

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Des sciences

DEPARTEMENT : Physique

N° :



DOMAINE : Sciences de la Matière

FILIERE : Physique

OPTION : Energie Solaire

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: HADJISSI Oum ELKHEIR

Intitulé

**ÉTUDE EXPERIMENTALE D'UN PANNEAU
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DANS LA
REGION DE M'SILA**

Soutenu le 24 / 05 /2017 devant le jury composé de:

SALMI Mohamed

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Président

MAYOUF Siabdalla

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Rapporteur

AFRIDJA Djamel

Université Mohamed Boudiaf- M'sila

Examineur

Année universitaire : 2016/2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Pour commencer, je voudrais bien remercier le jury de sa présence pour évaluer et participer à la conclusion de ce modeste travail.

Mes remerciements vont en tout premier lieu à de thèse Professeur **MAYOUF SIABDALLAH**, pour sa rigueur scientifique, sa disponibilité et pour m'avoir accordé sa confiance. J'ai beaucoup appris au cours de cette thèse et je vous en suis extrêmement reconnaissante.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches. Merci pour le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer et les aiguillages qu'ils m'ont apportés.

À tous ces camarades, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Avec l'aide de dieu tout puissant, j'ai pu achever ce modeste travail.

Je dédie ce travail à:

Mes très chers parents, pour leur soutien et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

A mes frères et ma chère sœur.

A toute les familles hadjissi (maman - papa - Mes frères)

À tous les amis : Aicha, Cillia, Maroua, Ali, Djalal.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

Table des matières

Remerciement		
Dédicace		
Table des matières.....		I
Liste des figures		III
Liste des tableaux.....		V
Nomenclature		VI
Introduction générale		1
Chapitre I	Le gisement solaire	
I-1	Introduction.....	4
I-2	Gisement solaire.....	4
	I-2.1 Historique	4
	I-2.2 Solaire.....	6
	I-2.3 Le spectre solaire.....	7
	I-2.4 Le rayonnement solaire.....	8
	I-2.5 Dualité de la lumière.....	9
I-3	Coordonnées terrestres.....	10
	I-3.1 Longitude	11
	I-3.2 La latitude.....	11
	I-3.3 L'altitude.....	11
I-4	Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ses coordonnées	12
	I-4.1 La variation annuelle du rayonnement direct extraterrestre.....	12
I-5	Les coordonnées du soleil.....	12
	I-5.1 Les coordonnées équatoriales.....	12
	I-5.1.1 Déclinaison solaire δ	12
	I-5.1.2 Angle horaire du soleil H.....	16
	I-5.2 Les coordonnées horizontales	15
	I-5.2.1 La hauteur du soleil (h).....	15
	I-5.2.2 Azimut du soleil (α).....	15
I-6	Différent type de rayonnement	16
	I-6.1 Rayonnement direct.....	16
	I-6.2 Rayonnement diffus	19
	I-6.3 L'albédo réfléchi	19
	I-6.4 Rayonnement globale.....	20
I-7	Conclusion.....	21
Chapitre II	Fabrication d'un module photovoltaïque	
II-1	Différentes génération du photovoltaïque	23
	II-1.2 Première génération	23
	II-2.2 Deuxième génération	25
	II-2.3 Troisième génération.....	28
Chapitre III	Etude de la cellule solaire à conversion photovoltaïque	
III-1	Introduction.....	32
III-2	Techniques pour capteur l'énergie solaire.....	32
	III-2.1 L'énergie solaire thermique	32
	III-2.2 L'énergie solaire thermodynamique	32
	III-2.3 L'énergie solaire photovoltaïque.....	32
III-3	Les filières technologiques	33
	III-3.1 La jonction p-n.....	33

	III-3.2	Le silicium.....	34
	III-3.2.1	Silicium monocristallin.....	34
	III-3.2.2	Silicium multicristallin	34
	III-3.2.3	Silicium amorphe	34
	III-3.3	Les couches minces	35
III-4		Le principe de l'effet photovoltaïque	37
	III-4.1	La cellule photovoltaïque	37
	III-4.2	Modèle d'une cellule solaire	38
	III-4.3	Présentation du modèle mathématique	39
	III-4.4	Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque.....	40
III-5		Conclusion	42
Chapitre IV		Etude expérimentale	
IV-1		Construction de l'appareil utilise	44
IV-1		Mesure du rayonnement solaire.....	45
	IV-1.1	Etude du rayonnement solaire.....	45
IV-2		Variation temporelles des puissances solaires globales sur un plan horizontale	46
	IV-2.1	Variation temporelles des puissances solaires globales sur un plan incliné.....	47
IV-3		L'angle d'inclinaison optimale	48
IV-4		Procédure expérimentale	49
	IV-4.1	Relation entre le potentiel et le courant électrique	49
	IV-4.2	Variation temporelle du courant et de potentiel	50
IV-5		L'effet météo (passage du nuage)	53
IV-6		Association de la cellule solaire	53
IV-7		La puissance	56
		Conclusion générale.....	57
		Références bibliographiques	58
		Résumé	

Liste des tableaux

N	Nom de tableau	Page
1	Tableau (I-1) : caractéristique principale du soleil.	7
2	Tableau (I-2) : répartition spectrale du rayonnement thermique.	7
3	Tableau (I-3) : valeur énergétique des photons issus spectre solaire.	11
4	Tableau (IV-1): Caractéristiques du panneau solaire utilisé.	44

Liste des figures

n	Nom de figure	page
1	Figure (I-1) : Spectre solaire	8
2	Figure (I-2) : rayonnement solaire transmis à la terre	8
3	Figure (I-3) : Coordonnes terrestre	10
4	Figure (I-4) : Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitude	11
5	Figure (I-5) : Variation annuelle de la déclinaison de soleil	13
6	Figure (I-6) : Variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai	14
7	Figure (I-7) : Repéré horizontale	15
8	Figure (I-8) : différents composants de rayonnement	16
9	Figure (I-9) : Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque	18-19
10	Figure (I-10) : Appareils mesure	20
11	Figure (II-1) : Etapes de fabrication de cellules si (source – DEFIELEC)	23
12	Figure (II-2) : Cellules si monocristallin (sc – si) (source – Epsic)	24
13	Figure (II-3) : Cellules si polycristallin (mc – si) (source – Epsic)	24
14	Figure (II-4) : Cellules si ruban (c – si) trie de la technologie RST (source – solar force)	25
15	Figure (II-5) : Module verre en cdTe efficacité de 18.5 % (source. enerzine)	26
16	Figure (II-6) : Cellules CIS d'efficacité de 20 %(source. Esolaire)	26
17	Figure (II-7) : Cellules en CGS , efficacité de 8.5%(soure . Dantor)	27
18	Figure (II-8) : Film pv trans parent avec un rendement de 10% (source . futura-science)	27
19	Figure (II-9) : Centrale solaire a concentration (CPV) , puissance 19.9 GW , seville (source .futura – science)	29
20	Figure (II-10) : Cellule dye sensitized solar cell panel (source . Dyesol)	29
21	Figure (II-11) : Cellule photovoltaïque organique (source . Cambridge)	30
22	Figure (II-12) : Cellule solaire a base nonoparticule (source . Greensun Energy)	30
23	Figure (III-1) : Principe de fontionnement d'un panneau solaire	33
24	Figure (III-2) : Photos de cellule monocristallin (a) et multicristallin (b)	35
25	Figure(III-3) : Deux exemple de modules utilisant Sia (silicium amorphe)	36
26	Figure(III-4) : Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.	37
27	Figure(III-5) : Circuit équivalent de la cellule solaire	38
28	Figure(III-6) : Influence des résistances shunt et serie sur la caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.	39
29	Figure (IV-1): Capteur solaire photovoltaïque.	44
30	Figure (IV-2): Thermomètre digital .	45
31	Figure (IV-3.a): Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison ($\beta=0$).	46
32	Figure (IV-3.b): Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison ($\beta=0$).	47

33	Figure (IV-4): Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison (37°).	48
34	Figure (IV-5): Evolution temporelle des puissances globales (numérique) pour différents angles d'inclinaison.	49
35	Figure (IV- 6): Evolution du courant (I _{cc}) en fonction de l'angle d'inclinaison.	49
36	Figure (IV-7) : montage électrique.	50
37	Figure (IV-8): Evolution de courant en fonction de tension électrique.	50
38	Figure (IV-9): Evolution du courant en fonction du temps (vers le Sud).	51
39	Figure (IV-10) : Evolution du tension en fonction du temps (vers le Sud).	52
40	Figure (IV-11) : Evolution de courant en fonction du temps (vers le soleil). (Passage du nuage à : 13 :30 – 16 :00 – 17 :00)	52
41	Figure (IV-12): Evolution du tension en fonction du temps (vers le soleil). (Passage du nuage à : 13 :30 – 16 :00 – 17 :00).	53
42	Figure (IV-13): Evolution du tension en fonction de temps (Passage du nuage).	53
43	Figure (IV-14): Evolution de tension en fonction de l'intensité solaire.	54
44	Figure (IV-15) : Evolution u courant en fonction de l'intensité solaire. (Association en parallèle)	54
45	Figure (IV-16) : Evolution de tension en fonction de l'intensité solaire.	55
46	Figure (IV-17): Evolution u courant en fonction de l'intensité solaire. (Association en parallèle)	55
47	Figure (IV-18): Evolution de puissance.	56

Nomenclature

Paramètres de gisement solaire

Symbole	Unité	Définition
h	$j. s^{-1}$	Constante de Planck
n	Hz	Fréquence de l'onde lumineuse
E	eV	Quantité d'énergie
c	$m. s^{-1}$	Vitesse de lumière
λ	m	λm Longueur d'onde
N	jour	numéro d'ordre du jour dans l'année $1 \leq N \leq 365$
$\lambda 0$ φ δ H a h γ β α i	Degré (°)	Longitude du lieu Latitude du lieu Déclinaison du soleil Angle horaire du soleil Azimut du soleil Hauteur du soleil La hauteur du capteur Angle d'inclinaison Azimut du capteur Angle d'incidence
I G D_h G_h	w/m^2	Rayonnement direct Rayonnement global Rayonnement diffus horizontal Rayonnement global horizontal
Alb		Albédo du sol

Paramètres du module photovoltaïque

Symbole	Unité	Définition
I	A	Le courant de cellule.
I_{cc}		Le courant de court-circuit.
I_0		Le courant de saturation.
I_D		Le courant de seuil de diode.
I_R		Le courant d'entre résistance.
V	V	La tension de cellule.
V_{co}		La tension de circuit ouvert.
V_g		La tension de seuil de diode (1.1V).
R_s R_p	Ω	La résistance série de la cellule. La résistance shunt.
T	$^{\circ}K$	La température de la cellule.
q	C	La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19} C$.
n		Le facteur de qualité de diode.
K	$J.K^{-1}$	La constante de Boltzmann ($1.3854 * 10^{-2} J.K^{-1}$).
P_{in} P_m	W	la puissance lumineuse incidente. La puissance optimale de la cellule.
FF		Facteur de forme
η	%	Le rendement

Introduction Générale

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource est négligeable et non polluantes.

Le rayonnement solaire est reparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole. Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie photovoltaïque en utilisant un capteur solaire photovoltaïque. L'objectif de ce travail est l'étude les variations de l'intensité du rayonnement durant une journée. De même, voir l'effet de l'angle d'inclinaison du capteur sur le fonctionnement de ce dernier.

- La première partie, nous décrivons les notions essentielles sur le gisement solaire à savoir les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base, le mouvement de la terre autour du soleil et les différents types de rayonnements.

Introduction générale

- Le deuxième partie de ce mémoire est une brève introduction sur les trois générations du photovoltaïque avec une vue globale de leur coûts et rendements, mais nous nous sommes surtout intéressés à la recherche et la renaissance des couches minces et leur évolution dans l'actualité scientifique.
- La troisième partie présente la modélisation et la commande de système de conversion photovoltaïque du point de vue de l'estimation de la production d'énergie à partir de données de l'éclairement.
- Dans le quatrième partie, nous présenterons le dispositif expérimentale « capteurs photovoltaïque » ; les différentes composants, le principe de fonctionnement, la procédure expérimentale et en fin les essais de reproductibilité pour vérifier la fiabilité de ce dernier.



CHAPITRE : I

**Le gisement
solaire**

Introduction :

Dans ce chapitre, nous étudierons brièvement le solaire, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre.

Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude et nous introduirons quelques données sur le gisement solaire en Algérie.

I-2 Gisement solaire:

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné.

Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant le spectre du rayonnement solaire

I-2.1 Historique :

La technique n'a pas atteint la maturité et de nombreuses pistes de recherches sont explorées ; il s'agit d'abord de faire baisser le prix de revient de l'électricité produite, mais aussi d'obtenir des progrès en matière de rusticité, de souplesse d'usage, de facilité d'intégration dans des objets, de durée de vie, etc. Des accroissements du rendement de leurs cellules sont périodiquement annoncés par toutes les sociétés de fabrication, par exemple :

Une alternative au sciage a été développée par « Evergreen Solar ». Il est remplacée par le dépôt de silicium encore liquide sur un film où il se cristallise directement à l'épaisseur du plaquette.

Des « cellules CGIS » seront produites industriellement et en continu par « Nano Solar » via une technique d'imprimerie. Coût espéré : 1 \$/W en 2010.

La taille des plaquettes croit régulièrement, ce qui diminue le nombre de manipulations on cherche à mieux valoriser toutes les longueurs d'onde du spectre solaire (dont l'infrarouge, ce qui ouvrirait des perspectives très intéressantes : transformation directe de la lumière d'une flamme en électricité, rafraichissement).

Des concentrateurs (déjà utilisés sur les satellites) sont testés sur terre. Via des miroirs et des lentilles incorporées dans le panneau, ils focalisent le rayonnement sur l'élément essentiel et coûteux qu'est la cellule photovoltaïque et ses semi-conducteurs. En 2007, Sharp, a annoncé de disposer d'un système concentrant jusqu'à 1100 fois le rayonnement solaire (contre 700 fois pour

le précédent record en 2005); début 2008, Sunergi a atteint 1600 fois. La concentration permet de diminuer la proportion du panneau consacré à la production de l'électricité, et donc leur coût. De plus ces nouveaux matériaux supportent très bien l'échauffement important dû à la concentration du flux solaire [1].

Des siliciums amorphe et cristallin pourraient peut-être être associé par « hétérojonction » dans une même cellule photovoltaïque à plus de 20 % de rendement (Projet de 2 ans, annoncé début 2008, par le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et des nanomatériaux du CEA-Liten avec le coréen JUSUNG (équipementier pour fabricants de semi-conducteurs), avec l'INES (Savoie) où le CEA-Liten a concentré ses activités concernant l'énergie solaire.

D'autres semi-conducteurs (sélénium; association Cuivre-Indium-Sélénium (CIS) en couche mince) sont étudiés. En France l'institut de recherche et développement sur l'énergie photovoltaïque (IRDEP) [2] s'intéresse au CIS au rendement modeste de 12%, mais à faible coût de fabrication. En 2009, selon ENF, il existe 25 entreprises produisant ce type de panneau solaire, Würth Solar est le principal vendeur avec 15 MWc vendus en 2007, [3]. En 2010, Showa Shell a mis en service une centrale photovoltaïque de 1MW en modules (CIS), sur son terminal pétrolier de la Préfecture de Niigatahttp [4].

L'usage de matériaux composés de boîtes quantiques permettra d'atteindre 65% dans le futur (avec un maximum théorique de 87%) [5]. Les dispositifs à multi jonctions GaAs sont les cellules les plus efficaces. Spectrolab (déc. 2006) a obtenu 40,7% d'efficacité, en 2007, un consortium (dirigé par des chercheurs de l'université du Delaware) a obtenu un rendement de 42,8% [6].

Des cellules polymères photovoltaïques peuvent être faites avec des composés organiques (matières plastiques), pour réaliser des panneaux souples et légers, des tuiles, voiles ou tissus photovoltaïques, espère-t-on à faible coût de fabrication.

Pour l'instant leurs rendements sont faibles (5% maximum), ainsi peut-être que leur durée de vie, et de nombreux problèmes techniques restent à résoudre. Début 2008, le groupe japonais Fujikura [28] a annoncé avoir testé (1000 heures à 85 °C et une hygrométrie de 85%) une cellule photovoltaïque organique de type Grätzel non seulement plus résistante, mais au rendement amélioré de 50 à 70 % grâce à une surface dépolie qui diffuse aléatoirement la lumière réfléchi à l'intérieur de la cellule où elle libère à nouveau des charges électriques en activant d'autres pigments photosensibles.

Des panneaux solaires transformant les infrarouges en électricité (cellules thermo photovoltaïques) ont été mis au point par Boston College de Chestnut Hill (Massachusetts). Une production électrique devient théoriquement possible à partir de toute source de chaleur, même pendant la nuit [7].

Pour l'instant, seule une partie de la lumière visible, principalement les rayonnements verts et les bleus, est transformée en électricité et le rayonnement infrarouge n'est utilisé que par les panneaux thermiques pour le chauffage d'eau.

Des cellules transparentes, des modélisations de l'institut allemand Fraunhofer de mécanique des matériaux (IWM ; projet « METCO » [8] laissent croire à une possible de production industrielle de cellules transparentes bicouches. Les semi-conducteurs de type P (couche à lacunes électroniques) transparent semblent les plus difficiles à produire (le phosphore pourrait être un dopant-P de l'oxyde de zinc, mais l'azote serait plus prometteur [9].

En 2011, Brandon MacDonald, a réussi à créer des cellules solaires petites qu'elles peuvent être placées en suspension dans un liquide comme de l'encre [10]. Cette technologie permettrait d'intégrer totalement les 'cellules de panneau solaire' à la construction d'un bâtiment. La technologie permettrait aussi une fabrication de panneau solaire utilisant à peine 1% des matériaux habituellement nécessaires.

Enfin, la pénurie de silicium ou de produits dopant (Le prix de l'indium a décuplé de 2002 à 2009, suite à sa raréfaction) accroît encore l'incitation à l'innovation sur un marché en forte croissance qui s'annonce colossal, surtout si on parvient à baisser le prix de revient de l'électricité produite et à le rapprocher de celui des combustibles fossiles.

I-2.2 Le soleil :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est proxima de centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoilé qui assure la vie sur terre [11], [12].

Sur le plan humain, le soleil a une importance car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui prement la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologique [11].

- les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I.1):

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$2 \cdot 10^{30}$
Surface (km^2)	$6,09 \cdot 10^{12}$
volume (km^3)	$1,41 \cdot 10^{18}$
Masse volumique moyenne (km/m^3)	1408
Vitesse de déplacement (km/s)	217
Distance du cette de voie lactée (km)	$2,5 \cdot 10^{17}$

Tableau (I-1) : Caractéristiques principales du soleil.

I-2.3 Le spectre solaire :

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. on distingue en général le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ $6000^\circ K$ et le spectre réel d'émission du soleil [13].

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements Corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de $3 \cdot 10^8 m/s$ et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et $8\mu m$ [14].

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [15].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement Thermique est donnée dans le tableau (I-2)

Longueur d'onde (μm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m^2)	87	656	623

Tableau (I-2): Répartition spectrale du rayonnement thermique.

La figure (I-1) : illustre le rayonnement solaire, ses fréquences et ses longueurs d'ondes.

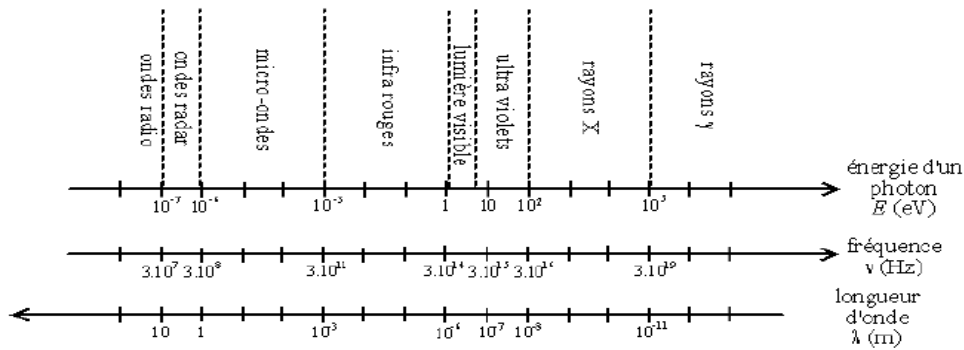


Figure (I-1): Spectre solaire

I-2.4 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d’ondes électromagnétiques dont une partie parvient constamment à la limite supérieure de l’atmosphère terrestre. En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d’onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu’à 4 μm environ).

L’énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l’ensemble de la limite supérieure de l’atmosphère, correspond à un éclairement de $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ Figure (I-5). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d’éclairement qu’apporte le soleil au système terre et atmosphère, environ $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ sont réfléchis vers l’espace ; seul le reste est absorbé, pour un tiers par l’atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [16].

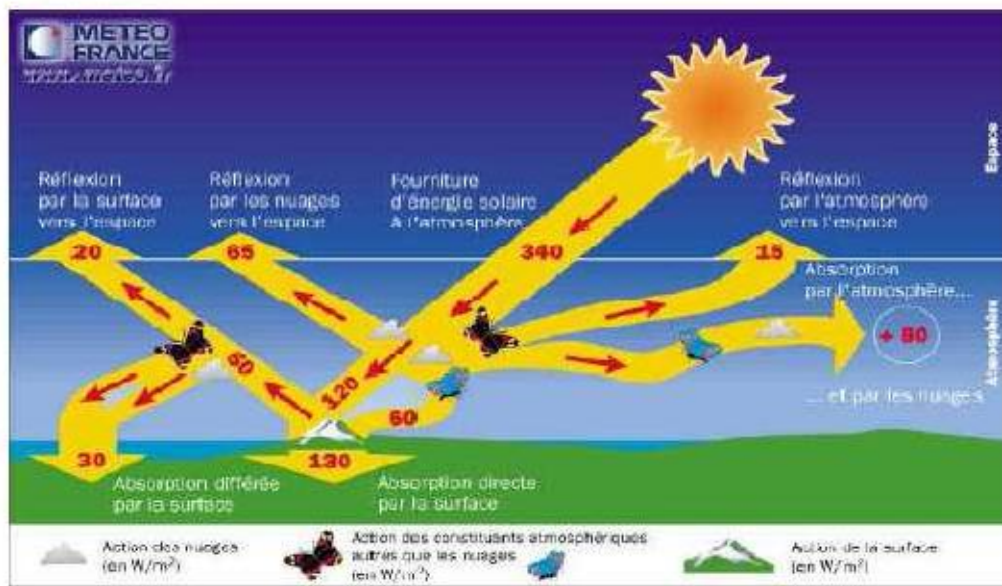


Figure (I-2): Rayonnement solaire transmis à la terre.

La figure (I-2), publiée par Météo France, montre que près du quart de cet éclairage incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (65 W.m^{-2}), le reste (15 W.m^{-2}) étant dû aux autres constituants atmosphériques comme les gaz et aérosols. Il reste donc 180 W.m^{-2} qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont les deux tiers (120 W.m^{-2}) se font directement, le reste (60 W.m^{-2}) s'effectuant par diffusion vers le bas.

Intervient alors un processus complexe d'interaction entre la diffusion vers le bas et la réflexion. Sur les 180 W.m^{-2} incidents, la surface terrestre, qui possède un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50 W.m^{-2} . En fait, la majeure partie de l'éclairage qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard et s'ajoute partiellement aux $180-50 = 130 \text{ W.m}^{-2}$ de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien que l'absorption du rayonnement solaire soit un phénomène continu, on peut simplifier la compréhension du processus précédent en supposant que les 50 W.m^{-2} réfléchis par la surface du globe se répartissent entre 20 W.m^{-2} définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire et 30 W.m^{-2} qui reviennent à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Cette énergie s'ajoute aux 130 W.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160 W.m^{-2} qu'absorbe la surface terrestre [16].

I-2.5 Dualité de la lumière :

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation suivante [17].

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I} - 1)$$

Avec :

h : constante de Planck

c : vitesse de la lumière dans le vide (m.s^{-1})

ν : fréquence (s^{-1})

λ : longueur d'onde (m)

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2\mu\text{m}$ (Ultra-violet) et $4\mu\text{m}$ (infra-rouge) avec un maximum d'énergie pour $0,5\mu\text{m}$. 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2\mu\text{m}$ et $2,5\mu\text{m}$. De $0,4\mu\text{m}$ à $0,78\mu\text{m}$, le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau (I-3) donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [18].

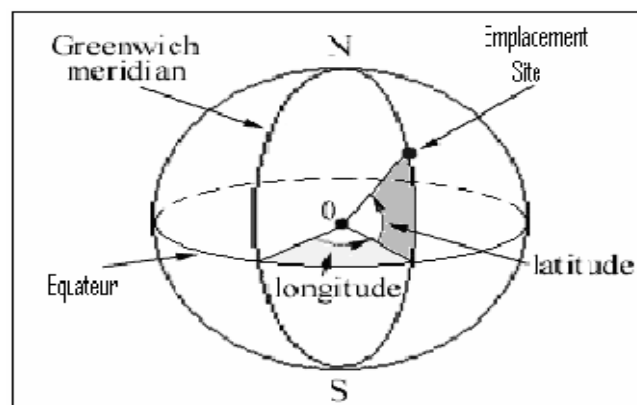
λ (μm)	E (ev)	Zone
0,2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Tableau (I-3): Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

I-3 Coordonnées terrestres :

La Terre est pratiquement une sphère qui tourne autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud.

Tout point sur la terre est caractérisé par sa latitude et sa longitude. Ces deux grandeurs représentent les coordonnées géographiques de ce point ainsi que par son altitude, figure (I-3).



.Figure (I-3) : Coordonnés terrestre.

I-3.1 Longitude :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre -180° et $+180^\circ$, à tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. La longitude sera désignée ici par la lettre λ_0 [19].

- Longitude OUEST $\lambda_0 < 0^\circ$
- Longitude EST $\lambda_0 > 0^\circ$

I-3.2 La latitude

La latitude d'un lieu à la surface de la terre est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré. La latitude est comptée de 0° à $+90^\circ$ dans l'hémisphère nord [19].

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le soleil est plus bas au midi solaire.

Les journées d'hiver sont plus courtes, et le soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire (G) sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude, Figure I-4 [20].

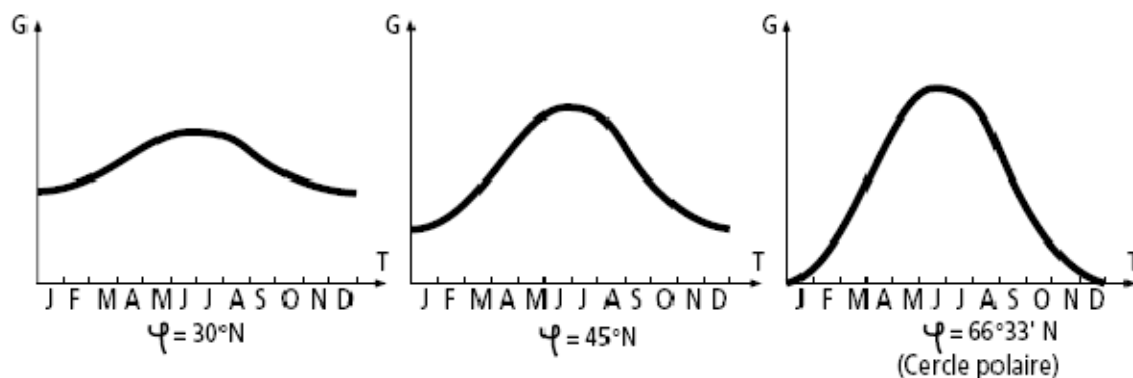


Figure (I-4): Courbes d'ensoleillement typique par mois pour différentes latitudes.

I-3.3 L'altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre.

I-4 Le mouvement de la terre et le mouvement du soleil et ses coordonnées :

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'écliptique ». La distance terre soleil ne varie que $\pm 1.7\%$ par rapport à sa valeur moyenne qui est de $1.49675 \cdot 10^8$ km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet [21].

On peut décomposer le mouvement de chacun d'eux en mouvement de rotation et mouvement de translation.

I-4.1 La variation annuelle du rayonnement direct extraterrestre :

Le rayonnement direct I_{ON} est l'éclairement reçu par un plan disposé sous incidence normale aux rayons solaires par unité de surface à la limite supérieure de l'atmosphère. Il est donné par l'équation (I-2) en watts par mètre carré

$$I_{ON} = I_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{366 \cdot N}{365} \right) \right) \quad (I-2)$$

N : numéro d'ordre du jour dans l'année $1 \leq N \leq 365$.

I_{SC} : Constante solaire, la valeur la plus probable actuellement retenue est 1367 W/m^2 .

$E_o = \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{366 \cdot N}{365} \right) \right)$: Facteur de correction de l'excentricité de l'orbite terrestre.

I-5 Les coordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents :

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

I-5.1 Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , H).

I-5.1.1 Déclinaison solaire δ :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention de compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord (compris entre 0° à l'équateur et $+90^\circ$ au pôle Nord), et négativement celle de l'hémisphère Sud (compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud), et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes $\pm 23.45^\circ$.

Les lois du mouvement relatif terre-soleil permettent de calculer les variations de la déclinaison au long de l'année. Pour la pratique, une formule d'approximation est suffisante, elle est donnée par l'équation (I-3) [22].

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(J - 80)\right) \quad (I - 3)$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \arcsin\left(0.389 \sin\left(\frac{360}{356}(J - 82) + 2 \sin\left(\frac{360}{356}(J - 2)\right)\right)\right) \quad (I - 4)$$

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1^{er} janvier, c'est à dire il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

δ varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23,45^\circ$.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-5) [23].

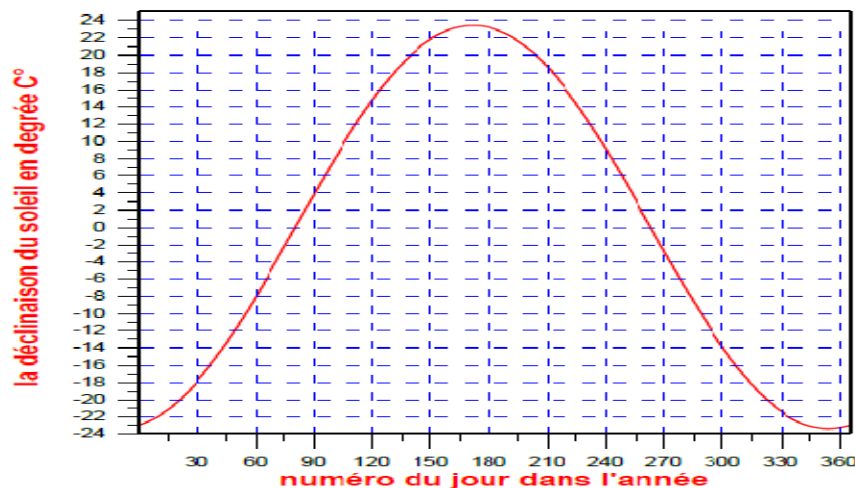


Figure (I-5) : Variation annuelle de la déclinaison du soleil.

- $\delta = 0$ (Equinoxes): Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, l'équinoxe automnal, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe vernal le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour.
- $\delta = 23,45^\circ$ (au Solstice été) : Le solstice d'été (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique.
- $\delta = -23,45^\circ$ (au Solstice hiver) : Il coïncide avec le 21 décembre.

I-5.1.2 Angle horaire du soleil H :

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

$$H = 15(TSV - 12) \quad (I - 5)$$

Avec :

$$TSV = TI - TU + \left(\frac{\Delta t + 47}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad (I - 6)$$

$$\Delta t = 9.87 \sin 2 \left(\frac{360}{365} (J - 81) \right) - 7.35 \cos \left(\frac{360}{365} (J - 81) \right) - 1.5 \sin \left(\frac{360}{365} (J - 81) \right) \quad (I - 7)$$

- *TSV* (Temps Solaire Vrai) : Temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.
- *TU* (Temps Universel) : Le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.
- *TL* (Temps Légal) : Temps donné par une montre.
- Δt : Correction de l'équation du temps.
- λ : longitude du lieu.
- L'angle horaire H varie de -180° à $+180^\circ$ [24]. On prend:
 $H > 0$ après midi.
 $H < 0$ le matin
 $H = 0$ midi TSV.

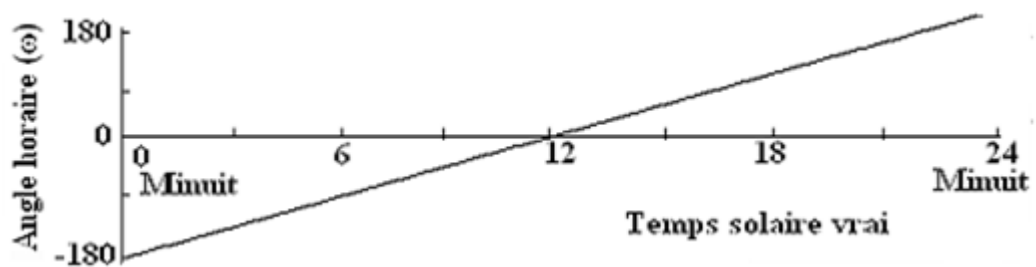


Figure (I-6): Variation de l'angle horaire en fonction de temps solaire vrai.

I-5.2 Coordonnées horizontales:

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut α , figure (I-7) [24].

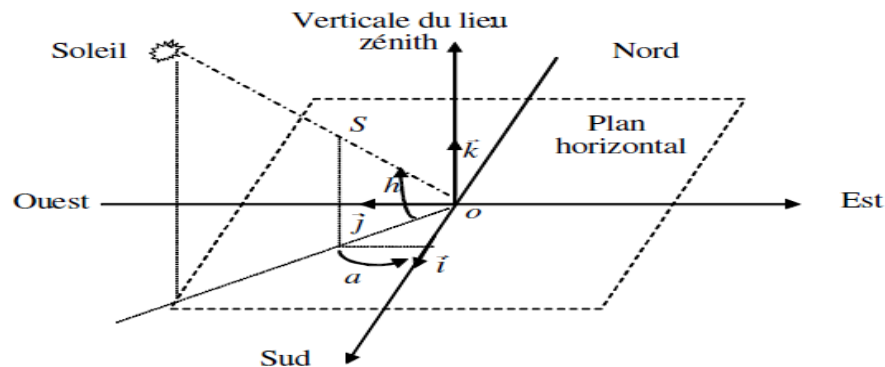


Figure (I-7) : Repère horizontal.

I-5.2.1 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 :

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (I - 8)$$

Avec:

h : varie entre -90° à $+90^\circ$.

On prend: $h > 0$ le jour, $h < 0$ la nuit et $h = 0$ aux lever et coucher.

I-5.2.2 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 :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\alpha) \sin(h)}{\cos(h)} \quad (I - 9)$$

Avec:

α : varie entre -180° à $+180^\circ$

On prend: $\alpha > 0 \Rightarrow$ vers l'ouest, $\alpha < 0 \Rightarrow$ vers l'est et $\alpha = 0 \Rightarrow$ direction du sud.

I-6 Différents types de rayonnement :

En traversant l’atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes.

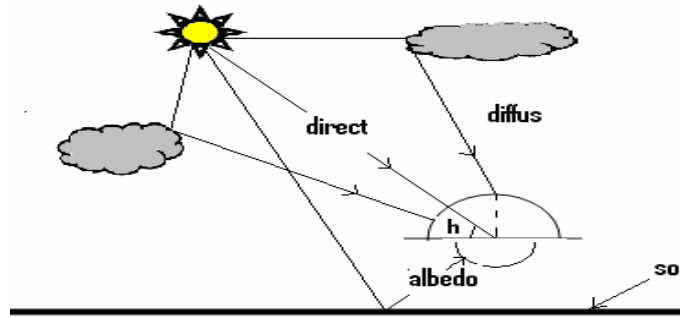


Figure (I-8) : Différents composants de rayonnement.

I-6.1 Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est :

$$I_{(\alpha,y)} = I \cdot \cos(i) \tag{I – 10}$$

Avec :

I: rayonnement direct normal

i (Angle d’incidence) : c’est l’angle entre la direction du soleil et la normale au plan, Cet angle peut être déterminé par la connaissance des cosinus directeurs du rayon incident \vec{u} et la normale \vec{n} en coordonnées horizontales [23]:

$$\vec{n} \begin{cases} \cos(y) \sin(\alpha) \\ \cos(y) \cos(\alpha) \\ \sin(y) \end{cases} \quad \vec{u} \begin{cases} \cos(h) \sin(\alpha) \\ \cos(h) \cos(\alpha) \\ \sin(h) \end{cases} \tag{I – 11}$$

Le produit scalaire de ces deux vecteurs détermine l’angle d’incidence *i* :

$$\cos(i) = \vec{n}\vec{u} = \begin{pmatrix} \cos(y) \sin(\alpha) \\ \cos(y) \cos(\alpha) \\ \sin(y) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(h) \sin(\alpha) \\ \cos(h) \cos(\alpha) \\ \sin(h) \end{pmatrix} \tag{I – 12}$$

$$\cos(i) = \cos(\alpha)\cos(\gamma)\sin(\alpha)\cos(h) + \cos(\alpha)\cos(\gamma)\cos(h) + \sin(\gamma)\sin(h) \quad (I - 13)$$

$$\cos(i) = \cos(\alpha - \alpha) \cos(\gamma) \cos(h) + \sin(\gamma) \sin(h) \quad (I - 14)$$

Cette équation peut être écrite d'une autre manière, à l'aide de l'équation des passages d'un système de coordonnées à un autre. On peut écrire l'angle d'incidence en coordonnées horaires, équation (I-15).

$$\begin{cases} \sin(h) = \cos(\gamma) \cdot \cos(h) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \\ \sin(\alpha) = \frac{\cos(\gamma) \cdot \cos(H)}{\cos(h)} \end{cases} \quad (I - 15)$$

L'expression du rayonnement direct dépend de l'azimut du capteur, la hauteur du capteur γ , l'angle d'incidence i , la hauteur du soleil h , et l'angle d'inclinaison β .

- Soleil à midi (azimut nul $\alpha=0$) :

Pour un plan horizontal orienté sud ($\beta = 0 \Rightarrow \gamma = 90^\circ$, et $\alpha = 0$) suivant la figure (I-12- a)

$$I_\alpha = I_o = I \cdot \sin(h) \quad (I - 16)$$

Pour un plan incliné sur l'horizontal et orienté sud (I-12-b).

On a :

$$\begin{cases} i = 90^\circ - (h + \alpha) \\ I_\alpha = I \cdot \cos(i) = I \cdot \sin(h + i) \end{cases} \quad (I - 17)$$

- Azimut quelconque : $\alpha \neq 0$

Pour un plan vertical orienté sud ($\beta = 90^\circ \Rightarrow \gamma = 0^\circ$, et $\alpha = 0^\circ$), la figure (I-12-c).

On a:

$$I_\alpha = I \cdot \cos(h) \cos(\alpha) \quad (I - 18)$$

Pour un plan incliné d'un angle α sur l'horizontal et orienté sud (I-12-d), I_α est la résultante de deux composantes projetées sur la normale au plan du capteur. L'une perpendiculaire à l'horizon : $I \cdot \sin(h)$, l'autre dans le plan de l'horizon, pointant vers le sud : $I \cdot \cos(h) \cdot \cos(\alpha)$.

La somme des projections donne :

$$I_{\alpha} = I(\sin(h) \cos(\alpha) + \cos(h) \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha)) \quad (I - 19)$$

Pour un plan vertical d'orientation quelconque γ dont la normale fait un angle γ avec le plan méridien (I-12-e).

On a :

$$\begin{cases} \alpha = 90^{\circ} \\ \text{et} \\ I_{\alpha} = I \cdot \cos(h) \cdot \cos(\gamma - \alpha) \end{cases} \quad (I - 20)$$

Pour un plan incliné d'inclinaison quelconque α et d'orientation quelconque γ figure (I-9-f).

$$I_{\alpha} = I(\sin(h) \cos(\alpha) + \cos(h) \cos(\gamma - \alpha) \sin(\alpha)) \quad (I - 21)$$

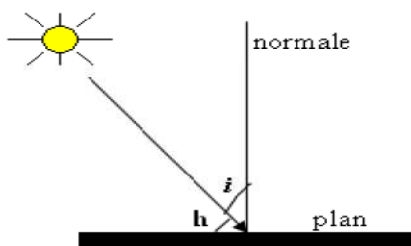


Figure (I-9-a)

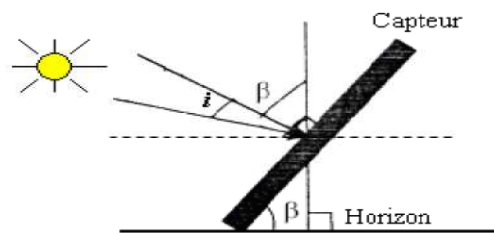


Figure (I-9-b)

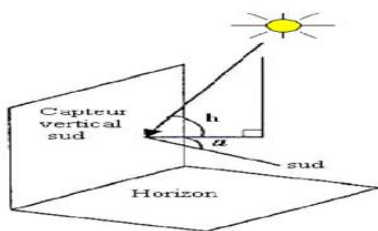


Figure (I-9-c)

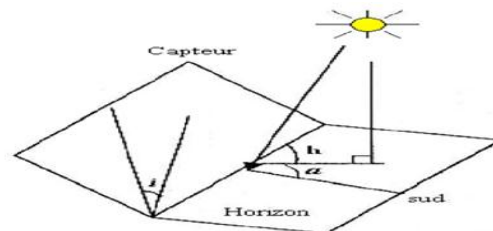


Figure (I-9-d)

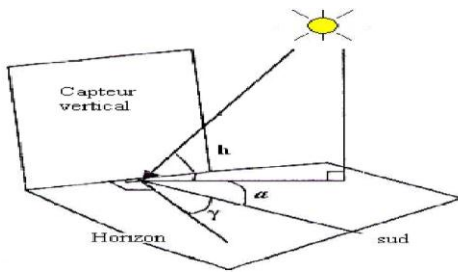


Figure (I-9-e)

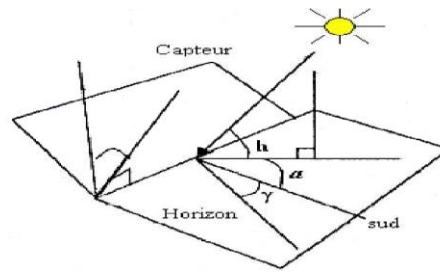


Figure (I-9-f)

Figure (I-9) : Mesure le rayonnement sur une surface d'inclinaison quelconque [22].

I-6.2 Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste [25].

Le rayonnement diffus (D_h) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions, Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [21].

Dans le plan du capteur le Rayonnement diffus est donné par [22]:

$$D(\alpha, \gamma) = \left(\frac{1 + \cos(\alpha)}{2} \right) \cdot D_h + Alb \left(\frac{1 - \cos(\alpha)}{2} \right) \cdot G_n \tag{I - 22}$$

Avec :

Alb: albédo (coefficient de réflexion du sol).

H:hauteur de soleil (degré).

D_h : diffuse sur plan horizontal.

G_n : global horizontal.

Pour un plan vertical $\Rightarrow D_v = 0.5(H_h + \alpha \cdot G_n)$

I-6.3 L'albédo ou Réfléchi :

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

$$\text{l'albédo(Alb)} = \frac{\text{energie réfléchie}}{\text{energie reçue}}$$

I-6.4 Rayonnement global :

Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires [25].

Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit:

$$G = I \cdot \sin(h) + D_h \quad (I - 23)$$

La figure suivante présente les appareils de mesure pour les différents types de rayonnement :

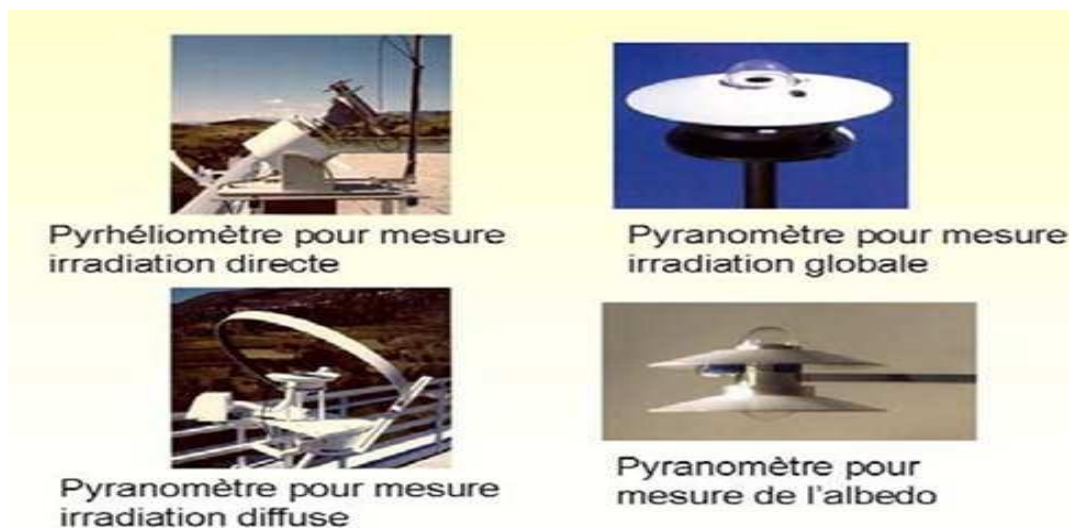


Figure (I-10): Appareils de mesure.

I-7 Conclusion :

Les données météorologiques concernant le rayonnement solaire ne sont généralement pas suffisantes pour pouvoir quantifier tous les phénomènes qui se produisent lorsqu'un Panneau photovoltaïque reçoit de la lumière. Une bonne connaissance du gisement solaire s'avère nécessaire.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur le gisement solaire. Comme les coordonnées terrestres et horaires, les temps de base et le mouvement de la terre autour de soleil. Ensuite, nous avons présenté les différents types de rayonnements (direct, diffus, albédo et global) et les expressions mathématiques de chaque rayonnement selon la variation d'inclinaison et d'orientation.



CHAPITRE : II

Fabrication d'un module photovoltaïque

II-1 Différentes générations du photovoltaïque :

Le parc photovoltaïque mondial représente actuellement 27,76 GW produisant une énergie de 100,4 TWh par an selon l'agence internationale de l'énergie (AIE) [26]. Bien que l'apport du photovoltaïque dans l'énergie mondiale reste relativement faible vu les problèmes rencontrés lors de la conversion énergétique, les coûts de productions et le stockage d'énergie. C'est pourquoi de nombreuses études et recherches se font pour améliorer et essayer de résoudre ce genre de désagrément et pour cela nous allons voir brièvement les technologies actuelles disponibles pour mieux appréhender l'importance des recherches sur les nouveaux matériaux semi-conducteurs.

A l'heure d'aujourd'hui, on distingue trois générations de cellules photovoltaïques en fonction de leurs technologies :

II-1.2 Première génération :

Cette génération est la plus répandue dans le marché des panneaux photovoltaïques et largement commercialisée, elle est basée sur l'utilisation de plaquettes en silicium cristallin sciées à partir de lingots de silicium. On obtient ces lingots après divers processus de purification permettant au matériau de contenir 99.99999% de Silicium [27].

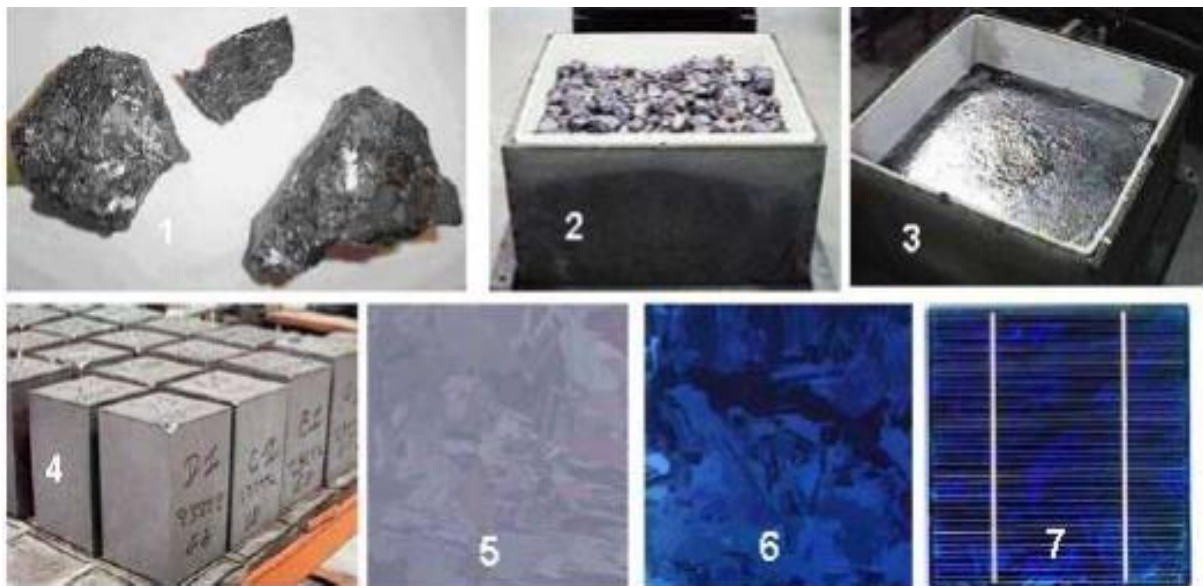


Figure (II-1): Etapes de fabrication des cellules Si (Source. DEFIELEC).

Pour la fabrication de cellules photovoltaïques à base de Si, on passe par plusieurs étapes :

- 1-Minerais 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.
- Cellules Silicium monocristallin, poly cristallin et ruban:



Figure (II-2): Cellule Si monocristallin(sc-Si) (Source. EPSIC).

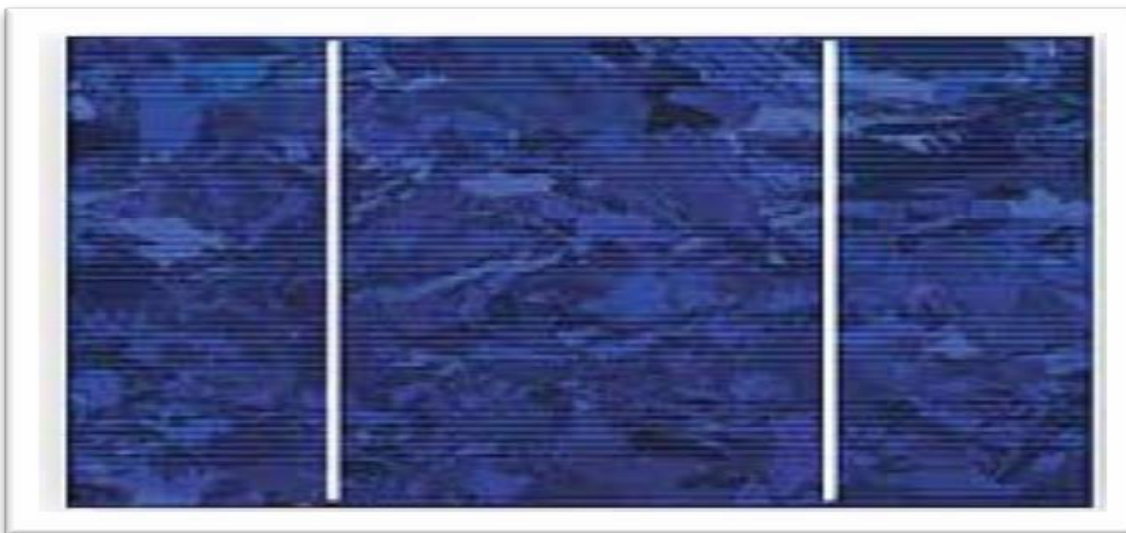


Figure (II-3): Cellule Si polycristallin(Mc-Si) (Source. EPSIC).

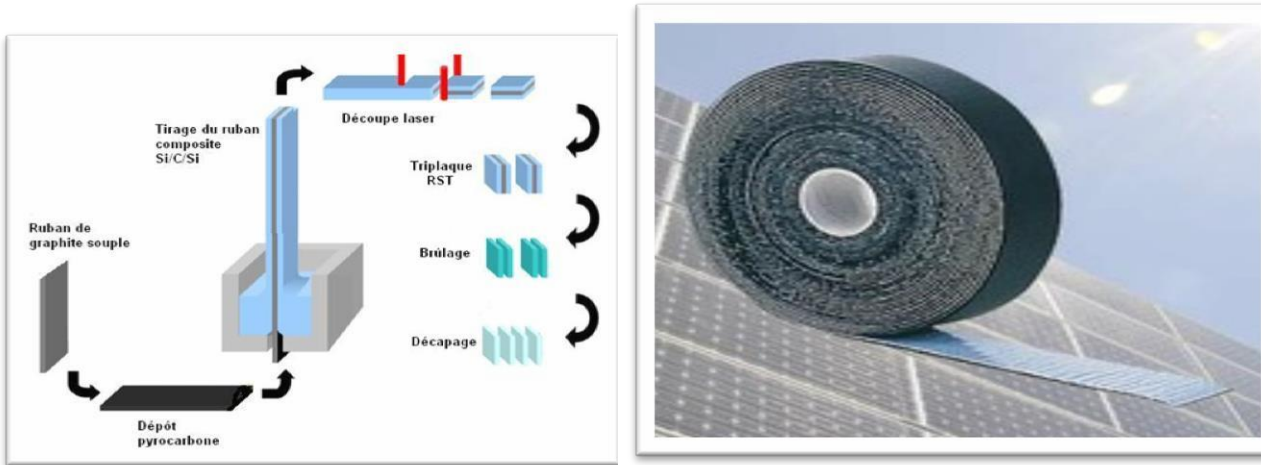


Figure (II-4): Cellule Si ruban (c-Si) tirée de la technologie RST (Source. Solarforce).

- **Les cellules monocristallines:** Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire); Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très onéreuse; technologie qui demande beaucoup d'énergie pour obtenir un cristal pur [28].
- **Les cellules poly-cristallines :** coût de production moins élevé ; Procédé nécessitant moins d'énergie ; Rendement 11-13% (18% en Laboratoire) [29].
- **Les cellules ruban :** Cette technologie RST (Rapid Storage Technology) combine les étapes de cristallisation et de mise en forme du silicium, et présente l'avantage de minimiser la perte de matière. Les essais et résultats obtenus de caractérisation sur cellules à partir des plaquettes sont aujourd'hui en termes de rendement de conversion d'ores et déjà autour de 15% [30].

II-1-2.2 Deuxième génération :

- Cellules CdTe, CIS/ CIGS, silicium amorphe et microcristallin :

Après vingt années de recherches et de développement cette génération de cellules solaires qui repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film) commence à prendre de plus en plus de place sur le marché des panneaux photovoltaïques, vu sa consommation moins énergivore que celle de la première génération. Cependant, les cellules à base de Silicium apportent plus de rendement [31].

Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapeur Deposition), CBD (Chemical Bath Deposition, Sol Gel, Spary, Spin Coating... etc) sur un substrat léger et peu couteux. L'épaisseur de la couche varie de quelques nanomètres à

des dizaines de micromètres [32]. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales 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. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement, on distingue :

CdTe : Telluride de Cadmium (Cadmium Telluride), rendement de 16,7% en laboratoire [33].

CIS : Cuivre Indium Selenium (Copper-Indium-Selenide) et **CIGS** : Cuivre Indium Gallium Sélénium (Copper-Indium-Gallium-Diselenide), rendement de 20,3% en laboratoire [34], [33].

Silicium amorphe **a-Si** et microcristallin **μ c-Si**, rendement de 12,2% en laboratoire [35].

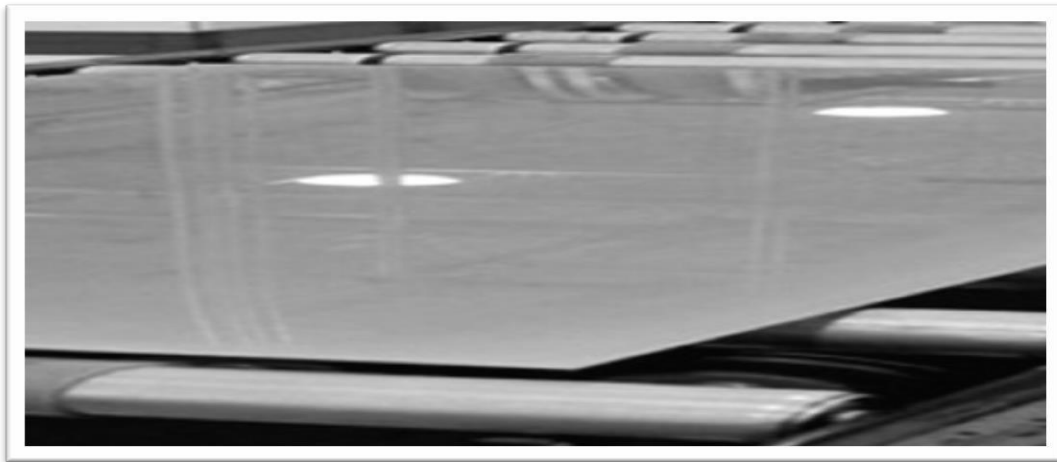


Figure (II-5): Modules verre en CdTe efficacité de 18,7%(Source. Enerzine).



Figure (II-6): Cellule CIS d'efficacité de 20% (Source. Esolaire).

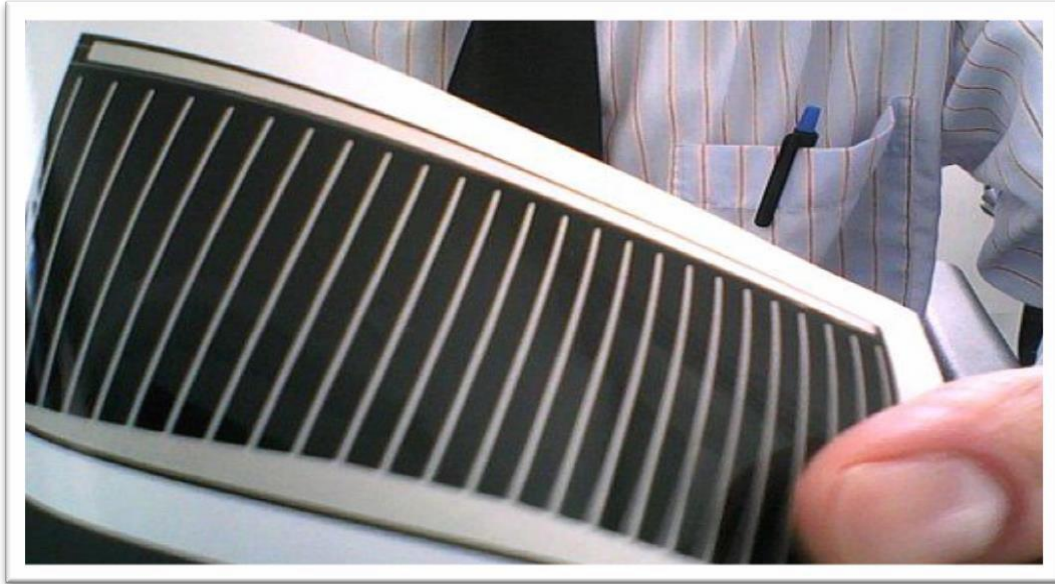


Figure (II-7): Cellule en CIGS, efficacité de 8,5% (Source. Dantor).

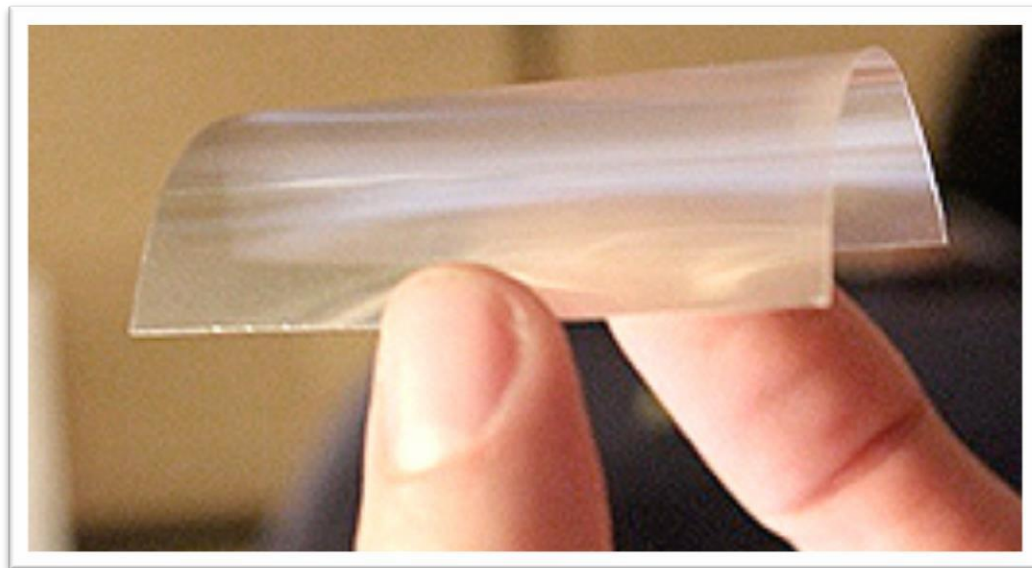


Figure (II-8): Film PV transparent avec un rendement de 10 % (Source. Futura-science)

II-1.2.3 Troisième génération :

➤ **Cellules CPV, DSSC, organiques, nouveaux concepts innovants :**

Après divers recherches et développement les cellules photovoltaïques de la troisième génération introduisent de nouvelles notions et technologies encore plus novatrices parmi elles :

➤ **Cellules photovoltaïques à concentration (CPV) :**

Un système qui utilise des dispositifs optiques tels que des miroirs ou lentilles où les cellules en multi jonction semi conductrices captent du plus petit au plus grand rayonnement solaire [36].

➤ **Cellules à colorant (DSSC-Dye-sensitized solar cells) :**

Cellules solaires à colorant utilisent, la photo électrochimie ; des cellules solaires, qui sont basées sur des structures semi-conductrices formées entre une anode et une photo- sensibilisée électrolyte. Dans un DSSC typique, les semi-conducteurs nano cristaux servent antennes qui récoltent la lumière du soleil (photons) et la molécule de colorant est responsable de la séparation des charges photo courant [37].

➤ **Cellules organiques :**

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 : cellules photovoltaïques organiques moléculaires; cellules photovoltaïques organiques en polymères. L'efficacité des modules commercialisés est de 4% à 5 % et ceux en expérimentation de 6% à 8 % [38].

➤ **Cellules aux concepts innovants :**

Ce sont les cellules qui utilisent la nanotechnologie puisque à cette échelle nanométrique, les propriétés des matériaux changent. Les physiciens tentent d'en tirer profit et de réaliser des structures de plus en plus efficaces et à moindre coût [39], [40].



Figure (II-9): Centrale solaire à Concentration (CPV), puissance 19,9 GW, Seville (Source.

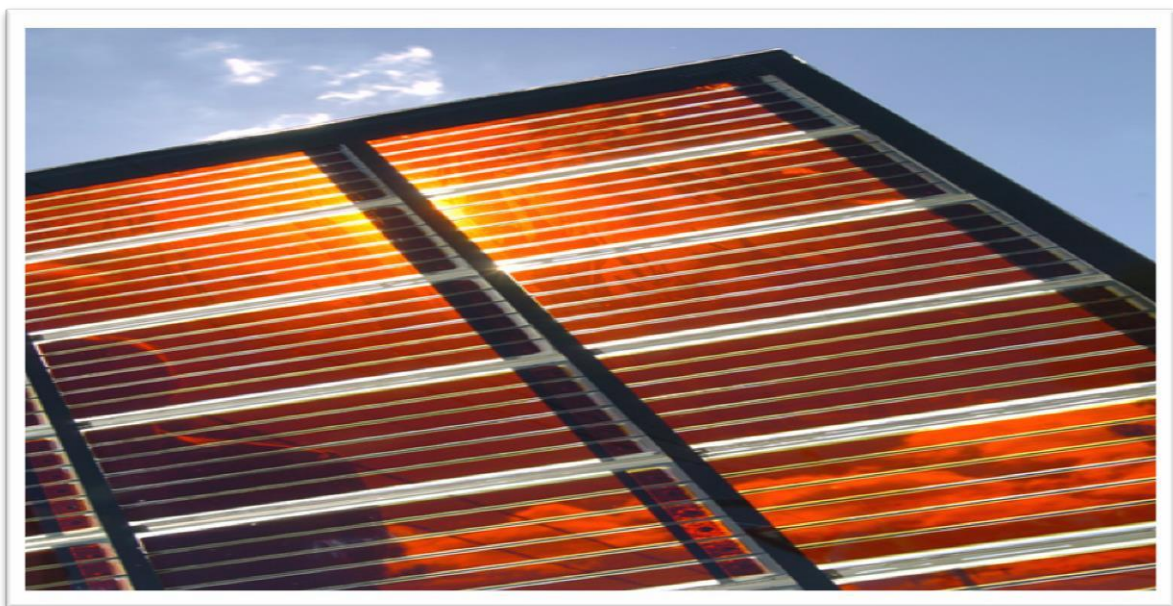


Figure (II-10): Cellule dye sensitized solar cell panel (Source. Dyesol).

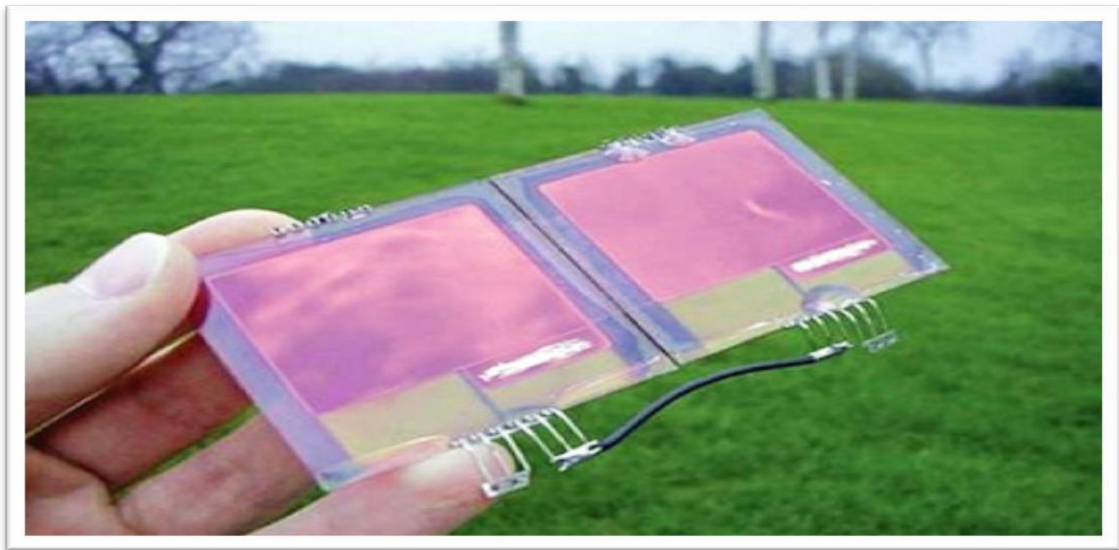


Figure (II-11): Cellule photovoltaïque organique (Source. Cambridge).

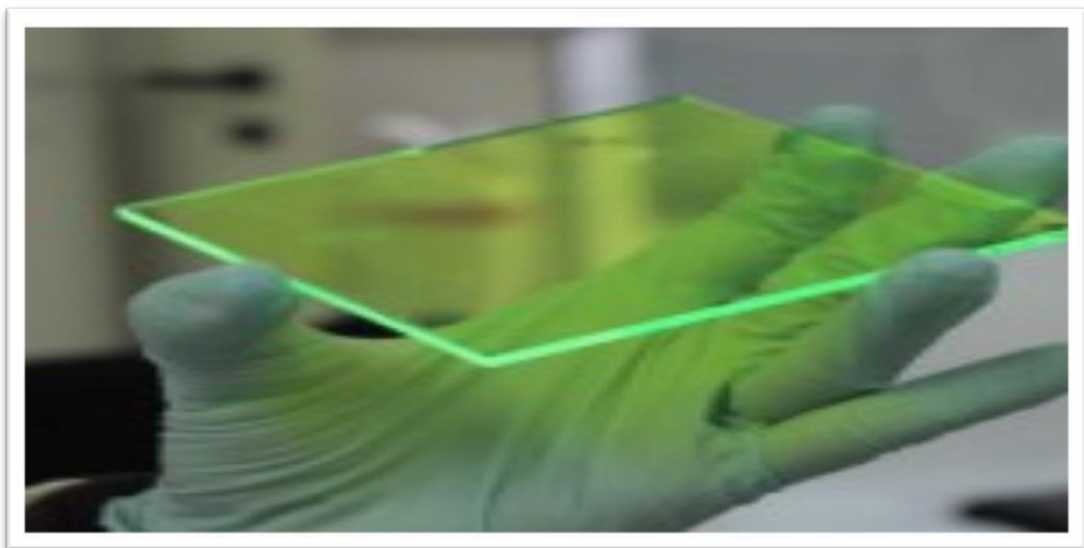


Figure (II-12): Cellule solaire à base de nanoparticule (Source. Greensun Energy).



CHAPITRE : III

Étude théorique d'une cellule solaire photovoltaïque

III-1 Introduction :

Ce chapitre présente la description du dispositif expérimental: le capteur solaire photovoltaïque utilisé dans notre étude à savoir ; sa composition, son principe de fonctionnement et la description de la procédure expérimentale.

III-2 Techniques pour capter l'énergie solaire :

Les techniques pour capter directement une partie de cette énergie sont disponibles et sont constamment améliorées. On peut distinguer le solaire thermique, la solaire thermodynamique et le solaire photovoltaïque [41].

III-2.1 L'énergie solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. Il se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur: chauffe-eau et chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires.
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage: rafraîchissement solaire, centrales solaires thermodynamiques. [41].

III-2.2 L'énergie solaire thermodynamique :

La solaire thermodynamique est une technique solaire qui utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité, ou éventuellement directement du travail mécanique (le terme *solaire mécanique* est alors employé), sur le même principe qu'une centrale électrique classique (production de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée). [41].

III-2.3 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire chez un particulier ou dans une centrale solaire photovoltaïque. L'installation solaire peut alimenter un besoin sur place (en association avec un moyen de stockage) ou être injectée, après transformation en courant alternatif, dans un réseau de distribution électrique (le stockage n'étant alors pas nécessaire).

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque découvert par Antoine Becquerel en 1839, ou la technologie associée. [41].

III-3 Les filières technologiques :

Une cellule photovoltaïque est constituée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus.

En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces filières se partagent inégalement le marché.

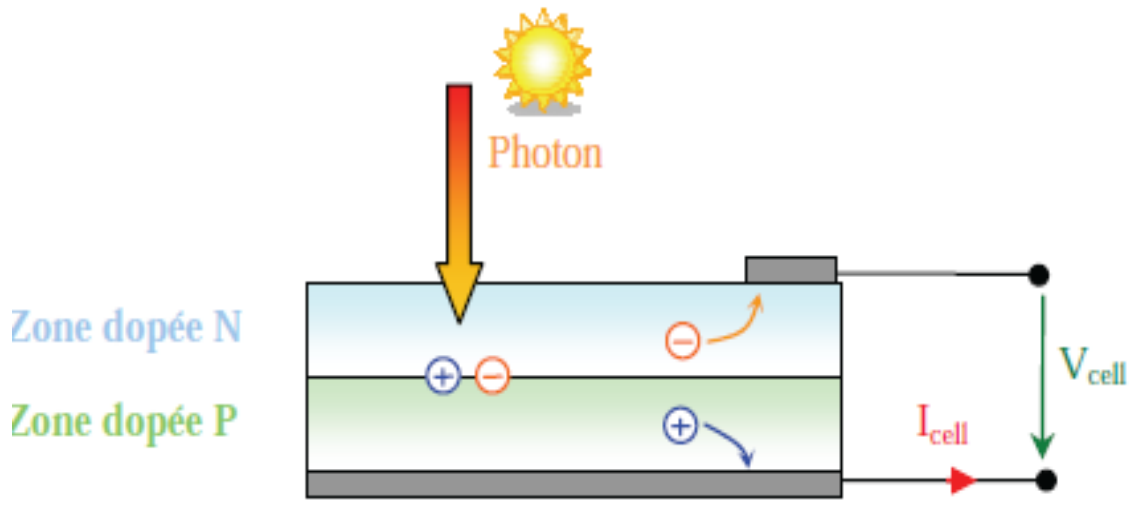


Figure (III-1): Principe de fonctionnement d'un panneau solaire.

III-3.1 La jonction p-n :

Une jonction p-n est la juxtaposition de deux zones dopées pour améliorer la conductivité du matériau:

- Une zone de type p qui possède un excès de trous avec la présence d'atome de la colonne III du tableau périodique (typiquement le bore), où la conduction s'effectue par les trous.
- Une zone de type n qui possède un excès d'électrons avec la présence d'atome de la colonne V du tableau périodique (typiquement le phosphore), où la conduction s'effectue par les électrons.

A la jonction des zones p et n, il se crée une zone de charges d'espace de quelques micromètres avec une zone n chargée positivement et une zone p chargée négativement. Il se crée donc un champ électrique qui repousse les électrons dans la zone n et les trous dans la zone p. En ajoutant des contacts électriques à la jonction p-n, une diode est réalisée.

Si on polarise la diode en sens inverse (borne + du générateur raccordée à la zone n), le courant qui parcourt la jonction est très faible car il est dû aux porteurs minoritaires.

Si on polarise la diode en direct (borne + du générateur raccordée à la zone p), la différence de potentiel aux bornes de la jonction doit être suffisamment élevée pour annuler la différence de potentiel présente dans la jonction à l'équilibre [42].

III-3.2 Le silicium :

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employé et /ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte trois technologies: le silicium monocristallin et le silicium multicristallin, silicium amorphe [43].

III-3.2.1 Silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque.

Le rendement du silicium monocristallin est plus élevé, il est compris entre 12 et 20% [44] pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin.

III-3.2.2 Le silicium multicristallin :

Le silicium multicristallin (polycristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée, A elle seule elle représente près de 50% du marché [44]. Ces cellules sont obtenues par couplage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène, son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants [44]. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles.

III-3.2.3 Le silicium amorphe :

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficultés pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par

un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible.

La désorganisation atomique a d'autres conséquences : les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent agir sur les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a-Si:H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes.

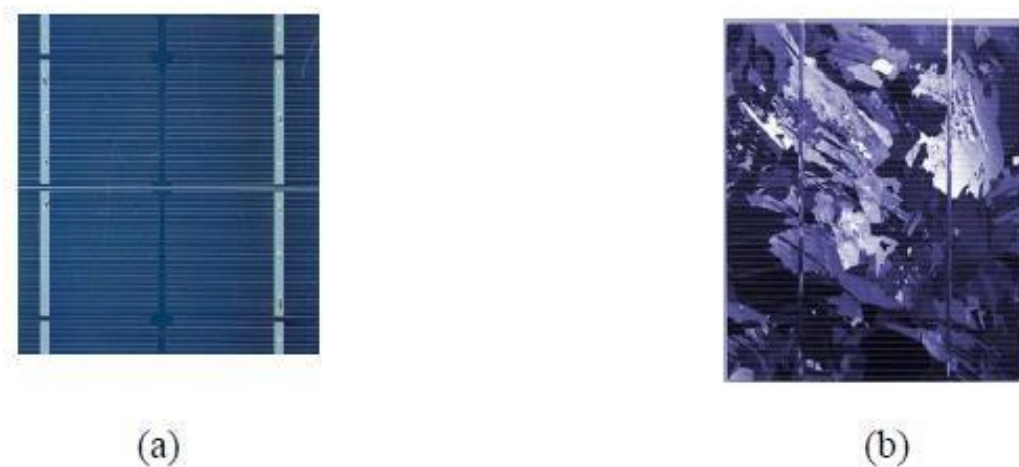


Figure (III -2): Photos de cellules monocristallin (a) et multicristallin (b).

III-3.3 Les couches minces :

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui. Malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kilo Watt crête KWc. Le kilo Watt crête (KWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux conditions de test standards ($1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ et 25°C).

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mûre est celle du silicium amorphe (a-Si) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial [44].

L'avantage de cette technique est l'utilisation des substrats à bas coûts. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples figure (III-3) et fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que celui des cellules cristallines, il est d'environ 7% [44].

L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Par conséquent, ces cellules sont une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19% [44]. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et l'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques.



Module souple Unisolar (68Wc, 1,12 m²).



Module rigide Sharp (115Wc, 1.42 m²).

Figure (III.3) : Deux exemples de modules utilisant Sia (silicium amorphe).

III-4 Le principe de l'effet photovoltaïque :

C'est un phénomène physique 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 et de vieillissement de la cellule.

III-4.1 La cellule photovoltaïque :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possède une bande interdite, qui joue le rôle de la barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

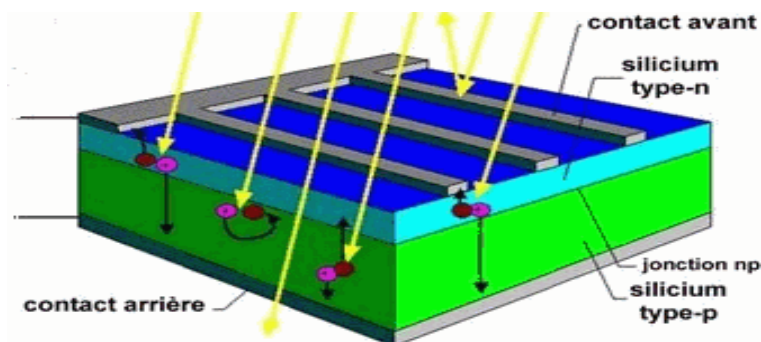


Figure (III-4): Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.

III-4.2 Modèle d'une cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque peut être illustrée par son schéma équivalent comme le montre la figure (III -5).

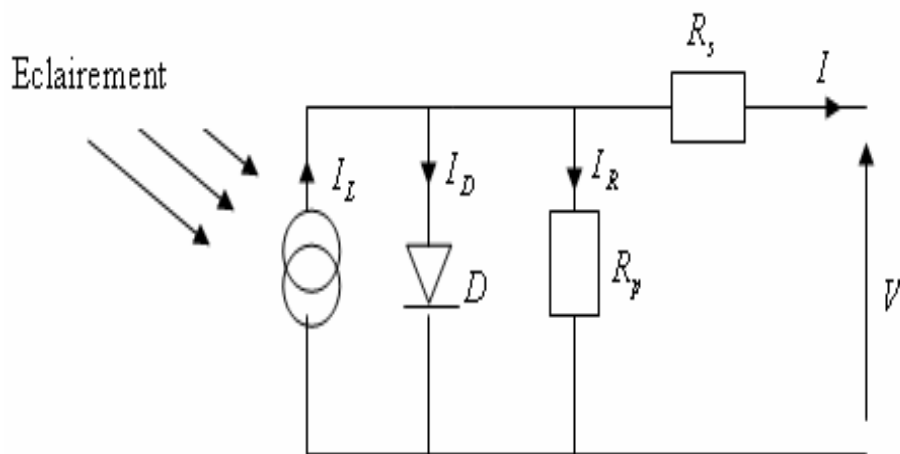


Figure (III-5) : Circuit équivalent de la cellule solaire

La cellule comporte une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_p). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

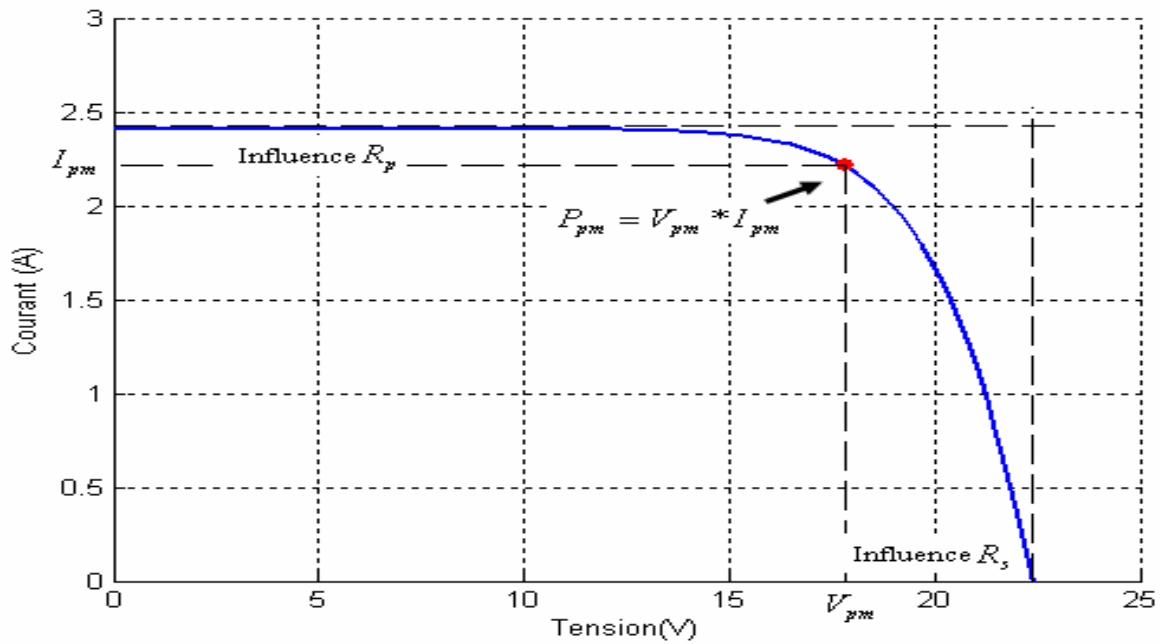


Figure (III-6): Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

III-4.3 Présentation du modèle mathématique :

A partir de la figure (III-3) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante:

$$I_L = I_D + I_R + I \quad \text{(III-1)}$$

Le courant de jonction $D I$ est donné par :

$$I_D = I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + I R_S}{n k T} \right)} - 1 \right) \quad \text{(III-2)}$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par :

$$I_R = \frac{V + R_S I}{R_p} \quad \text{(III-3)}$$

A partir de l'équation (III-1), on obtient l'expression de courant I :

$$I = I_L - I_D - I_R \quad \text{(III-4)}$$

Remplaçons dans (III-4) les équations (III-2) et (III-3) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_S I}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_p} \quad \text{(III-5)}$$

Où :

I : Le courant de cellule.

V: La tension de cellule.

R_S : La résistance série de la cellule. [Ω]

T : La température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

q: La charge d'électron $e = 1.6 * 10^{-19}$ C.

I_0 : Le courant de saturation [A]

V_g : La tension de seuil de diode (1.1V).

N: Le facteur de qualité de diode.

K : La constante de Boltzman ($1.3854 * 10^{-2}$ JK $^{-1}$).

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (III-5) devienne:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + R_S I}{n k T} \right)} - 1 \right) \quad \text{(III-6)}$$

L'équation (III-6) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquée.

III-4.4 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes [45]:

➤ Courant de court-circuit:

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est Nulle. Dans le cas idéal (R_S nulle et R_P infinie), ce courant se confond avec la photo courant I_L dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (III-2), on obtient:

$$I_{cc} = I_L - I_0 \left(e^{q \left(\frac{R_S I_{cc}}{n k T} \right)} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_S}{R_P} \quad \text{(III - 7)}$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le Terme $I_0 \left(e^{q \left(\frac{R_S I_{cc}}{n k T} \right)} - 1 \right)$ devant I_L .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{CC} = \frac{I_L}{\left(1 + \frac{R_S}{R_P}\right)}$$

➤ **Tension de circuit ouvert:**

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_L - I_0 \left(e^{q \frac{V_{co}}{nkT}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_P} \quad (\text{III} - 8)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = \left(\frac{q}{nkT} \right) * \ln \left(\frac{I_c}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{III} - 9)$$

➤ **Facteur de forme:**

On appelle facteur de forme FF , le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_{pm} * I_{pm}$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{CC} * V_{co}$.

Où : I_{CC} intensité de court-circuit et V_{co} tension de circuit ouvert

$$FF = \frac{I_{pm} \cdot V_{pm}}{I_{CC} \cdot V_{co}} \quad (\text{III} - 10)$$

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%.

➤ **Le rendement :**

Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{CC}}{P_{in}} \quad (\text{III} - 11)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [46].

Conclusion :

Le dispositif utilisé durant cette étude est un capteur solaire photovoltaïque, c'est un système de démonstration photovoltaïque, Il comporte :

- Deux modules solaires à technologie monocristalline, ils sont inclinables et peuvent être raccordés en série ou en parallèle.
- Un appareil de mesure combiné à affichage numérique, il permet d'afficher les valeurs du courant, de voltage et de la température .
- Une résistance à curseur.

Après avoir effectuer les essais de reproductibilité, les résultats sont similaires donc on peut dire que notre dispositif est fiable.



CHAPITRE : VI

ETUDE

EXPERIMENTALE

IV.1 CONSTRUCTION DE L'APPAREIL UTILISE :

La diapositive utilisée durant notre étude est un capteur solaire photovoltaïque existant au niveau du laboratoire de physique énergétique. Figure (IV.1).

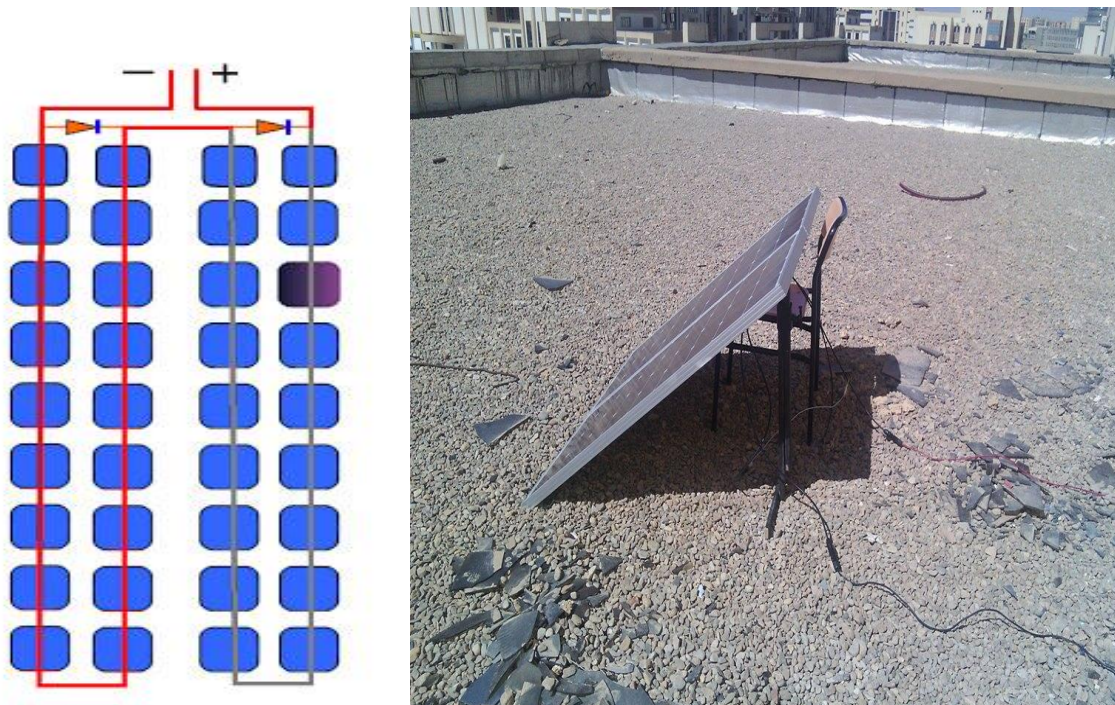


Figure (IV-1): Capteur solaire photovoltaïque.

Les caractéristiques du module solaire utilisé sont illustrées dans le Tableau (IV.1)

Paramètres électriques	Solar module type : SFM-100
Maximum power (Pmax) :	100 WP
Voltage at Pmax (Vmp) :	18.1 V
Current at Pmax (Imp) :	5.51A
Open-circuit Voltage (Voc) :	21.6V
Short-circuit Current (Isc) :	6.06A

Tableau(IV-1): Caractéristiques du panneau solaire utilisé.

Capteur de température:

Le capteur de température utilisé est un thermomètre digital avec sonde placé directement sur la couverture (vitre) du capteur, Figure (IV-2).



Figure (IV-2): Thermomètre digital .

IV-1 Mesure du rayonnement solaire :

A cause du manque de détecteur de luminosité pour mesurer la puissance solaire au site de M'Sila, nous avons élaboré un programme de calcul écrit en langage Fortran. Il suffit d'entrer les coordonnées géographiques et le numéro de jour dans l'année.

- **Coordonnée géographique de site de M'Sila :**
 - **Latitude :** 35° 42' Nord.
 - **Longitude :** 4° 32' East.

IV- 1.1 Etude du rayonnement solaire :

L'analyse du rayonnement solaire permet d'exploiter la quantité d'énergie produite par le soleil pour un jour, un mois, ou une année. Le rôle d'inclinaison saisonnière des capteurs photovoltaïque est très important pour l'évolution de cette quantité d'énergie. Il peut varier même à chaque seconde. Rappelons aussi que l'évolution de ces rayonnements dépend des caractéristiques du site choisi tel que la latitude, l'altitude et la longitude. Nos expériences ont été effectuées au niveau du pôle de l'Université de M'sila. Tous ces paramètres nous permettent d'expliquer les résultats obtenus dans les mesures d'éclairement solaire.

IV-2 Variation temporelles des puissances solaires globales incidentes sur un plan horizontale :

Avec les Coordonnée géographique de site de M'Sila , la figure (IV-3.a- IV-3.b) représente la variation des puissances solaire globale théorique calculer à l'aide d'un programme écrit en langage Fortran au cours de la journée avec un angle d'inclinaison ($\beta=0$) où le capteur et dirigée vers le soleil directe puis vers le sud.

Nous notons que la plus grande valeur du rayonnement solaire est à midi dans tous les saisons et quelque soit l'orientation du capteur, et cela parce que l'intensité du rayonnement solaire est perpendiculaire à la surface de la terre à ce moment de la journée et au jour de 21 juin (c'est le solstice d'été). On remarque aussi dans cette figure que l'orientation du capteur vers le soleil directe assure le maximum d'énergie incident pendant le jour dans tous les saisons.

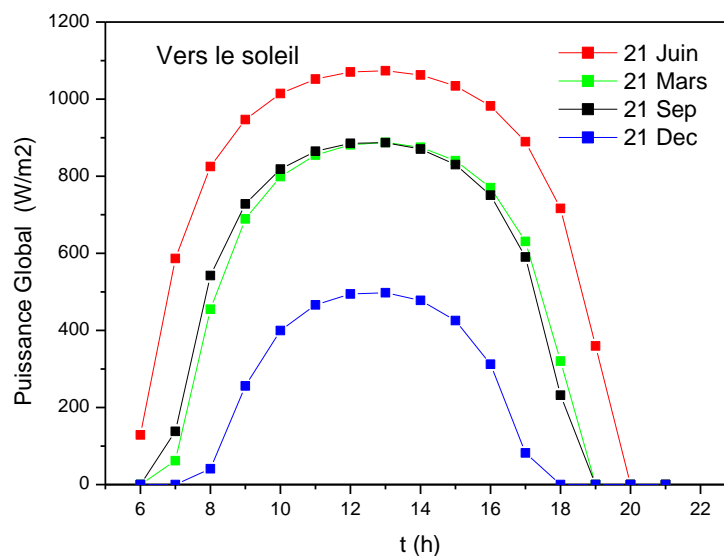


Figure (IV-3.a): Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison ($\beta=0$).

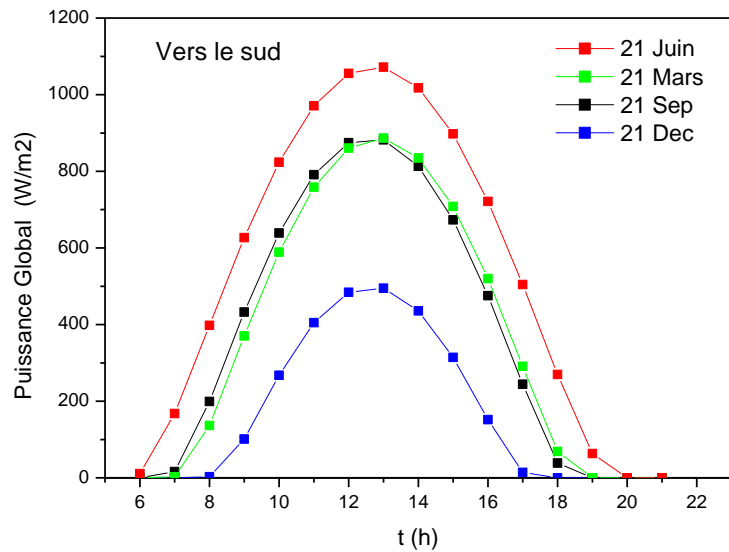


Figure (IV-3.b): Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison ($\beta=0$).

IV-2.1 Variation temporelles des puissances solaires globales incidentes sur un plan incliné :

La figure (IV-4) représente l'évolution des différents éclairagements solaires incidents sur un plan incliné d'un angle $\beta=37^\circ$ et orienté plein sud elle permet de remarquer que l'éclairage solaire reçu par un capteur au cours de la journée est nul au lever du jour puis il commence à croître avec le temps, il atteint un maximum vers 13 h, après il commence à décroître pour atteindre le zéro au coucher du soleil.

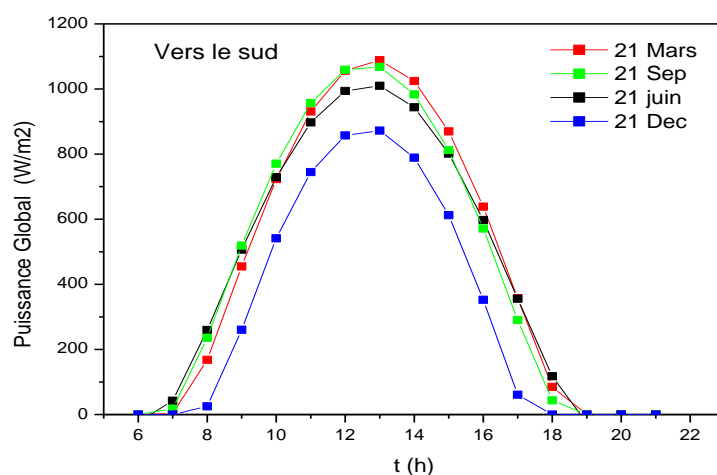


Figure (IV-4): Evolution temporelle des puissances globale du capteur à angle d'inclinaison (37°).

IV-3 l'angle d'inclinaison optimale :

Avant de commencer notre travail, nous avons effectué une chaîne de teste numérique et expérimentale pour trouver l'angle d'inclinaison optimale du capteur (**jour: 20 Avril**) . Nous avons aussi fixée son orientation vers le sud, puis nous avons calculé la puissance solaire globale numériquement pour des différentes angles d'inclinaison (0° - 90°) Figure (IV-5). Expérimentalement, nous avons varié l'angle d'inclinaison de (0° - 90°) aussi et on a mesuré le courant **I_{cc}** illustré sur la figure (IV-6).

On remarque que la puissance globale calculée numériquement et le courant électrique produit par le module solaire atteignent une valeur maximale d'angle situé entre 35° et 40° , donc ceci l'angle optimale qui est correspond à la latitude de M'Sila (35° ,42).

durant notre travail nous avons choisi l'angle de 37°

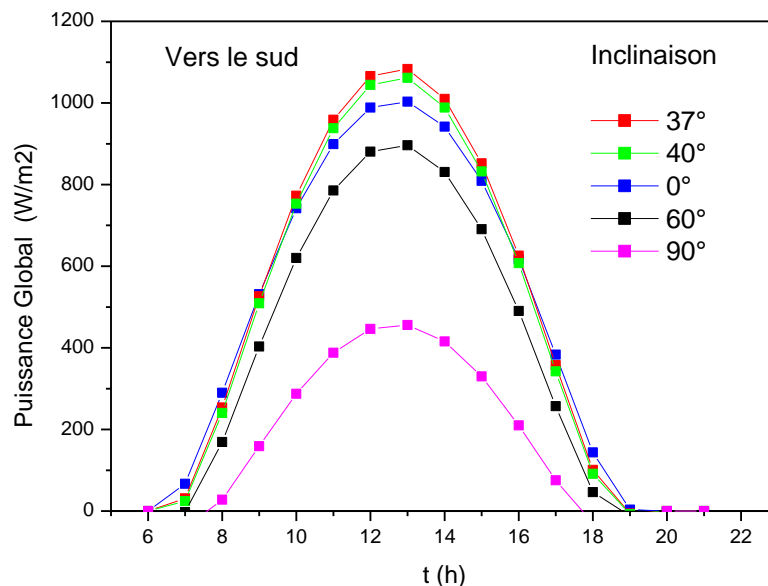


Figure (IV-5): Evolution temporelle des puissances globales (numérique) pour différents angles d'inclinaison.

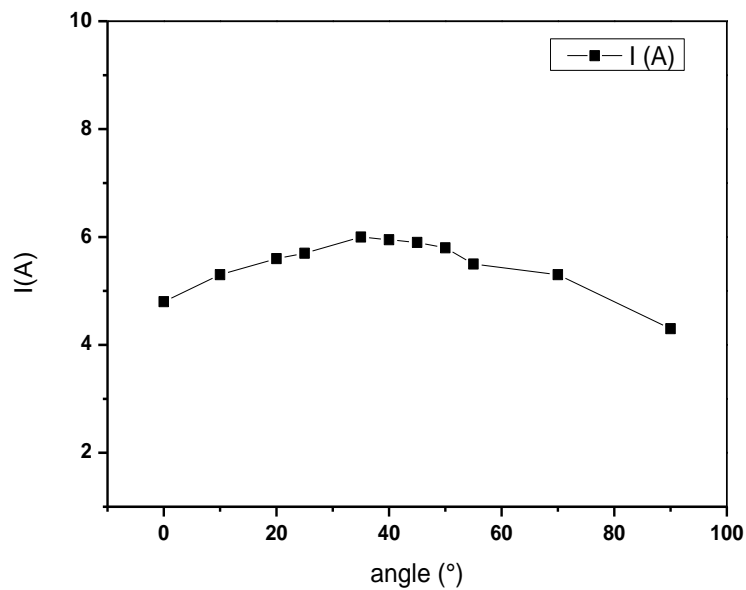


Figure (IV- 6): Evolution du courant (I_{cc}) en fonction de l'angle d'inclinaison.

IV-4 Procédure expérimentale

IV-4.1 Relation entre le potentiel et le courant électrique :

la relation théorique entre le potentiel et le courant électrique est une fonction logarithmique comme elle est indiquée dans le (Chap. III), donnée par : l'équation: (III-9).

$$V_{co} = \left(\frac{q}{nkT} \right) * \ln \left(\frac{I_c}{I_o} + 1 \right)$$

Pour vérifier cette relation nous avons installé le montage électrique présenté dans la figure (IV-7) :

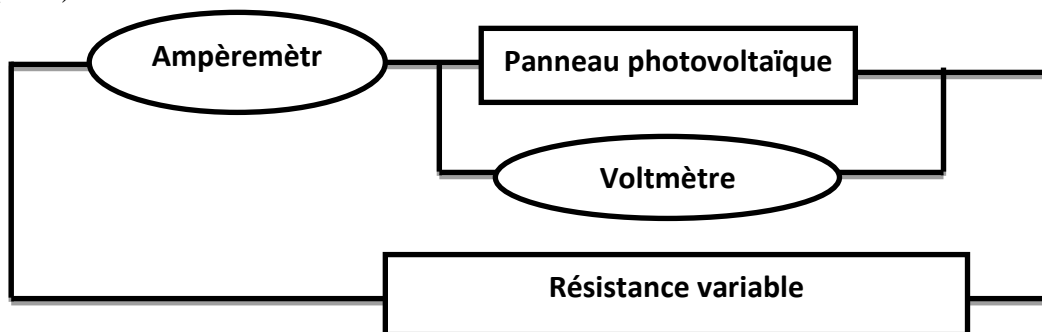


Figure (IV-7) : montage électrique.

On varie la résistance (rhéostat) et chaque fois nous mesurons le potentiel et le courant électrique Figure (IV-8) .D 'après cette figure, les résultats montre que le courant électrique varie exponentiellement avec le potentiel électrique.

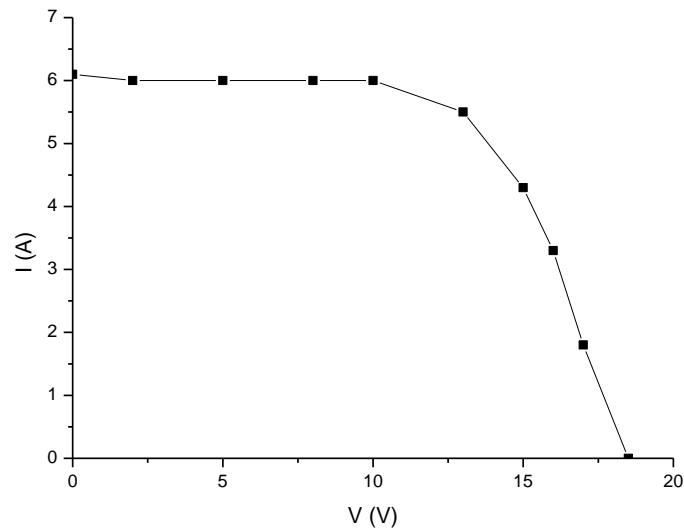


Figure (IV-8): Evolution de courant en fonction de tension électrique.

IV-4.2 Variation temporelle du courant et de potentiel :

Pour mesurer la tension **Voc** (tension à circuit ouvert) et le courant **Icc** (courant de court-circuit) au borne du panneau solaire voltaïque pendant quelques différents jours dans le mois d'Avril et de Mai nous avons choisi deux orientations de notre capteur, l'une vers le soleil direct et l'autre vers le sud (Angle d'azimut=0°).

a) Orientation vers de Sud

D'après les figures (IV-9) et (IV-10), on constate que l'allure de deux courbes celle de la tension et le courant ont des relations inverses.

La tension présente une valeur initiale de 21.7 (V) à 8h:30min puis elle commence de diminuer jusqu' atteindre une valeur minimale de 19.8 (V) à 13h:30mn.

Par contre pour courant il prend une valeur initiale de 3.7 (A) à 8h:30min ensuite il prend une valeur maximale de 6.1(A) vers midi puis il commence de diminuer.

Cette variation de courant et de tension est une relation directe avec l'intensité de la lumière reçue et la position de panneau.

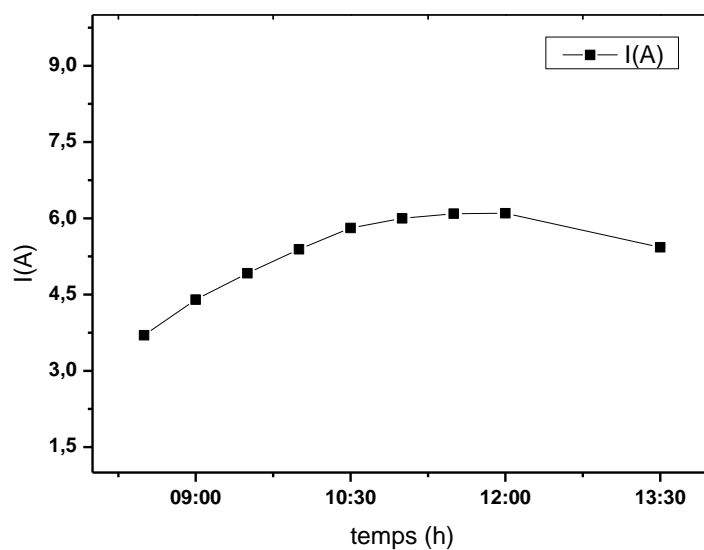


Figure (IV-9): Evolution du courant en fonction du temps (vers le Sud).

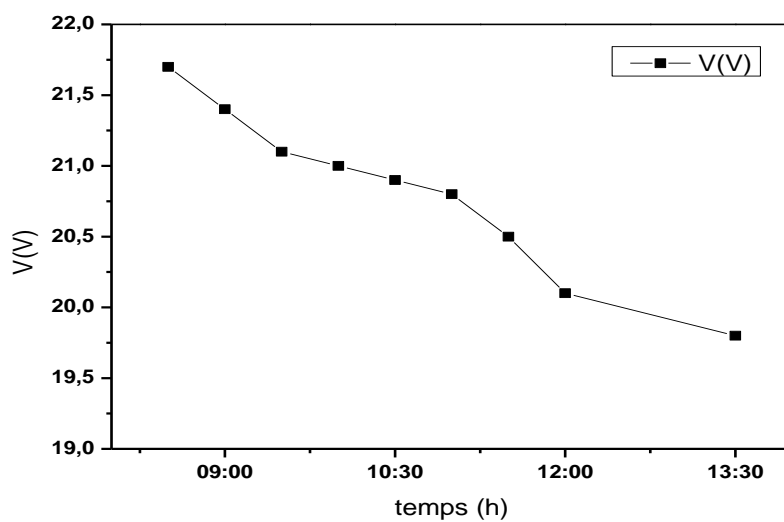


Figure (IV-10) : Evolution du tension en fonction du temps (vers le Sud).

b) Orientation vers le soleil directe :

Dans la même façon que l'essai précédent, on change la position de capteur solaire afin d'être dirigé vers le soleil directe et on a répété l'expérience le (25 /04/2017) en prélevant le courant et la tension de 8h:30min jusqu' à 17h chaque heure.

L'évolution de courant et tension en fonction du temps sont indiquées sur les figures (IV-11) et (IV-12) respectivement.

En effet, l'augmentation de l'intensité conduit à l'augmentation de température de la cellule solaire ce qui provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}).

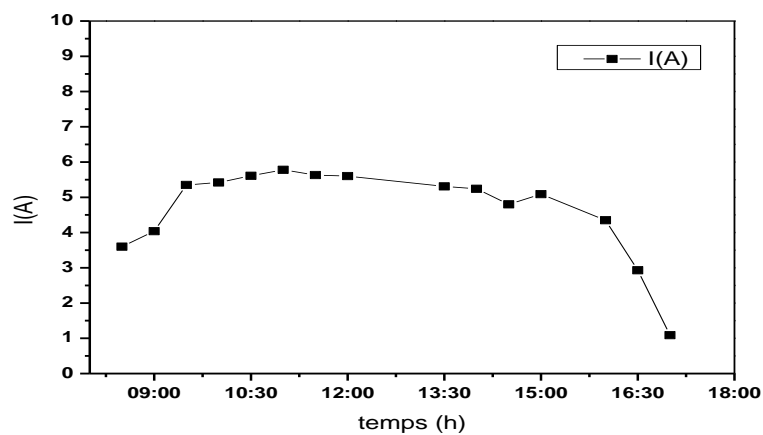


Figure (IV-11) : Evolution de courant en fonction du temps (vers le soleil).
(Passage du nuage à : 13 :30 – 16 :00 – 17 :00)

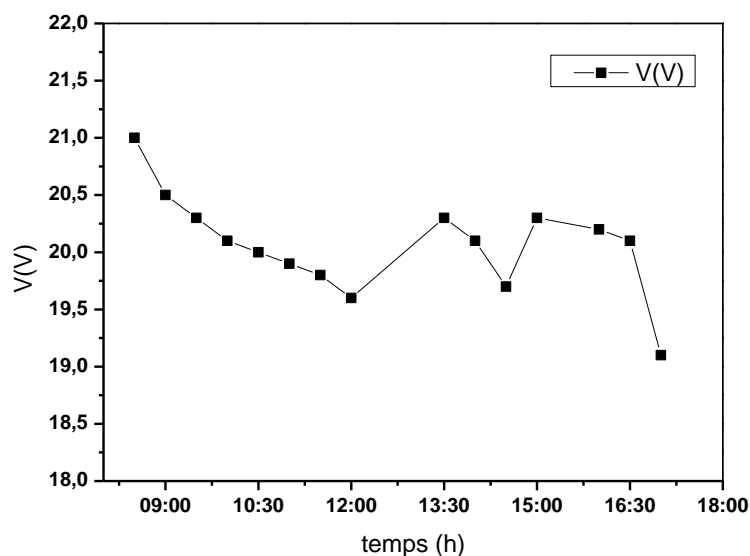


Figure (IV-12): Evolution du tension en fonction du temps (vers le soleil).
(Passage du nuage à : 13 :30 – 16 :00 – 17 :00).

IV-5 L'effet météo (Passage du nuage) :

Dans cette partie, nous présentons l'effet du passage de nuage sur la tension et le courant, figures (IV-13).

Le but d'exposition de cette expérience est de savoir le changement de courant et de tension dans état normale (météo stable) et dans l'état troublé (nuages).

Cette variation des valeurs de courant et de tension a relation une directe avec l'intensité de la lumière reçue mentionné précédemment qui montrent le rôle du rayonnement dans l'augmentation de la capacité de production.

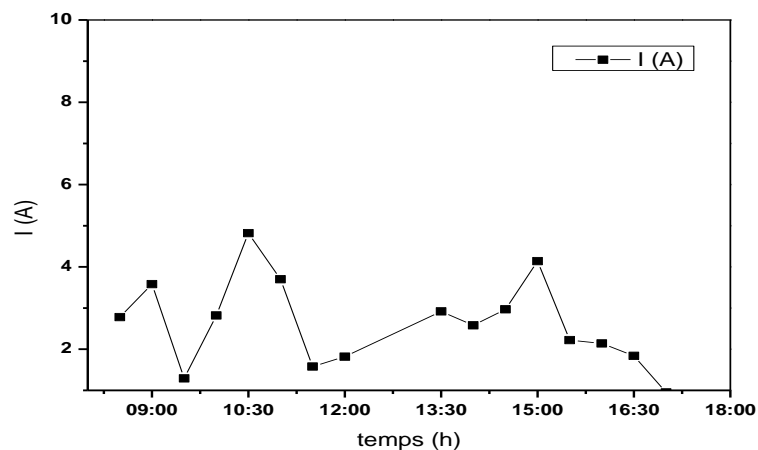


Figure (IV-13): Evolution du tension en fonction de temps (Passage du nuage).

IV-6 ASSOCIATION DES CELLULES SOLAIRES :

➤ En série :

Les figures (VI-14) et (IV-15) représentent la variation temporelle de la tension V_{oc} et de courant I_{cc} . En effet, l'association des panneaux solaires photovoltaïques en série permet d'augmenter la tension du générateur Photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue.

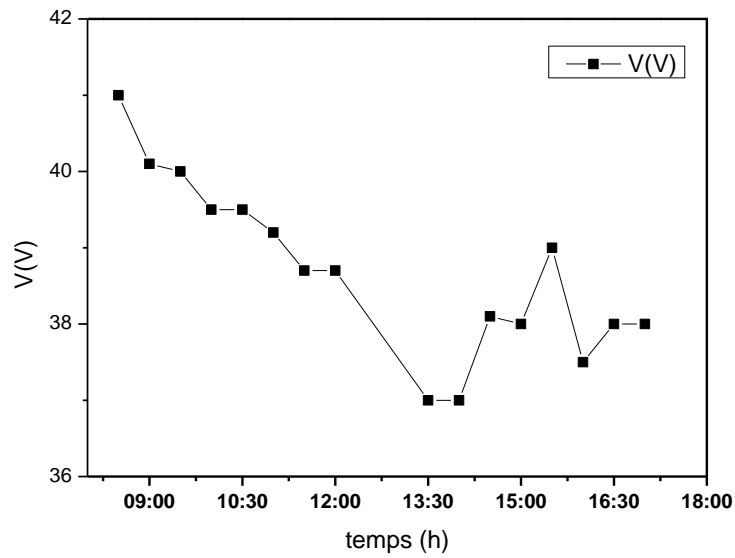


Figure (IV-14): Evolution de tension en fonction de l'intensité solaire.

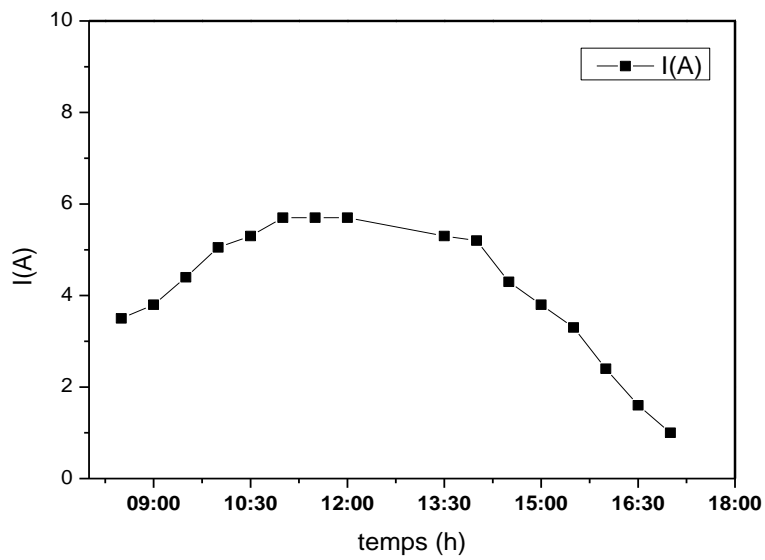


Figure (IV-15) : Evolution u courant en fonction de l'intensité solaire. (Association en parallèle)

➤ **En parallèle :**

D'autre part, une association parallèle des panneaux solaires photovoltaïques permet d'augmenter le courant de sortie du générateur et les cellules ont alors la même tension, les figures (IV-16) et (IV-17).

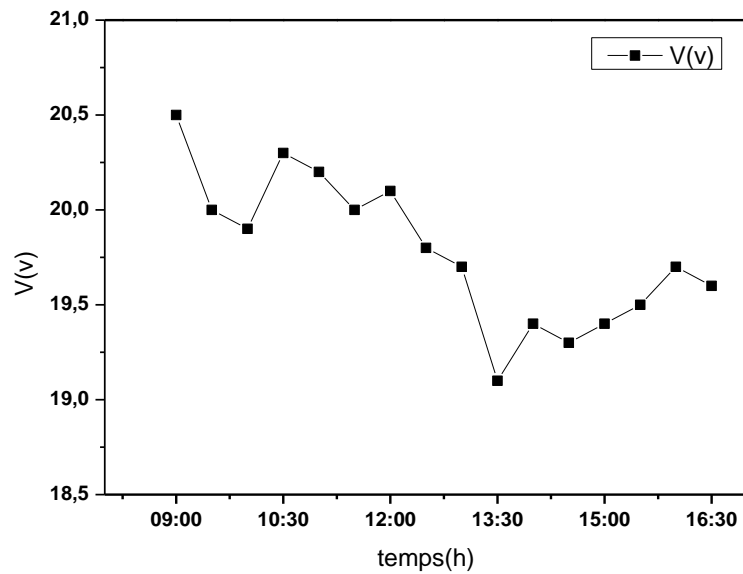


Figure (IV-16) : Evolution de tension en fonction de l'intensité solaire.

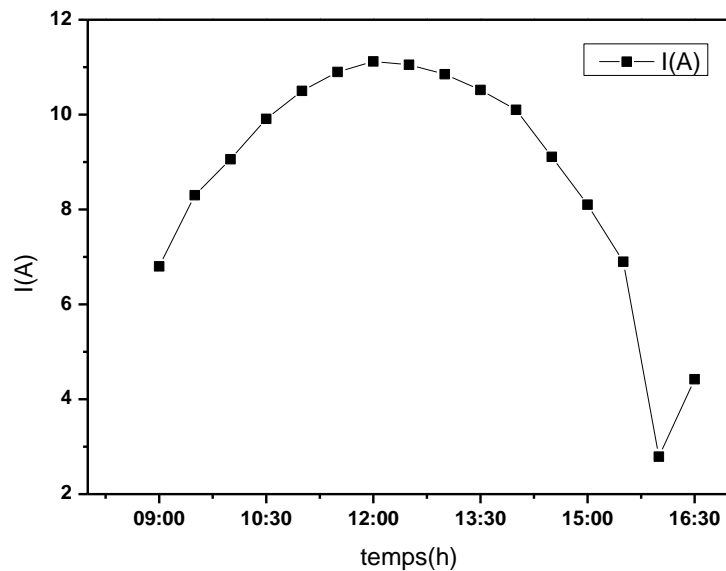


Figure (IV-17): Evolution du courant en fonction de l'intensité solaire.
(Association en parallèle)

IV-7 LA PUISSANCE :

Sachant que la puissance est le produit du courant et de la tension ($P = V_m \cdot I_m$) ou V_m est I_m sont la tension et le courant maximale respectivement.

La figure (IV-18) présente l'évolution en fonction de temps. On note ici que ces résultats sont obtenus directement par un onduleur connecté en série avec le module solaire.

On remarque que la puissance produite par ce module est dans l'environs de 60% dans ces conditions de l'expérience.

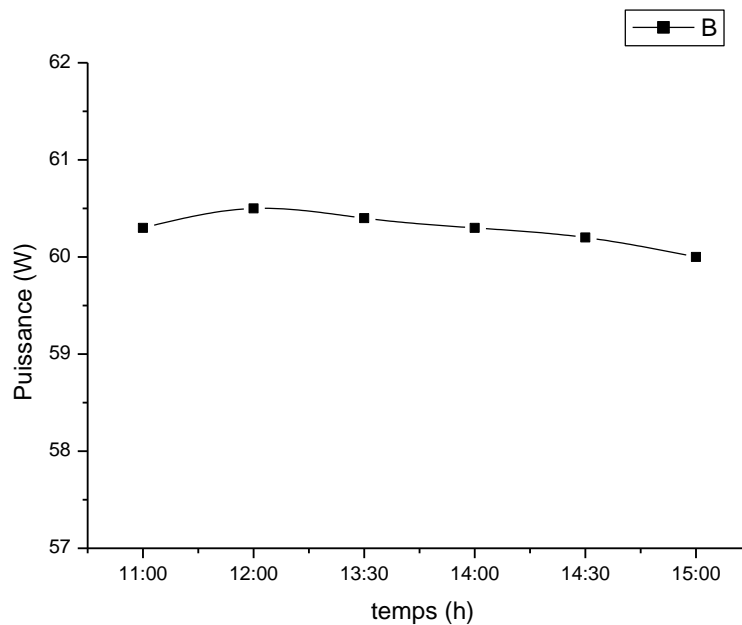


Figure (IV-18): Evolution de puissance.

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons abordé une étude expérimentale sur un capteur solaire photovoltaïque. Après une brève présentation de quelques généralités sur les capteurs solaires photovoltaïques à savoir ; le potentiel solaire en Algérie, le rayonnement solaire, la conversion photovoltaïque, son principe de fonctionnement, la technologie des cellules solaires, sa modélisation ainsi que ces différentes caractéristiques et les modules solaires photovoltaïques et leurs caractéristiques. Nous avons abordé la description du dispositif expérimentale ainsi que la méthode de travail.

Les premiers résultats obtenus confirment la fiabilité du capteur solaire photovoltaïque mis en jeu. Les autres résultats mettent en évidence l'influence ou effet de l'angle d'inclinaison et température et l'état météo sur le fonctionnement de ce capteur.

A partir de nos résultats, on remarque que :

- ❖ Le rayonnement solaire obtenue par la simulation numérique dans la région de M'sila (le pôle universitaire) ayant son maximum à midi et demi (12 h3 0 mn). Il varie de jour en jour, d'un mois à un autre et d'une saison à une autre.
- ❖ le courant, le voltage et la puissance du capteur photovoltaïque sont proportionnels à l'intensité du rayonnement reçue sur la surface du capteur photovoltaïque.
- ❖ Le rôle d'inclinaison des capteurs photovoltaïque est très important pour l'évolution de cette quantité d'énergie (rayonnement reçue).
- ❖ L'inclinaison du capteur solaire photovoltaïque affecte le rayonnement capté à la surface du capteur. Dans cette étude l'angle d'inclinaison 37° est le meilleur comparé avec les angles d'inclinaison de 0° à 90° .
- ❖ L'état météo comme le vent , l'augmentation de température et le passage des nuages a des effets négatives sur la production d'électricité par les panneaux solaire photovoltaïques .

Références bibliographiques

- [1] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [2] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [3] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [4] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [5] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [6] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [7] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [8] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [9] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [10] : site internet : [http // WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule photovoltaïque](http://WWW.Wikipedia.Org/wiki/cellule%20photovoltaïque)
- [11] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [12] A, H, Khedim. Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [13] Roshanak Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ». Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [14] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [15]Ch, Perrin de Brichambaut; C,Vauge. Le gisement solaire , technique et documentation , paris.(1982).
- [16] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008
- [17] Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [18] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

- [19] Zouache Foudil « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques ». Mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [20] Rorni Abdelhalim « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire ». Mémoire de magister en électrotechnique Université, Mentouri de Constantine 2009.
- [21] Bouden Abdmalek « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [22] Amina Benhammou « Optimisation d'un nouveau système de séchage solaire modulaire pour plantes aromatiques et médicinales ». Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2010
- [23] Benis Halouma « Contribution à la modélisation du problème de Hot Spot dans les modules solaire Photovoltaïque occultées ». Mémoire de magister en électrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2008.
- [24] Bekkouche Sidi Mohammed El Amine « Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs Solaires ». Thèse de doctorat en Physique, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2009.
- [25] Souad Saadi « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ». Mémoire de magister en Physique, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [26] IEA, «International Energy Agency» Chirat, Paris, (2014).
- [27] L. Biniek, thèse en doctorat, Strasbourg. Université de Strasbourg, (2010).
- [28] R. Guillo, «les différentes types de cellules photovoltaïques» (2014). [En ligne]. Available: http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaïques.
- [29] SOLER, «les technologies du photovoltaïque» SOLER groupement, paris, (2012).
- [30] Solarforce, «une brève description de la technologie RST» (2014). [En ligne]. Available: <http://www.solarforce.fr/fr/technologie>.
- [31] IRENA, «solar photovoltaics» IRENA, Abu Dhabi,(2012).
- [32] V.DELONG, «le point sur les différents types de cellules photovoltaïques» (2012).
- [33] M. Green, « Solar Cell Efficiency Tables» Progress in Photovoltaics: Research, p. 37, (2011).
- [34] ZSW, «Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg ZSW Researchers,» ZSW Researchers,(2010).

- [35] S.Mehta, « PV Technology, Production and Cost Outlook: 2010-2015» Greentech Media Research,(2010).
- [36] Photonics, Nature, «future perspectives of photovoltaics» Nature publishing group,(2010).
- [37] M. Gratzel, «Recent Advances in Mesoscopic Solar Cells,» Accounts of Chemical Research, pp. 1781-1798, (2009).
- [38] OrgaPVnet, «technology Roadmap Towards Stable & Low-cost Organic Based Solar Cells» OrgaPVnet, (2009).
- [39] A. Nozik, «Multiple Exciton Generation in Colloidal Quantum Dots» chez Third generation and Emerging Solar-Cell Technologies, golden,co, (2011).
- [40] R. Raffaele, «Next Generation Phovoltaics» chez Third Generation and E merging Solar Cell Technologies, golden,co, (2011).
- [41] HAFIAN Hicham . « Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSPACE1103».these MAGISTER.Université Hadj Lakhdar Batna.(2013)
- [42]: Julien DÉGOULANGE. «Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque » . these doctorat . INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE ,2008
- [43] S.VIGHETTE, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de Doctorat, université de Grenoble, septembre 2010.
- [44] K. Helali, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative», Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [45] Y. Pankow, " Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.
- [46] " Energie photovoltaïque " Guide d'énergie renouvelable 2002.

Résumé :

Dans le cadre de notre travail, nous avons présenté une étude expérimentale d'un panneau solaire photovoltaïque. Cette étude a été faite dans la ville de M'Sila.

L'étude théorique a permis d'établir les différents paramètres qui caractérisent le module photovoltaïque et ses différents types, en outre la technologie du fabrication des cellules solaires, l'éclairement solaire globale pour différents orientations du capteur et des différents angles d'inclinaison a été calculé à l'aide d'un code de calcul écrit en langage Fortran.

Le courant électrique I_{cc} et la tension V_{oc} au borne du panneau sont mesurés presque durant tout le jour et dans quelques conditions météo (ciel clair ou nuageux). En plus, la relation entre le courant électrique et la tension a été vérifié avec la relation théorique.

Abstract :

In this present work. An experimental study of a photovoltaic solar panel was presented. This study was carried out in the city of M'Sila. The theoretical study allows to establish the various parameters which characterize the photovoltaic module and its different types, in addition, the manufacturing technology of the solar cells. The global solar irradiance for different orientations of the panel and the different angles of inclination was calculated using a calculation code written in Fortran. The electrical current I_{cc} and the V_{oc} voltage the panel are measured almost throughout the day and in some weather conditions (clear or cloudy). In addition, the mathematical relation between the electrical current and the voltage was verified with the theoretical relation between them.

ملخص:

لقد قمنا في عملنا هذا بدراسة تجريبية على اللوح الشمسي الكهروضوئي وقد تمت هذه الدراسة بمدينة المسيلة. في الدراسة النظرية تطرقنا الى ذكر عدة أنواع من الألواح الشمسية الكهروضوئية وخصائصها بالإضافة إلى الصناعة التكنولوجية المطبقة على الخلية الشمسية.

كما اننا طبقنا عدة دراسات على الاشعاع الشمسي الساقط على جهاز الاستشعار و كذا زوايا الميل المختلفة و ذلك باستخدام برنامج عددي بلغة " فورتران".

كما قمنا بدراسة على كل من التيار الكهربائي والجهد طوال اليوم و ذلك بغية معرفة العلاقة من كلا الجانبين التطبيقي والنظري و العوامل المؤثرة عليهما.