteur solaire hybride PV-T.

## ملخص :

الهدف من هذا العمل هو إنجاز نموذج ثنائي الإستعمال لإنتاج الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية في نفس الوقت وذلك من خلال دراسة نظام هجين PV-T الذي يتكون من لوح ضوئي (PV) ولاقط حراري (T).

تعتبر زيادة الحرارة احدى الأسباب الرئيسية لانخفاض إنتاج اللوح الشمسي من الكهرباء، فيعمل هذا النظام الهجين على تبريد الخلايا الضوئية نتيجة دوران السائل (الماء) بحيث يمتص الحرارة أثناء مروره من خلال اللوح الشمسي، وبالتالي الرفع من مردوده.

يقوم هذا العمل على صنع وتجريب لوح ثنائي الإستعمال PV-T وأيضاً دراسة تأثيرات العوامل المختلفة على إنتاج الطاقة الكهربائية لهذا الجهاز

**الكلمات المفتاحية :** لوح كهربائي، لاقط حراري، لوح هجين PV-T.

## Abstract :

The hybrid collector PV-T is the assembly of a solar thermal collector (T) and a photovoltaic module (PV).

At the same time, the hybrid collector PV-T produces electricity thanks to solar energy and heat thanks to thermal energy.

The increase of the heat inside the module is one of the main causes of yield reduction of photovoltaic solar panels. Hence the need for a thermal evacuation system.

The advantage of a hybrid system is the cooling of the photovoltaic cells through the circulation of a liquid that will be heated as it passes through the collector.

The objective of this work is the realization and the experimentation of a PV-T collector and also the study of the influence of various parameters on the energy performances of the PV-T collector.

**Key words:** Thermal collector, photovoltaic module, PV-T hybrid solar collector.