

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER PHYSIQUE ENERGÉTIQUE

Thème

ETUDE ET SIMULATION L'INFLUENCE DE LA POUSSIÈRE
SUR LE RENDEMENT DES PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Soutenu le : 30 Mai 2016

Présenté par :

M^{elle} BOUKHEIRA NASSIRA

M^{elle} MEBARKI NAIMA

Membres de jury :

Président :

Univ. ADRAR

Promoteur :

Dr MAKHLOFI SALIM (Encadreur)

Univ. ADRAR

Examineurs

Mr Univ. ADRAR

Mr Univ. ADRAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu qui
encourageons à réaliser ce travail.

Nous remercions tous ceux qui nous ont aidé
de
près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Particulièrement notre encadreur.
Dr MAKHLOUFI SALIM
pour son aide et conseils
qui nous avons été très précieux.

Mes sincères remerciements aux membres de
jury

Mes remerciements vont aussi à tout qui
contribués de près ou de loin à la réalisation
de ce modeste travail.

Dédicace

Nous dédie ce modeste travail :
MEBARKI et A tout membre de la
famille BOUKHEIRA
Ainsi que toutes la promotion 2^{ème}
année masterphysique 2015-2016.

Sommaire

des figures	I
Listes de Tableaux	III
Nomenclature	IV
Introduction générale	1
Chapitre I :	
Généralité sur la cellule photovoltaïque	
I. Introduction	3
I.1. Historique	3
I.2. Le soleil	4
I.3. Le rayonnement solaire	5
I.4.Principes de calcul de l'énergie solaire	6
I.4.1.La trajectoire apparente du soleil	6
I.4.1.1.Les coordonnées équatoriales	6
I.4.1.2.Les coordonnées horizontales	7
I.5 .Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre	9
I.5.1.La latitude	9
I.5.2 L'altitude	9
I.5.3 La longitude (λ)	9
I.5.4 Le temps solaire vrai (TSV)	10
I.6 Position du soleil	10
I.6.1 La hauteur angulaire	10
I.7. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	11
I.7.1. Rayonnement direct	11
I.7.2. Rayonnement diffus	1
I.7.3. Rayonnement réfléchi	12
I.7.4. Rayonnement global	12
I.8.L'énergie solaire photovoltaïque	12
I.9.L'effet photovoltaïque	13
I-10-Principe de fonctionnement	13

I.11.Caractéristiques électriques d'une cellule	15
I.11.1. Caractéristiques courant / tension	15
I.11.2- Caractéristiques puissance / tension	16
I.11.3- Influence de l'éclairement	17
I.11.4- Influence de la température	18
I.12. Définition de la puissance de crête	19
I.13.Le rendement	20
I.14.Le facteur de forme	20
I.15.Fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque	20
I.16.système photovoltaïque en région d'Adrar	21
I.16.1.Pompage d'eau par énergie photovoltaïque	21
I.16.2.principales réalisation en énergie solaire de la région d'Adrar	22
I.17. Conclusion	23
Chapitre II : Modélisation d'une cellule photovoltaïque	
II. Introduction	24
II .1.Modèle d'une cellule solaire idéale	24
II.2 .Modelé d'une cellule solaire réelle	26
II. 2 .1 . Modèle à une diode (à une seule exponentielle)	26
II. 2.2. Modèle à une diode sans résistance shunt	27
II .2 .3 .Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)	28
II .2. 4. Modèle à deux diodes sans résistance shunt	29
II- 3-Différents technologies des cellules solaires	30
II.3.1.Les cellules monocristallines	30
II.3.2.Les Cellules Polycristallines	31
II.3.3Les cellules amorphes	32
II.4.Comparaison entre les différentes technologies	33
II.5.Conclusion	33
chapitre III : influence de la poussière sur le rendement des panneaux PV	
III. Introduction	34
III.1 Facteurs influent sur le dépôt de poussière	34

III.2 Etat de l'art	35
III.3. Nettoyage des panneaux solaires	36
III.4 .nettoyage avec un chiffon	37
III.4.1-Principe de base de cette méthode	37
III.5. nettoyage photo catalyse	37
III.5.1-photo catalyse cellule solaire	37
III.6. Conclusion	38
Chapitre IV :	
Etude expérimentale des dépôts de poussière sur les modules PV	
IV-1-Introduction	39
IV-2 Méthode	39
IV.3. Etude expérimentale des dépôts de poussière sur les modules PV	41
IV .3. 1 Résultats et discussion	44
IV.4. conclusion	44
Conclusion générale	45
Référence bibliographique	
Annexe	
résumé	

Listes des figures

Chapitre I

Figure I.1	Couéschématique du soleil	5
Figure I.2	Le spectresolaire	6
Figure I.3	Courbe de déclinaison du soleil	7
Figure I.4	Coordonnée solaire selon le repère horizontal	8
Figure I.5	coordonnésterrestre	9
Figure I.6	Position du soleil	11
Figure I.7	cellule solaire	12
Figure I.8	panneausolaire	12
Figure I.9	champ photovoltaïque	13
Figure I.10	Représentation schématique d'une cellule solaire	14
Figure I.11	Principe de fonctionnement	15
Figure I.12	Caractéristiques courant / tension $I = f(U)$.	16
Figure I.13	Caractéristiques puissance / tension $P = f(U)$	17
Figure I.14	Influence de l'éclairement $I = f(U)$	17
Figure I.15	Influence de l'éclairement $P = f(U)$	18
Figure I.16	Influence de la température $I = f(U)$ et $P = f(U)$	19
Figure I.17	Fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque	20

Chapitre II

Figure II.1	schéma idéale d'une cellule photovoltaïque	25
Figure II.2.1	schéma équivalent d'une cellule solaire	26

Figure II.2.2	schéma équivalent à une diode sans résistance shunt	27
Figure II.2.3	schéma équivalent à deux diodes	28
Figure II.2.4	schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt	29
Figure II.2.5	schéma bloc d'une cellule PV	30
Figure II.3.1	Cellule au silicium mono – cristallin	31
Figure II.3.2	Cellule au silicium poly– cristallin	32
Figure II.3.3	Cellule au silicium amorphe	32

Chapitre III

Figure III	Facteurs influent sur le dépôt de poussière	35
Chapitre IV		
Figure IV.1	Schéma d'Expérimentation de dépôt de poussière types de module : CEM 200 M-72	39
Figure IV.2	Multimètres numérique Multi 13S LM2330	40
Figure IV.3	Evolution de la différence courant nettoyé et non nettoyé en fonction de jour	41
Figure IV.4	Evolution de la différence tension de module nettoyé et non nettoyé en fonction de jour	42
Figure IV.5	Evolution de la différence puissance de module nettoyé et non nettoyé en fonction de jour	43
Figure IV.6	Evolution de la différence puissance de module nettoyé et non nettoyé en fonction d'heure	44

Chapitre I		
Tableau I.1	Caractéristiques principales du soleil	4
Tableau I.2	la capacité de centrale d'énergie solaire de la région d'Adrar	22
Chapitre II		
Tableau II.1	comparatif des différentes technologies	33
Chapitre IV		
Tableau I.1:	Caractéristiques du module : CEM 200 M-72	40

Nomenclature

PV	photovoltaïque
I	Courant (A)
V	Tension (V)
G	Eclairement sur la cellule (W/m^2)
T	Température de la cellule (K)
K	Constante de Boltzmann (J/k)
A	Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.
I_{ph}	Courant photonique (A)
R_S	Résistance série (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt (Ω)
q	Charge de l'électron (C)
η	Rendement
FF	Facteur de forme
P	Puissance (W)
p_A	La puissance mesurée pour le verre de module nettoyé
P_B	La puissance mesurée pour le verre de module non nettoyé
d	Nombre de jours
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{co}	Tension en circuit ouvert
AM	Masse d'aire
δ	declinisation
ρ	L'anglehoraire
TSV	Temssolairevrai
Ψ	L'azimuth
γ	Angle de la hauteur solaire (hs)
z	Distance zénithale
A	longitude
h	Hauteur angulaire

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que les pays en voie de développement ne cessent de se multiplier.[1]

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique (solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs photovoltaïques ou cellules photovoltaïques ou encore cellules solaires qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque. L'utilisation des cellules solaires comme convertisseurs d'énergie solaire a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser, et par conséquent développer l'exploitation de cette nouvelle source d'énergie renouvelable.[2]

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

Aujourd'hui l'énergie solaire fournit un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minerai fossile est au mieux de 30 à 35%. [3]

La moitié de la population des pays en voie de développement n'ont pas d'accès sûr à l'eau potable. Cette dernière est à l'origine de 80 % des maladies et de la pauvreté dans ces pays. Les efforts pour surmonter ce problème ont donné à des programmes tels que le pompage de l'eau une priorité importante. Dans beaucoup de régions, ce but peut être réalisé seulement par

L'utilisation des nappes souterraines. Dans les régions éloignées des réseaux électriques, il y a des diverses possibilités pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes

solaires,...etc..

Le développement du solaire photovoltaïque se heurte à un certain nombre de difficultés, parmi lesquelles le coût élevé du kWh produit et la longue durée de retour sur

Introduction générale

investissement. A cela s'ajoute certains aspects d'installation et d'exploitation des modules PV. Sur le plan de l'exploitation, les modules photovoltaïques nécessitent d'être exposés à l'extérieur afin de fonctionner sous l'ensoleillement le plus direct possible. De tels équipements sont de ce fait soumis à un environnement occasionnant de multiples sources de pollution et d'encrassement. Parmi les plus courantes, nous pouvons citer : polluants industriels, pollutions automobiles, pluie acide, cheminées, pollens, poussières, sables, feuilles d'arbres, mousse, champignons, sels en ambiance marine, calcaire, résidus de produits de nettoyage... En plus de baisser leurs rendements certains polluants peuvent entraîner une usure prématurée des modules en engendrant des phénomènes d'échauffement intense via l'effet « hot spot ». Les châssis en aluminium dont les modules sont équipés peuvent également être source de nuisance en termes de production électrique. Sous l'effet de la corrosion, les profilés en aluminium attaquent les surfaces vitrées de protection. Celles-ci deviennent alors rugueuses et s'opacifient, ce qui engendre donc un effet néfaste sur le rendement de production.

Dans le chapitre I, nous présentons en détail l'énergie photovoltaïque, par l'étude de l'élément de base qui est la cellule puis le module, caractéristiques électriques d'une cellule PV, rendement, facteur de forme.

Dans le chapitre II, nous avons fait une modélisation du module PV pour avoir les différents effets sur lui. Plusieurs modèles vont être présentés : modèle à deux diodes sans résistance shunt, Modèle à une ou deux diodes, ainsi que les différentes technologies des cellules solaires.

Dans le chapitre III, nous allons présenter l'état de l'art de l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux PV, les facteurs influent sur le dépôt de poussière, ainsi que les méthodes de nettoyage des panneaux solaires.

Dans le chapitre IV, on va présenter et les résultats de notre étude.

Chapitre I.

*Généralité sur la
cellule photovoltaïque*

I. Introduction:

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

I.1.Historique:

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés".

C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.[4]

I.2. Le soleil

Le soleil est l'étoile la plus proche de la Terre. C'est une sphère gazeuse essentiellement constituée d'hydrogène et d'hélium [5].

Le tableau I.1 suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil [6].

caractéristiques	valeur
Masse	$1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre	$1.392 \times 10^9 \text{ m}$
Masse volumique Moyenne	1410 Kg m^{-3}
Puissance rayon	$3.83 \times 10^{26} \text{ W}$
Température superficielle	5770K

La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.1). On distingue quatre zones particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [6]:

-Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée (15×10^6 K) ainsi que sa pression (2×10^{11} bars) et sa densité ($\sim 10^5$ Kg m⁻³), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

-La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.

- La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ.

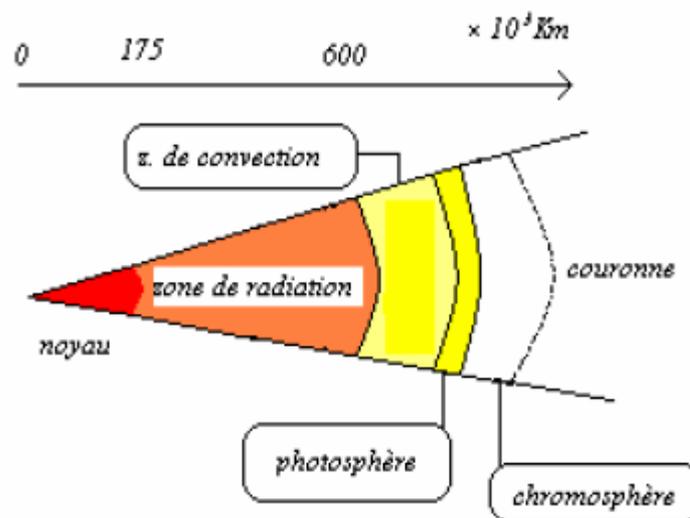


Figure I.1 : Coupe schématique du soleil [6].

- La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.

Le soleil est composé chimiquement [7] de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [6] 150×10^6 Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient [7] 8 minutes après avoir été émise.

1.3. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil est la manifestation externe des

Interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Il constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil.

Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes caractéristiques dont la plus importante est la constante solaire, qui est une donnée fondamentale indépendante des conditions météorologiques [8].

La deuxième caractéristique du rayonnement solaire est sa répartition spectrale, qui est à peu près celle d'un corps noir à 5800°K . Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 micromètres à 4 micromètres, [8].

La figure I.2 donne l'allure du spectre solaire [9].

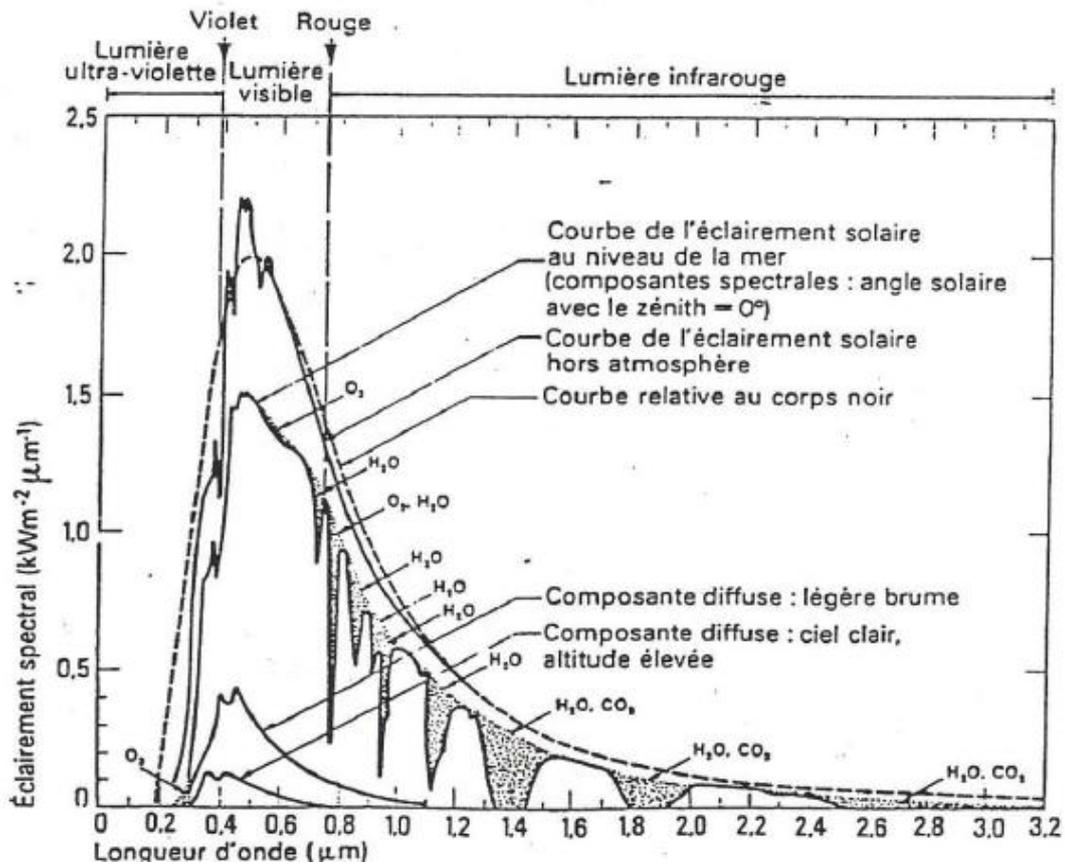


Figure I.2 Le spectre solaire [9]

I.4.Principes de calcul de l'énergie solaire :

I.4.1.La trajectoire apparente du soleil :

La position du soleil dans la voute céleste est repérée à tout instant de la journée par deux système de cordonnées :

I.4.1.1.Les cordonnées équatoriales :

Les cordonnéeséquatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont lies à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont :

a) La declinisation δ :

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre [10], sa valeur en degré est donnée par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (N + 284) \right] \quad (\text{I.1})$$

où N est le numéro du jour de l'année ; N = 1 représente le premier Janvier.

La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ le 21 décembre et $+23,45^\circ$ le 21 juin.

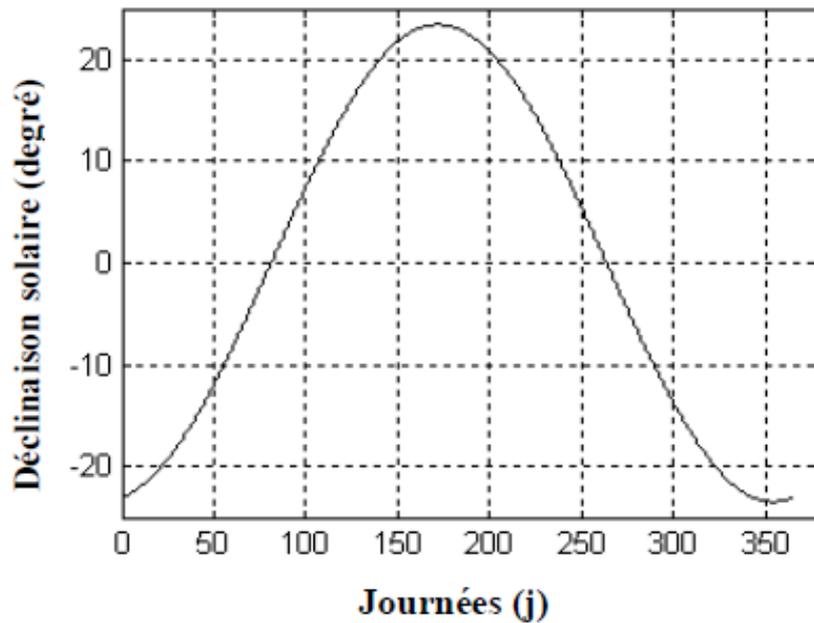


Figure I.3: Courbe de déclinaison du soleil [10]

b) L'angle horaire :

C'est l'angle formé entre le plan méridien passant par le soleil et le plan méridien du lieu obtenu par le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course d'Est en Ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (donc un tour de 360° en 24 heures) [11].

$$\rho = 15(\text{TSV} - 12) \quad (\text{I.2})$$

Où TSV est le Temps Solaire Vrai.

I.4.1.2. Les coordonnées horizontales :

Le soleil est repéré par les grandeurs suivant :

a) l'azimut ψ :

L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et le direction sud.

Il se compte de 0^0 à 360^0 à partir du sud dans le sens rétrograde .La relation qui donne l'azimut est. Donnée ci- dessous [11]

$$\cos \psi = \frac{\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta}{\cos \delta \cos \theta}$$

(I.3)**b) L'angle de la hauteur solaire γ (hs)**

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal. γ varie de 0^0 à 90^0 vers le zénith et de 0^0 vers -90^0 vers le nadir .L'angle de la hauteur solaire

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \text{ (I.4)}$$

c) La distance zénithale z

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle z est Complémentaire de γ

$$\cos z = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega \text{ (I.5)}$$

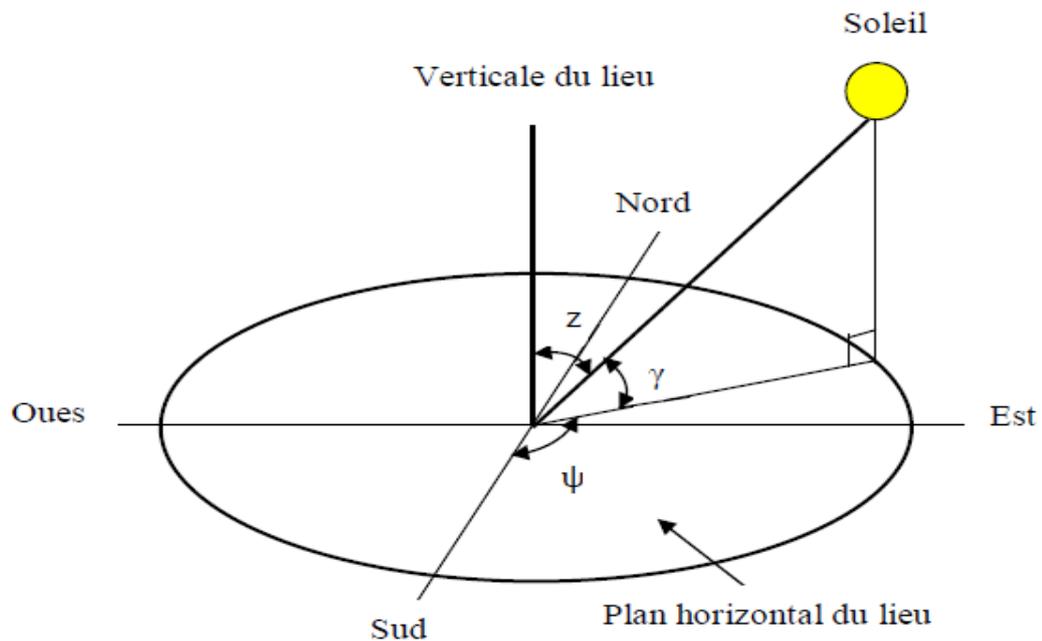


Figure I.4 : Coordonnée solaire selon le repère horizontal [11]

I.5 .Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre :

Un point quelconque d'un lieu donné du globe peut être défini par les coordonnées suivantes [12]

I.5.1.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. La latitude φ comptée de 0° à $+90^\circ$ vers N et de -90° vers S. La latitude de la ville de Constantine est environ 36° . [12]

I.5.2 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. [12]

I.5.3 La longitude (λ) :

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'observatoire de Greenwich et a pour longitude. Les longitudes situées à l'est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [12].

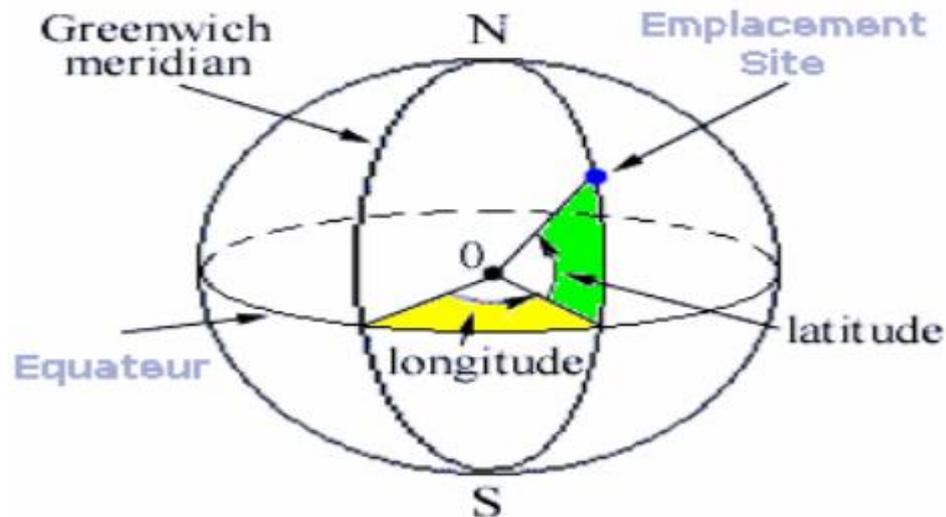


Figure I.5 : coordonnées terrestre [12]

I.5.4 Le temps solaire vrai (TSV):

Défini par l'angle horaire ρ entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné [13].

La vitesse de la Terre sur sa trajectoire étant soumise à des variations, le jour solaire vrai n'est pas constant. Ainsi, un temps solaire moyen a été retenu comme unité de temps, le jour solaire moyen est défini [13].

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\rho}{15} \quad (\text{I.6})$$

I.6 Position du soleil :

La direction du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

I.6.1 La hauteur angulaire (h) :

Qui détermine la longueur de la traversée de l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 0° (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai) [14].

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrier cette variable

$$\sin(h) = \sin(\psi) \sin(\rho) + \cos(\psi) \cos(\rho) \cos(\delta) \quad \text{(I.7)}$$

L'angle horaire ρ_s au lever de soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$

$$\cos(\rho_s) = -(\tan \psi) \tan(\delta) \quad \text{(I.8)}$$

Où (δ) la déclinaison calculée d'après l'équation (1.1) et (ψ) la latitude du lieu.

* Azimut du soleil (β) : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest

$$\sin(\beta) = \frac{\sin(\delta) \cos(\rho)}{\cos(h)} \quad \text{(I.9)}$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure I.6

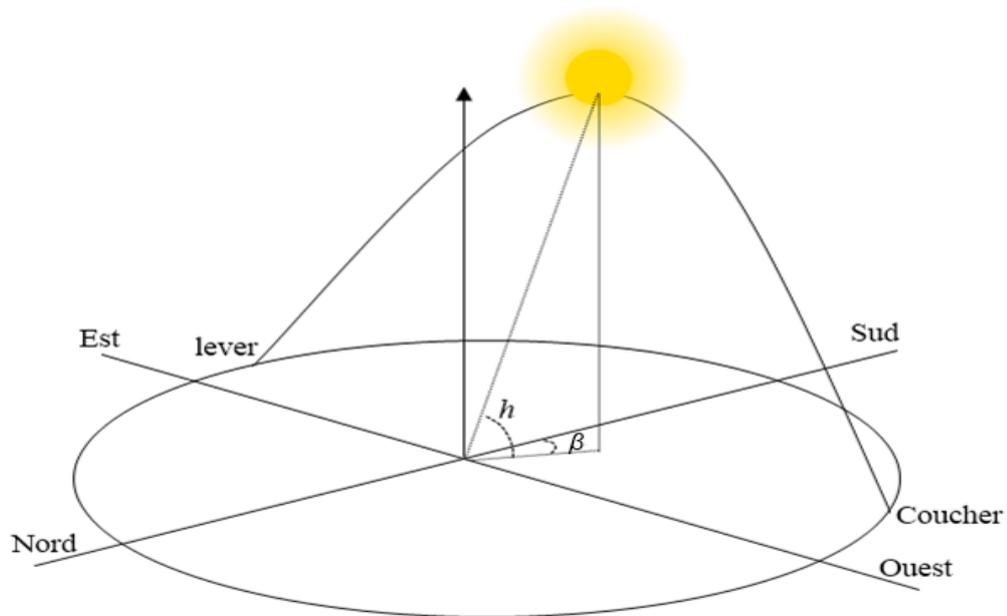


Figure I.6 : Position du soleil [14]

I.7. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [15]. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [16].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

I.7.1. Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère. [16].

I.7.2. Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère. [16].

I.7.3. Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de sol appelé Albedo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$ [15].

I.7.4. Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi

I.8. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. [17]



Figure I-7 cellule solaire [17]



Figure I-8 : panneau solaire [17]



Figure I-9 : champ photovoltaïque [17]

I.9.L'effet photovoltaïque :

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière

« Attaquent » les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arrachés. Dans les cellules PV, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons « arrachés » créent une tension électrique continue et faible. [17]

I-10-Principe de fonctionnement :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le

matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone **n** et les trous vers la zone **p**. Une jonction PN a été formée.[17]

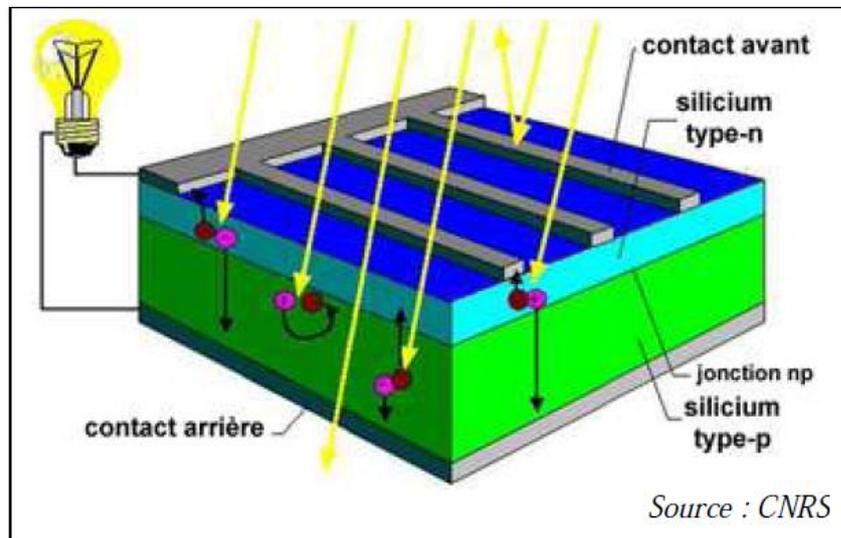


Figure 10 – Représentation schématique d'une cellule solaire [18]

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.[17]

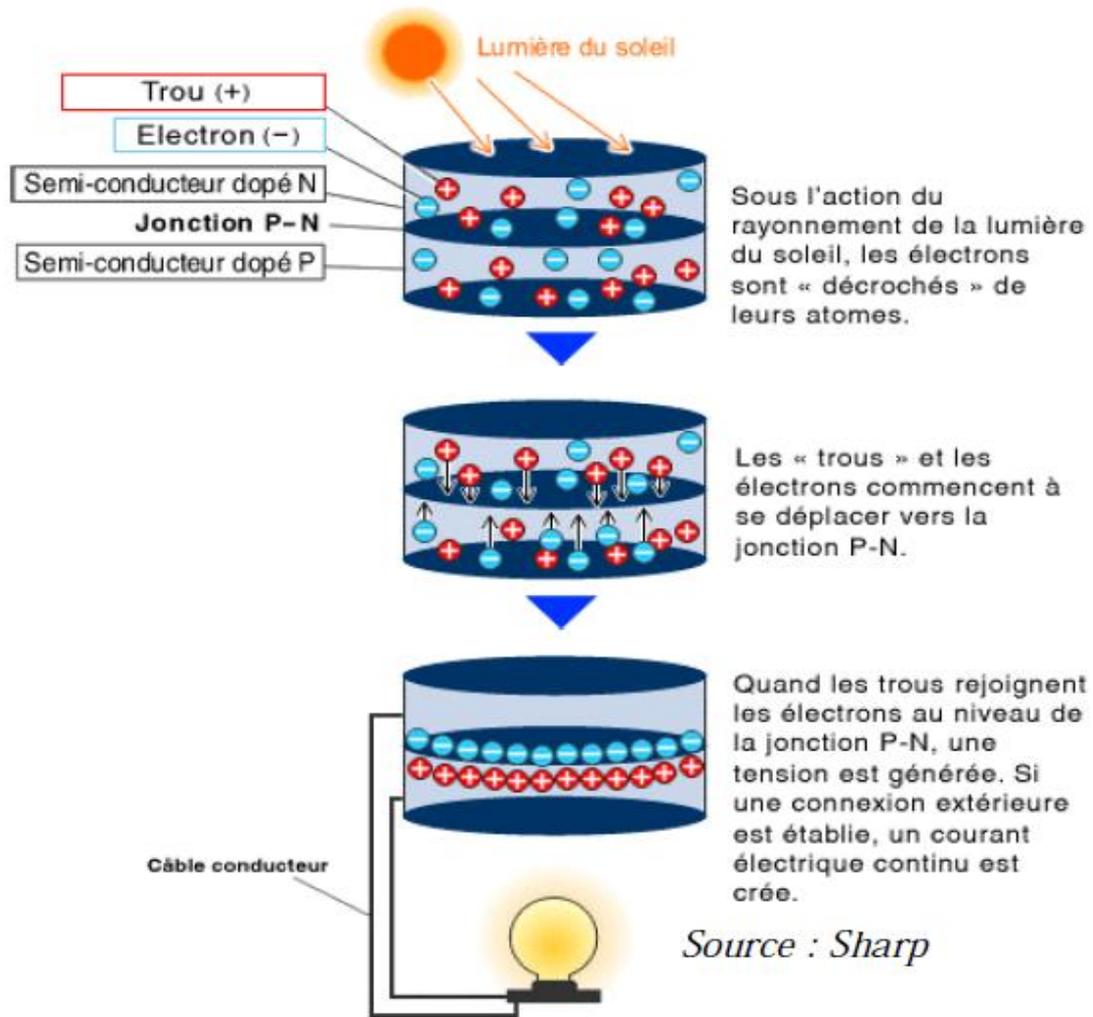


Figure I-11 : Principe de fonctionnement [17]

I.11. Caractéristiques électriques d'une cellule :

I.11.1. Caractéristiques courant / tension :

A température et éclairement fixés, la caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :

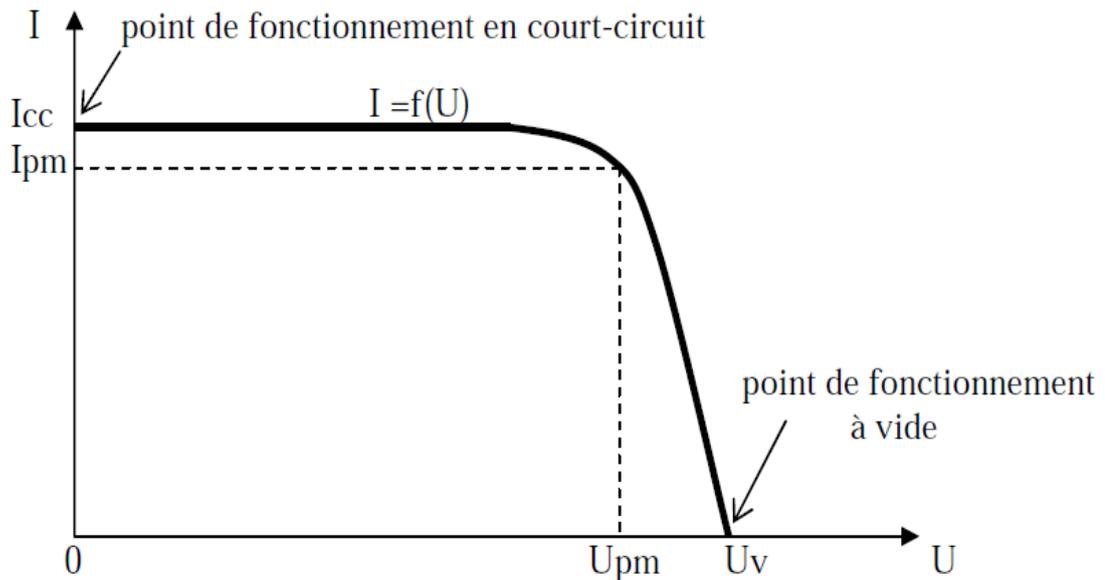


Figure I-12 : Caractéristiques courant / tension $I = f(U)$. [19]

Sur cette courbe, on repère :

*le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0$ (A)

*le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0$ (V)

Pour une cellule monocristalline de 10×10 cm, les valeurs caractéristiques sont :

$I_{cc} = 3$ (A) et $U_v = 0,57$ (V) ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$).

I.11.2- Caractéristiques puissance / tension :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression:

$$P = U \cdot I \quad (\text{I-10})$$

Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$.

Cette courbe a l'allure suivante :

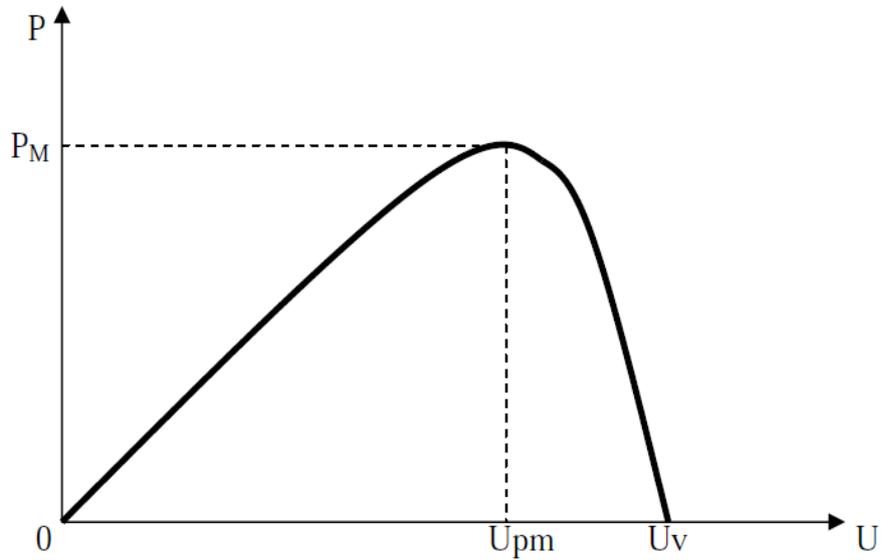


Figure I-13: Caractéristiques puissance / tension $P = f(U)$. [19]

Cette courbe passe par un maximum de puissance (PM).

A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$.

Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont :

$$PM = 1,24W, U_{pm} = 0,45V, I_{pm} = 2,75A \text{ (} G = 1000W/m^2 \text{ et } T = 25^\circ C \text{)}$$

I.11.3- Influence de l'éclairement :

A température constante, la caractéristique $I = f(U)$ dépend fortement de l'éclairement

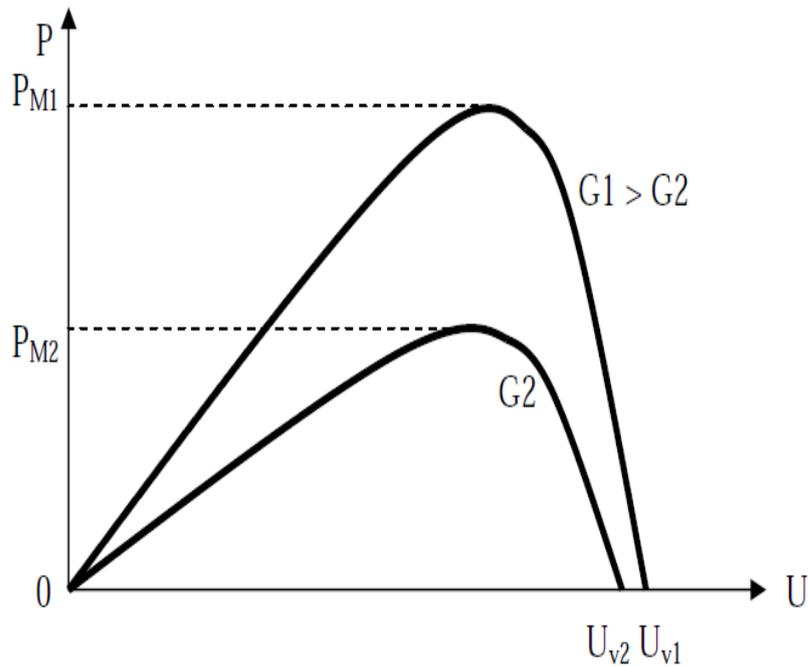


Figure I- 14 : Influence de l'éclairement $I = f(U)$

[19]

Sur cette courbe, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairement alors que la tension à vide varie peu.

A partir de ces courbes, on peut tracer les courbes de puissance $P = f(U)$:

**Figure I- 15 :** Influence de l'éclairement $P = f(U)$ [19]

Sur ces courbes, on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.

I.11.4- Influence de la température :

Pour un éclairement fixé, les caractéristiques $I = f(U)$ et $P = f(U)$ varient avec la température de la cellule photovoltaïque :

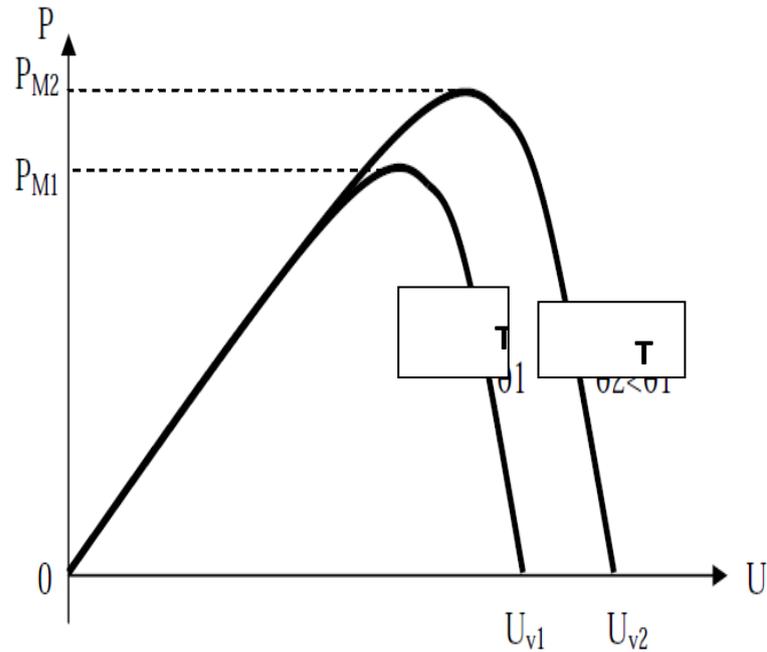


Figure I- 16 : Influence de la température $I = f(U)$ et $P = f(U)$ [20]

Sur ces courbes, on remarque que la tension à vide et la puissance maximum diminuent lorsque la température augmente.

I.12. Définition de la puissance de crête :

Par définition, la puissance de crête représente la puissance maximum fournie par une cellule lorsque l'éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$, la température $T = 25^\circ \text{C}$ et une répartition spectrale du rayonnement dit **AM 1,5**.

L'unité de cette puissance est le Watt crête, noté **Wc**.

Les constructeurs spécifient toujours la puissance de crête d'un panneau photovoltaïque.

Cependant, cette puissance est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à 1000 W/m^2 et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les 25°C . [20]

I.13. Le rendement

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et G l'éclairement en W/m^2 , ce rendement a pour formule [21]

$$\eta = \frac{P_m}{S \times G} \quad (\text{I-11})$$

I.14. Le facteur de forme :

Le facteur de forme est un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour évaluer la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \times V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de révolution technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales [21].

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (\text{I-12})$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

I.15. Fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque

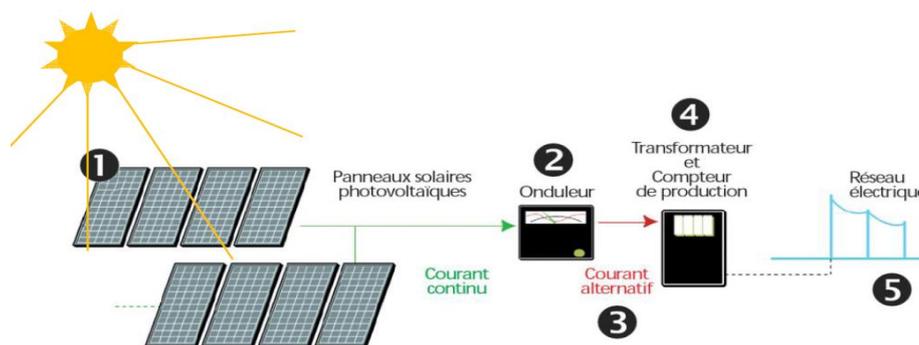


Figure I-17 : Fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque[22]

-1- Le rayonnement du soleil sur les modules photovoltaïques est transformé en courant électrique continu acheminé vers un onduleur

-2- L'onduleur convertit cette électricité en courant alternatif compatible avec le réseau électrique.

-3- Un transformateur élève la tension avant l'injection de l'électricité par câble jusqu'au réseau public.

I.16. système photovoltaïque en région d'Adrar :

le rôle que pourrait jouer l'énergie solaire en Algérie, doit- être au centre des préoccupations et faire l'objet d'un regain d'intérêt dans un avenir proche.

L'Algérie a intérêt à engager et à enrichir le programme solaire pour maintenir ses capacités d'exportation d'hydrocarbures plus longtemps. D'autant plus que dans les régions sahariennes toutes les conditions sont réunies pour faire de ce projet une véritable industrie.[23]

I.16.1. Pompage d'eau par énergie photovoltaïque:

L'une des préoccupations majeures de l'Algérie et particulièrement des régions sahariennes est l'autosuffisance alimentaire. Pour arriver à ce résultat, trois principales conditions doivent- être satisfaites : [23]

*La terre

* L'eau

*La mise à disposition des moyens de puisage adéquat

Si pour les deux premières conditions le problème est moindre vue, les spécificités des régions sahariennes avec leur immenses terres très riches en eau souterraine. Par contre, les moyens de puisage font défaut et posent d'énormes difficultés aux petits agriculteurs. En effet et par manque des eaux de pluies, le pompage dans les régions sahariennes constitue l'unique solution pour l'irrigation des terres agricoles et l'eau potable.[23]

Suite à l'expérience acquise sur le terrain et les différentes études menées, l'irrigation par les systèmes de Pompage photovoltaïque est le meilleur moyen pour un développement rapide de l'agriculture dans les régions sahariennes. Une attention particulière devra- être accordée à ce projet considéré stratégique et cela, pour plusieurs raisons parmi elles :

*Richesse de la région eau à de faibles profondeurs (Pm 15m);

*Très vaste superficie de terre pouvant être exploitée ;

* Stabilité de la population dans les régions isolées. [23]

I.16.2.principales réalisation en énergie solaire de la région d’Adrar

Tableau I.2 : la capacité de centrale d’énergie solaire de la région d’Adrar [23]

Centrale	Capacité (Wc)
Centrale de Melouka(Adrar)	30.000
Balisage terrestre (820Km)	90312
Centrale Ainbelb (Aoulef)	11.000
Centrale Matriouene (Aoulef)	6.000
Pompage (toute la région)	31.650
Relais FH	5.00
Bancs d'essais à la SEES/ MS	20.000

I.17. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales de gisement solaire et d'un système photovoltaïque. On a étudié le Principe de fonctionnement, les Caractéristiques électriques d'une cellule PV et présenté la principale réalisation en énergie solaire de la région d'Adrar

Chapitre II :

Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommée cellule PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension I-V non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la tension de la cellule. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit I_{SC} et la tension en circuit ouvert V_{OC} . La détermination du point de fonctionnement du GPV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté, il est plus ou moins éloigné du PPM caractérisé par le courant et la tension optimaux, notées $(I_{mp}; V_{mp})$.

Dans ce chapitre, nous allons tenter de définir un modèle s'appliquant aux cellules photovoltaïques, la détermination de ses sur bases de données fournies par le constructeur de panneaux et étudie différents technologies des cellules solaires [24].

II .1.Modèle d'une cellule solaire idéale :

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n).[25].

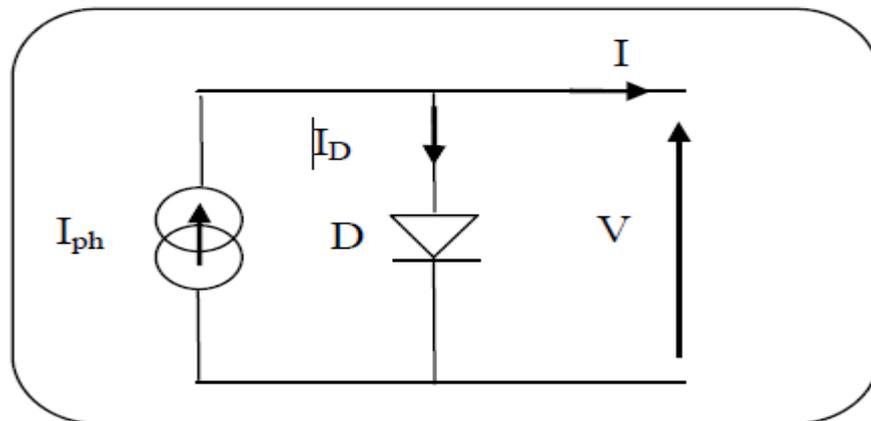


Figure II-1 : schéma idéal d'une cellule photovoltaïque [25]

Le courant généré par la cellule PV est donné par:

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II-1})$$

Où :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (\text{II-2})$$

Avec :

I : Courant (A)

I_{ph} : Courant Photonique(A)

I_D : Courant de la diode

I_0 : Courant de saturation des diodes.

Q : Charge de l'électron($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

V : Tension (V)

T :Température de la cellule (K)

K : Constante de Boltzmann ($1,380610^{-23}$ J/K)

II.2 .Modèle d'une cellule solaire réelle:

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie.

Dans ce qui suit on va présenter les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques rencontrées dans la littérature.[25].

II. 2 .1 . Modèle à une diode (à une seule exponentielle) :

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant :

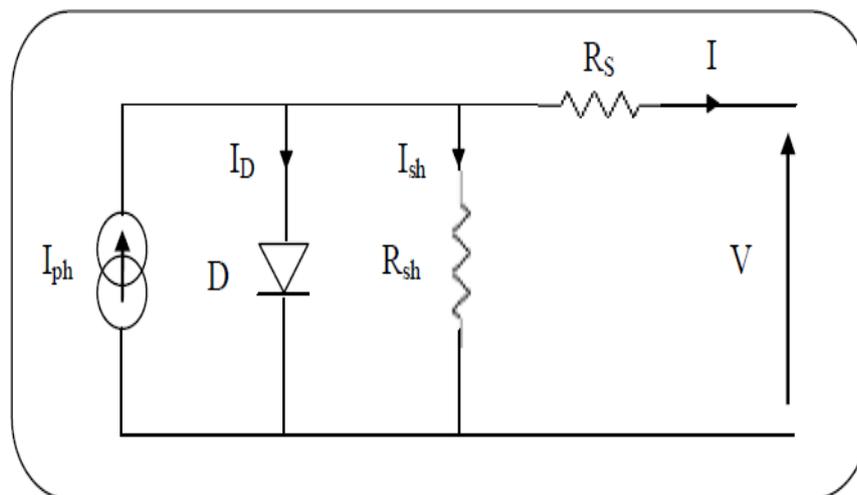


Figure II-2 -1: schéma équivalent d'une cellule solaire [25]

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule, elle est principalement 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 façon dont celle-ci a été réalisée.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (\text{II-4})$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-5})$$

R_S : Résistance série (Ω)

R_{sh} Les diverses résistances de contacts et de connexions.

II. 2.2. Modèle à une diode sans résistance shunt :

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode sans résistance shunt. La figure (II-2-2) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode sans résistance shunt.[25]

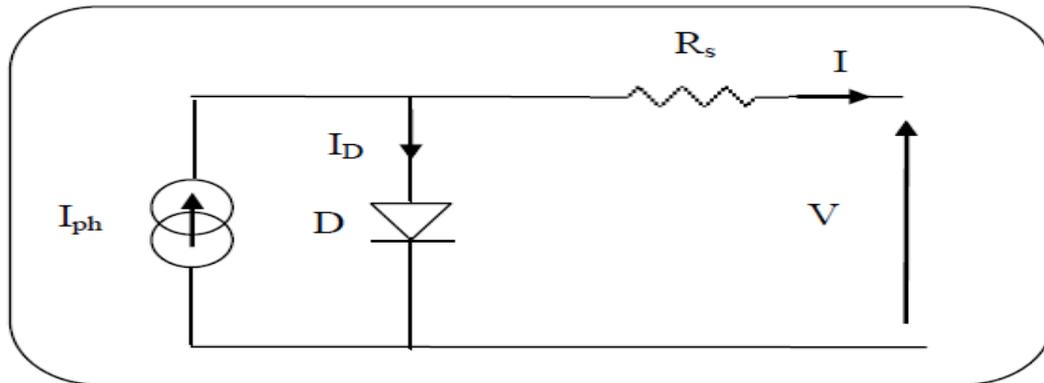


Figure II-2-2 : schéma équivalent à une diode sans résistance shunt [25]

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II-6})$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II-7})$$

II .2 .3 .Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) :

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure. II-2-3), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série. [22]

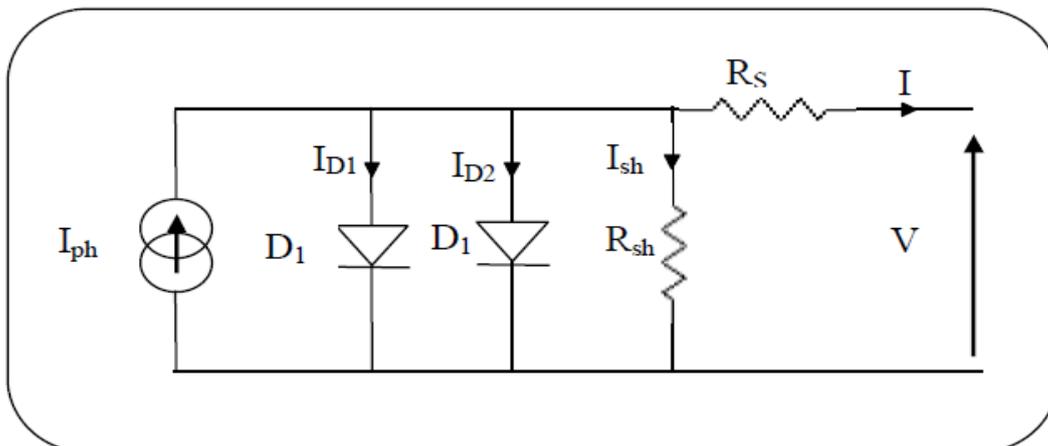


Figure (II-2-3) : schéma équivalent à deux diodes [25]

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{II-08})$$

$$I_{D1} = I_{01} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II-09})$$

$$I_{D2} = I_{02} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (\text{II-10})$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-11})$$

Avec : I_{01}, I_{02} courant de saturation des diodes.

II .2. 4. Modèle à deux diodes sans résistance shunt :

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (figure .II- 2-4), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série. [22]

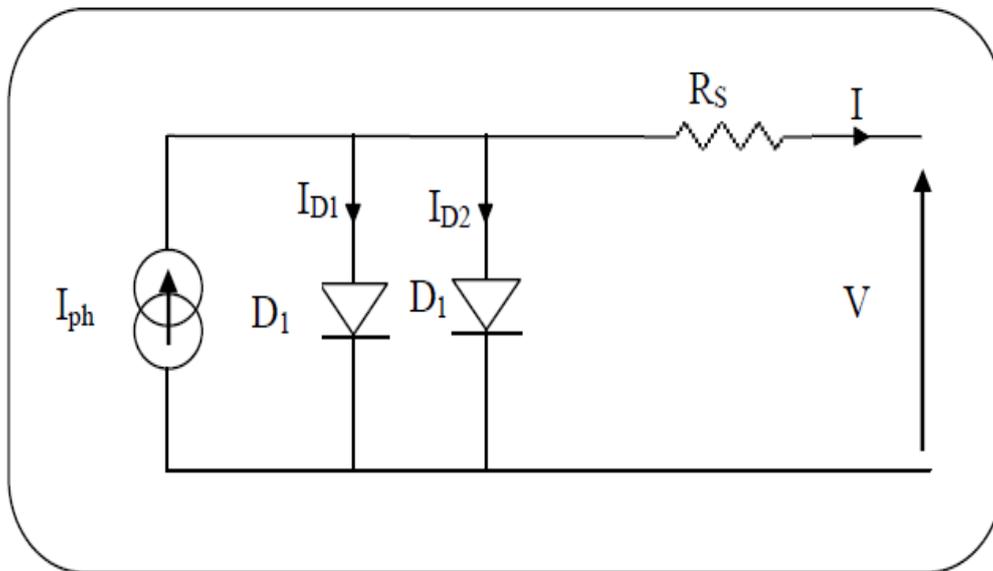


Figure : (II-2-4) schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt [25]

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) \quad (\text{II-12})$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} - 1 \right] - I_{02} \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{A \cdot K \cdot T}} \right] \quad (\text{II-13})$$

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (figure II-2-5).

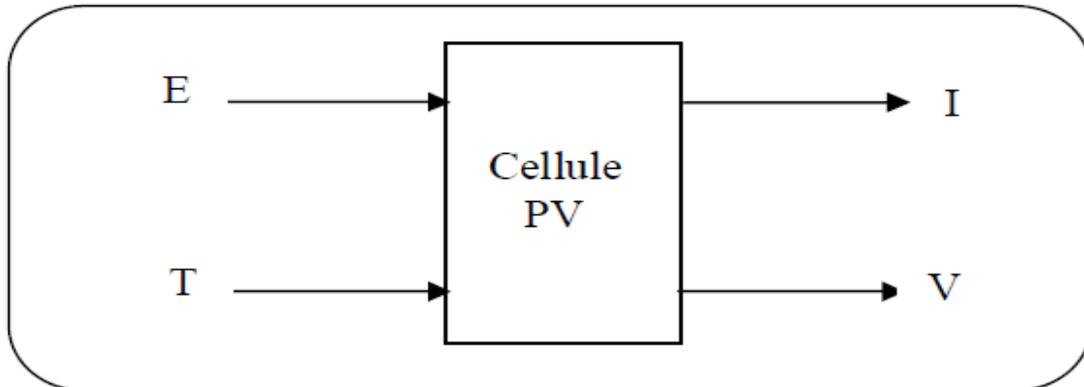


Figure (II-2-5) : schéma bloc d'une cellule PV [25]

Avec deux variables d'entrée :

G : Eclairement dans le plan de la cellule (W/m²).

T : température de la cellule (°C).

Et deux variables de sortie :

I : intensité de courant fournie par la cellule (A).

V : tension aux bornes de la cellule.

II- 3-Différents technologies des cellules solaires

Le silicium utilisé pour les cellules photovoltaïques doit être d'une grande pureté, quel que soit sa forme. Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température

ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin (monocristallin ou multi cristallin).

II.3.1. Les cellules monocristallines

Ce sont les premières photopiles élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées. Leur rendement est de 12 à 16%. (figure II.3.1) [26] [27].

Avantages	Inconvénients
*Très bon rendement (environ 150Wc/m ²) *Durée de vie importante (≈30 ans) *Rendement module commercial : 12à16%	*Cout élevé *. Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée.

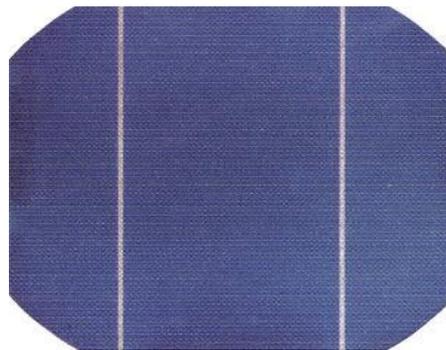


Figure : II-3-1: Cellule au silicium mono – cristallin [28]

II.3.2. Les Cellules Polycristallines :

Les panneaux PV avec des cellules Polycristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

(figure II.3.2)[26] [27].

Avantages	Inconvénients

<ul style="list-style-type: none"> *bon rendement (environ $100\text{Wc}/\text{m}^2$) * Durée de vie estimée ≈ 30 ans *Rendement module commercial : 11à15% *Meilleur marché que le monocristallin 	<ul style="list-style-type: none"> *Cout assez élevé *Rendement faible sous un faible éclaircissement
--	---



Figure : II-3-2 : Cellule au silicium poly- cristallin [29]

II.3.3 Les cellules amorphes

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines mais le courant produit est relativement bon marché. Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (figure II.3.3). [26][27].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> *Fonctionnent avec un éclaircissement faible * Rendement module commercial : 5à10% * Moins sensible aux températures élevées 	<ul style="list-style-type: none"> *Rendement faible en plein soleil * faible densité énergétique (environ $60\text{Wc}/\text{m}^2$) *Durée de vie courte (≈ 10 ans) *Performances qui diminuent sensiblement avec le temps



Figure II-3-3 : Cellule au silicium amorphe [30]

II.4. Comparaison entre les différentes technologies :

Le tableau suivant fait une comparaison entre les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

Tableau -II-1 : comparatif des différentes technologies [31]

Technologie	cellules amorphes	Cellules Poly cristallin	Cellule monocristallin
Rendement dans les conditions standard	Bon 7 - 8%	Très bon 14–16%	Très bon 14–16%
Surface de panneau pour 1kwc	m ² 16	m ² 8	m ² 7
Electricité générée en un an (modules orientés sud, inclinée à 30°)	kWh900	kW c /kWh750	750 kW c /kWh
Energie produite en un an par m ²	55-60kwh/m ²	m ² /kWh90-95	125-135 KWh/m ²

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents modèles représentant la cellule photovoltaïque. Les différentes technologies des cellules solaires ont été présentées

aus

Chapitre III :

*Influence de la poussière sur
le rendement des panneaux*

PV

III. Introduction

Le développement du solaire photovoltaïque se heurte à un certain nombre de difficultés, parmi lesquelles le coût élevé du kWh produit et la longue durée de retour sur investissement. A cela s'ajoute certains aspects d'installation et d'exploitation des modules PV. Sur le plan de l'exploitation, les modules photovoltaïques nécessitent d'être exposés à l'extérieur afin de fonctionner sous l'ensoleillement le plus direct possible. De tels équipements sont de ce fait soumis à un environnement occasionnant de multiples sources de pollution et d'encrassement. Parmi les plus courantes, nous pouvons citer : polluants industriels, pollutions automobiles, pluie acide, cheminées, pollens, poussières, sables, feuilles d'arbres, mousse, champignons, sels en ambiance marine, calcaire, résidus de produits de nettoyage... En plus de baisser leurs rendements certains polluants peuvent entraîner une usure prématurée des modules en engendrant des phénomènes d'échauffement intense via l'effet « hot spot ». Les châssis en aluminium dont les modules sont équipés peuvent également être source de nuisance en termes de production électrique. Sous l'effet de la corrosion, les profilés en aluminium attaquent les surfaces vitrées de protection. Celles-ci deviennent alors rugueuses et s'opacifient, ce qui engendre donc un effet néfaste sur le rendement de production.[32]

La poussière est un terme s'appliquant généralement à des particules solides avec un diamètre inférieur à 500 μm , chimique biologique ou électrostatique.[33]

III.1 Facteurs influent sur le dépôt de poussière :

Beaucoup de facteurs influent sur le dépôt de poussière, comme la taille des grains aussi les propriétés physiques des surfaces des modules, type de verre, texturé ou antireflet, la vitesse du vent, et beaucoup d'autres facteur comme le résume la figure III. [33]

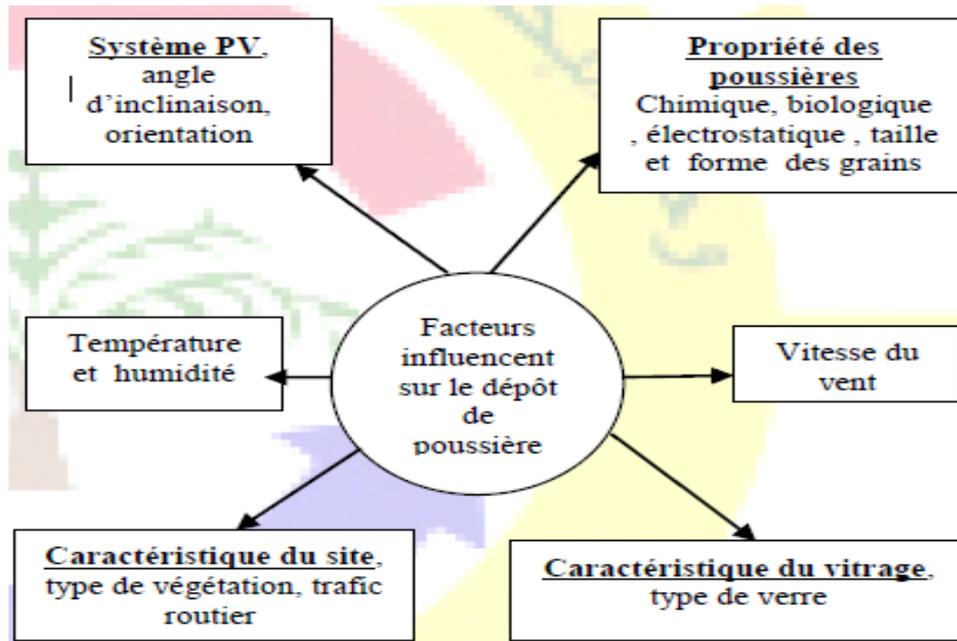


Figure-III : Facteurs influent sur le dépôt de poussière [33]

III.2 Etat de l'art

De nombreux articles ont tenté d'étudier le phénomène et les lois régissant le transport et des dépôts des poussières dans le contexte des installations de central solaires. Dans ce qui suit, un bref aperçu sur la littérature publiée sur ce sujet va être présenté.

Hottel et Woertz [34] étaient parmi les pionniers examinant l'impact de la poussière sur les systèmes solaires. Ils ont enregistré une dégradation maximale dans la performance du panneau photovoltaïque de 4.7 %. Dans une étude par Salim et al [35] sur l'accumulation de la poussière sur un village solaire PV de Riyad a indiqué une réduction de 32 % du rendement après huit mois. Wakim [36] a indiqué une réduction de la puissance produite par les panneaux de PV de 17 % en raison de l'accumulation de sable sur les panneaux à Kuwait City après six jours. En outre l'étude a aussi indiqué que l'influence de la poussière sur le rendement du générateur PV serait plus haute au printemps et en été qu'en automne et en hiver. Par une expérience pour examiner l'effet de déposition de la poussière par le vent sur des cellules solaires photovoltaïques par DirkGoosen et. al [37] a montré que la déposition ce type poussière aboutit à une baisse significatif du rendement des panneaux solaires.

Google, l'organisation célèbre dans la technologie de l'information a étudié les effets de saleté sur les panneaux solaires d'une installation solaire de 1.6 MW dans son siège social en

Californie [38]. L'entreprise a fait une comparaison sur deux ensembles différents de panneaux solaires dans le campus de Google, des panneaux horizontaux et des panneaux inclinés.

Théoriquement, la saleté s'accumule plus sur les panneaux horizontaux, tandis que la pluie permet le lavage la plupart de saleté sur les panneaux inclinés et laisse un peu d'accumulation dans les coins. Les équipes de Google les ont nettoyés dans le cadre de cette étude, 15 mois après l'installation des panneaux. Pour les panneaux plats, le nettoyage a abouti au doublement de la production d'énergie. Cependant, pour les panneaux inclinés, la différence révèle être relativement petite. Dans une étude différente dans une expérience dans Roorkee, an Inde, Garg [39] a découvert que l'accumulation de poussière sur une plaque de verre inclinée de 45° réduirait le facteur de transmission par une moyenne de 8 % après une période d'exposition de 10 jours. Dans un travail par Sayigh [40] dans Le Koweït, il a été observé qu'environ $2.5 \text{ g/m}^2/\text{jour}$ de poussière ont été rassemblés entre avril et juin. La nouvelle enquête [41] sur l'effet d'accumulation de poussière sur des plaques inclinées de verre a révélé une réduction du facteur de transmission s'étendant de 64 % à 17 %, pour des angles d'inclinaison s'étendant de 0° à 60° respectivement après 38 jours d'exposition. Une réduction de 30 % de l'énergie produite par un générateur horizontal a été observée par après trois jours d'accumulation de poussière. Dans une autre étude sur l'influence des propriétés physiques et la densité de déposition sur la performance d'un générateur solaire PV réalisée par El-Shobokshy et Hussein [42]. Une poussière artificielle qui a inclus le calcaire, le ciment et des particules carboniques ont été utilisés. Ils ont utilisé des lampes halogène pour simuler l'énergie solaire. Il a été révélé dans l'étude que le dépôt des particules de ciment (73 g/m^2) aboutiraient à la baisse la plus significative de la tension court-circuit ; c'est-à-dire 80 %. De façon intéressante, il a été trouvé que plus petit la taille des particules pour une densité de déposition fixe, plus grande serait la réduction de l'intensité solaire reçue par les panneaux solaires. Ceci était probablement en raison de la capacité plus grande des petites particules à minimiser les écarts (trous) d'inter-particule.

III.3. Nettoyage des panneaux solaires

Les fabricants préconisent de procéder à un grand nettoyage annuel - voire semestriel, dans les régions peu arrosées ou soumises à de fortes pollutions atmosphériques : en effet, les saletés, poussières et mousses qui encrassent les panneaux peuvent nuire à leurs performances.

Voici comment procéder pour nettoyer votre précieuse toiture photovoltaïque sans lui faire courir le moindre risque. [42]

III.4 .nettoyage avec un chiffon

III.4.1-Principe de base de cette méthode :

Le nettoyage des panneaux solaires avec un chiffon est similaire au nettoyage des vitres et des miroirs. Pour nettoyer les panneaux solaires nous avons besoin d'un seau rempli d'eau savonneuse tiède, un chiffon sec et une raclette en caoutchouc. Lavez délicatement la surface du panneau avec de l'eau à savon et un chiffon, pour enlever la poussière, les débris et les taches d'eau. Ensuite on utilise une raclette pour enlever l'excès d'eau. Lors du nettoyage, une inspection est faite sur la surface des panneaux en vue de détecter les fissures ou les pièces à risque de se détacher. Cette inspection nous permettra de faire appel au fabricant ou un technicien en cas de dommage du panneau.[43]

III.5. nettoyage photo catalyse

III.5.1-photo catalyse cellule solaire :

Est un nouveau revêtement de protection agissant par photo catalyse et destiné à rendre les panneaux solaires "autonettoyants" afin de diminuer significativement les interventions et les coûts de nettoyage, de maintenir, par une constante propreté, leur rendement maximum, d'empêcher les rayures lors du nettoyage par exemple. De plus, photocatalyse cellule solaire augmente la transmission de la lumière au travers de la vitre du panneau solaire et diminue sa réflexion favorisant un rendement supérieur de 4 à 5%. Photocatalyse cellule solaire protège les colorants sensibles des cellules solaires contre la dégradation par les rayons ultraviolets du soleil. L'efficacité et la durabilité de photocatalyse cellule solaire est de +/- 20 ans soit la durée de vie du panneau solaire.

- photocatalyse cellule solaire est un revêtement éco-technologique qui par ses facultés autonettoyantes, économise l'eau et les produits détergents toxiques habituellement nécessaires lors des interventions de nettoyage.

Enfin photo catalyse cellule solaire épure l'air : Chaque m² de panneaux solaires traité avec photo catalyse cellule solaire dépollue +/- 20m³ d'air à l'heure ! (La consommation d'air journalière d'un être humain étant de +/- 15m³) [44]

III.6.Conclusion :

Dans ce chapitre en a étudié l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux PV.

On présente les facteurs influents sur le dépôt de poussière et les différents types de nettoyage des panneaux.

Chapitre IV

**Etude Expérimentale du dépôt
de poussière sur les modules**

IV-1-Introduction

Dans cette expérience nous étudions l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires.

Dans cette expérience on a utilisé deux modules PV de type CEM 200 M-72 silicium monocristallin d'une puissance 200(W). Le générateur PV utilisé dans ce travail peut être divisé en deux groupes ; module PV(A) nettoyé et le second module PV (B) non nettoyé. Les deux modules sont montrés dans la figure (IV.1).

IV-2 Méthode

Durant la période du 09/03/2016 jusqu'au 08/05/2016, chaque deux ou trois jours, on nettoie le module (A) et on mesure le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert (et on calcule la puissance) et cela utilisant le Multimètre numérique Max 13S (LM2330). Le module (B) n'est jamais nettoyé durant toute la période de l'expérience (58 jours).

Les caractéristiques des panneaux solaires sont montrées par le tableau IV.1.

Pour nettoyer le panneau solaire on utilise un chiffon et un Liquide de nettoyage du verre.



a-Module A nettoyé

**b-Module B non
nettoyé**

Figure IV-1 : Schéma d'Expérimentation de dépôt de poussière types de module : CEM 200 M-72

Tableau IV-1 :Caractéristiques du module : CEM 200 M-72

Module	Paramètre	Valeur
silicium mono cristallin	Puissance maximale (P_{max})	200W
	Courant à P_{max}	5.84 A
	Tension à P_{max}	38 V
	Tolérance de puissance	$\pm 5\%$
	Courant en court-circuit (I_{sc})	5.75A
	Tension en circuit-ouvert (V_{oc})	45V
	Temps nominale d' utilisation de la cellule(NOCT)	$45 \pm 2^\circ\text{C}$
	Poids	14.5Kg
	Dimension	1580×808×45m m
	Tension maximale du système	1000VDC
	Charge maximale de fusibles	10A

Toutes les données techniques sont mesurées dans STC $1000\text{W}/\text{m}^2$ 25°C AM 1.5



Figure IV-2 : Multimètres numérique Multi 13S LM2330

IV-3 Etude expérimentales dépôts de poussière sur les modules PV :

Pour étudier le phénomène de dépôt de poussière sur le panneau PV des valeurs de puissance du module nettoyé et du module non nettoyé sont comparées. Dans ce cas, les pertes de puissance relatives sont calculées par l'équation suivante :

$$P (\%) = 100 * \left(\frac{P_A - P_B}{P_A} \right) \text{(IV-1)}$$

$P (\%)$: la différence de puissance

P_A : La puissance mesurée pour le verre de module nettoyé.

P_B : La puissance mesurée pour le verre module non nettoyé.

IV .3.1 Résultats et discussion :

La figure IV-3 montre la différence entre les courants de court-circuit mesurés sur les deux modules (nettoyé et non nettoyé).

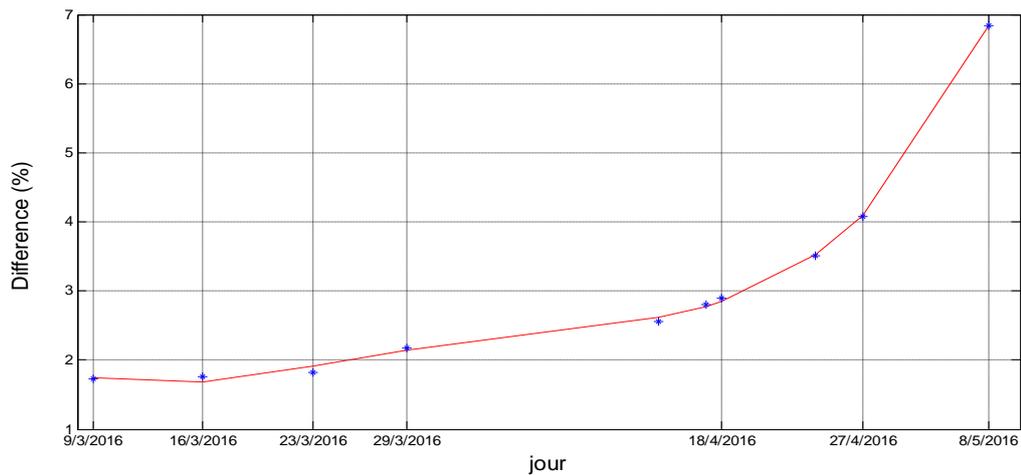


Figure IV-3 : Evolution de la différence courant nettoyé et non nettoyé en fonction de jour

Cette figure montre que la différence augmente au fil du temps, ce qui montre que le courant de court-circuit est sensible (diminue) suite au dépôt de la poussière.

Le modèle déduit à partir des valeurs mesurées en utilisant l'instruction d'interpolation (Polyfit) de Matlab est le suivant :

$$\text{Différence} = -0.0003d^3 + 0.0079d^2 - 0.0630d + 1.8039$$

d = le nombre de jours.

La figure IV-4 montre la différence des tensions de circuit-ouvert mesurées sur les deux modules (nettoyé et non nettoyé).

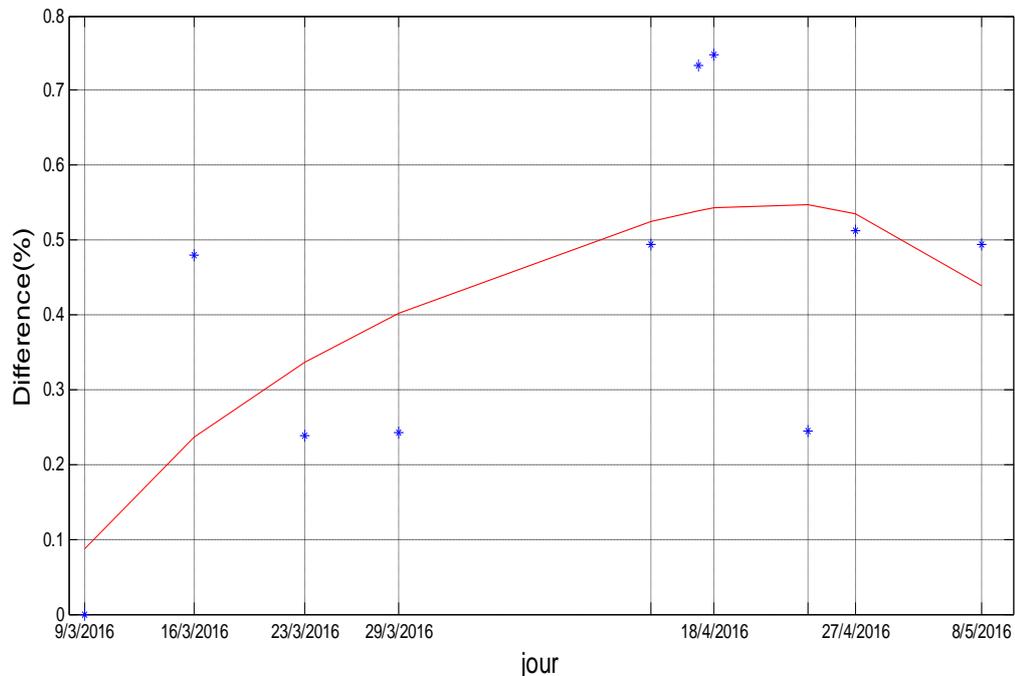


Figure IV-4 : Evolution de la différence tension de module nettoyé et non nettoyé en fonction de jour

Cette figure montre que la différence est presque constante au fil du temps, ce qui montre que la tension de circuit-ouvert n'est pas très affectée par le dépôt de la poussière.

Le modèle déduit à partir des valeurs mesurées en utilisant l'instruction d'interpolation (Polyfit) de Matlab est le suivant :

$$\text{Différence} = -0.0009d^2 + 0.0277d - 0.0608$$

La figure VI-5 montre la différence de puissance produite par les deux panneaux calculée à partir des mesures du courant de court-circuit et de la tension de circuit-ouvert effectuées sur les deux panneaux durant la période du 09/03/2016 jusqu'au 08/05/2016

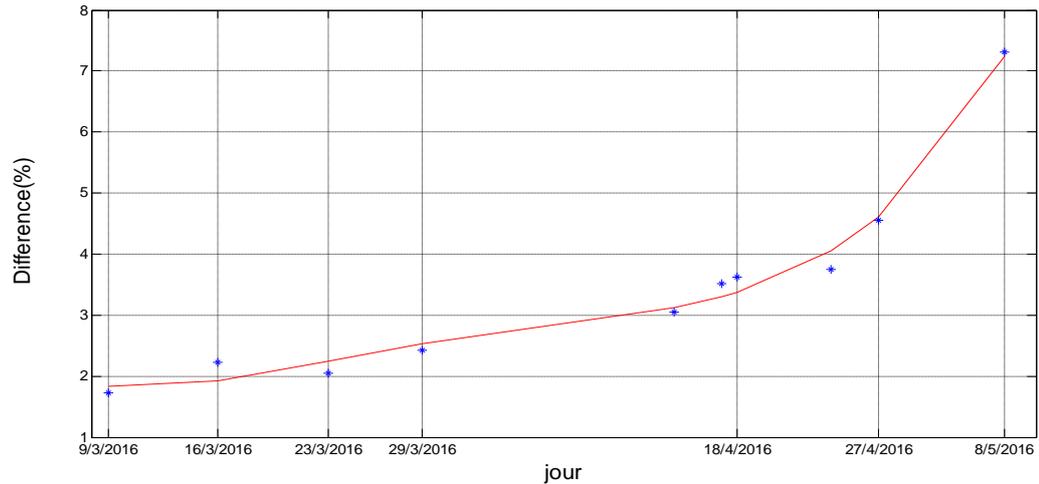


Figure IV-5 :Evolution de la différence puissance de module nettoyé et non nettoyé en fonction de jour

Le modèle déduit à partir des valeurs mesurées en utilisant l'instruction d'interpolation (polyfit) de Matlab est le suivant :

$$\text{Différence} = -0.0002d^3 + 0.0069d^2 - 0.0350d + 1.8623$$

La puissance de chaque module calculée de la façon suivant :

$$P = V_{OC} I_{CC} * FF \quad (\text{VI-2})$$

Avec :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} I_{CC}} \quad (\text{VI-3})$$

La figure montre qu'au début de l'expérience la différence entre les deux modules était de 1.6%. La différence n'est pas nulle car les modules ne sont pas parfaitement identiques. Après 58 jours de dépôt de poussière, la différence entre les deux modules a atteint 7.3%.

La figure VI-6 montre la différence de puissance produite par les deux panneaux calculée à partir de mesure du courant du court-circuit et de la tension de circuit ouvert effectuée sur les deux panneaux le 08 Mai 2016.

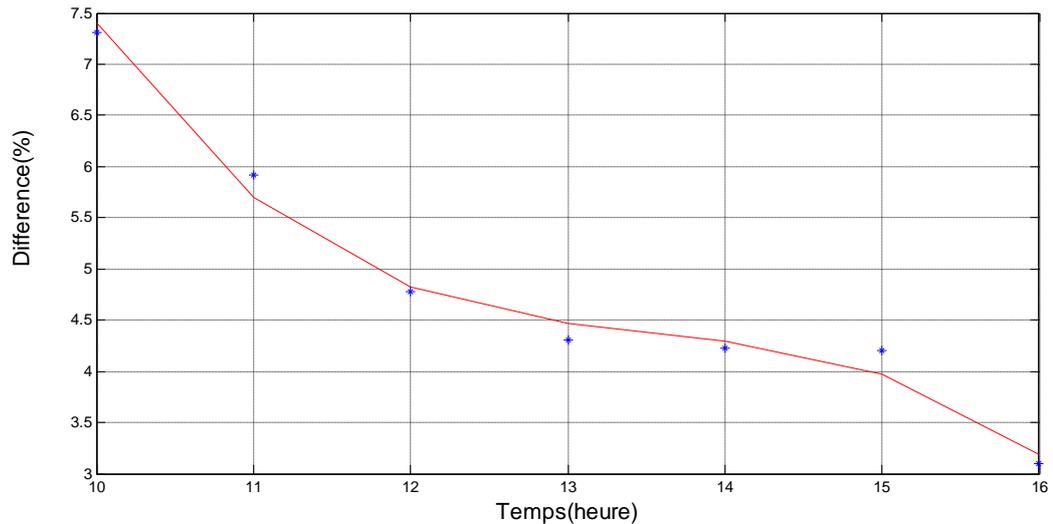


Figure IV-6 : Evolution de la différence puissance de module nettoyé et non nettoyé en fonction de l'heure

Le modèle déduit à partir des valeurs mesurées en utilisant l'instruction d'interpolation (polyfit) de Matlab est le suivant :

$$\text{Différence} = -0.0542d^3 + 0.7421d^2 - 3.5510d + 10.2630$$

Ce jour représente le 58 jour de l'expérience. Des mesures ont été effectuées entre 10h et 17h avec un intervalle de temps égal à une heure.

Les résultats montrent que la différence de la puissance produite par les deux panneaux est variable durant la journée. Elle commence par une différence de 7.3 % vers 10h pour atteindre 3% vers 17h.

Ceci est dû à la variation de l'angle d'incidence du faisceau lumineux du soleil.

IV-4- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de l'expérience que nous avons effectuée pour étudier l'influence du dépôt de la poussière sur le rendement des panneaux photovoltaïques.

La différence (le courant augmente et la tension presque constante) au fil du temps et la différence puissance entre les deux modules était de 1.6%. Après 58 jours de dépôt de poussière, elle a atteint 7.3% et les panneaux solaires perdent dans le rendement 5.7%.

Annexe

Annexe1 : mesures sur le dépôt de poussière sur la surface des modules PV

Date	Heur	Module nettoyé		Module non nettoyé	
		Courant de court circuit (A)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court circuit (A)	Tension en circuit ouvert (V)
09/3/2016.	10:30	4.05	43.3	3.98	43.3
13/3/2016	11:05	5.13	43.1	4.69	42.9
14/3/2016	11:33	3.86	42.1	3.79	42
15/3/2016	10:38	4.07	41.6	3.85	41.6
16/3/2016	10 :37	3.98	41.6	3.91	41.4
17/3/2016	10:20	3.53	41.4	3.45	41.3
20/3/2016	10:30	4.10	41.6	4.20	41
21/3/2016	10:38	4.06	41.2	3.95	41.1
22/3/2016	11:00	4.13	41.6	3.96	41.4
23/3/2016	10:43	3.86	41.9	3.79	41.8
24/3/2016	10:24	3.55	41.6	3.43	41.2
27/3/2016	10:28	3.95	41.7	3.90	41.5
28/3/2016	10:28	3.76	41.3	3.71	41.2
29/3/2016	10:10	3.21	41.7	3.14	41.6
30/3/2016	10:25	3.60	41	3.66	40.9
03/4/2016	10:10	2.96	41.5	2.79	41.3
04/4/2016	10:15	3.51	41.5	3.36	41.2
05/4/2016	10:04	3.04	41.8	2.31	41.2
7/4/2016	9:40	2.58	43.1	2.54	42.8
10/4/2016	10:10	3.28	41.4	3.14	41.3
11/4/2016	10:25	3.34	41	3.29	40.9
12/4/2016	10:38	4.18	40.7	4.10	40.04
13/4/2016	10:55	4.50	40.7	4.42	40.4
14/4/2016	10:33	.903	40.4	3.80	40.2
17/4/2016	10:35	3.92	40.9	3.81	40.6
18/4/2016	11:00	4.49	40.1	4.36	39.8
19/4/2016	10:05	3.30	40.9	3.14	40.7
20/4/2016	10:20	3.40	40.7	3.31	40.4
21/4/2016	10:36	3.94	41	3.86	40.8
24/4/2016	10:19	3.42	41	3.30	40.9
25/4/2016	10:10	2.89	40.9	2.79	40.8
26/4/2016	10:37	3.68	40.3	3.57	40.2
27/4/2016	10:40	3.44	39.1	3.30	38.9
28/4/2016	11:00	4.14	39.5	3.94	39.4
3/5/2016	11:00	4.15	41	4.01	41
13/5/2016	10:42	4.09	40.4	3.81	40.2

Annexe2: mesures sur le dépôt de poussièresur la surfacedes modules PV

date	temps	Module nettoyé		Module non nettoyé	
		Courant de court circuit (A)	Tension en circuit ouvert (V)	Courant de court circuit (A)	Tension en circuit ouvert (V)
8/5/2016	10:42	4.09	40.4	3.81	40.2
	11:50	5.15	39.5	4.87	39.3
	12:43	5.73	39.4	5.47	39.3
	13:49	5.90	39.4	5.66	39.3
	14:50	5.44	39.8	5.21	39.8
	15:50	4.52	40.1	4.33	40.1
	16:45	2.91	40.2	2.82	40.2
	17:20	2.50	40.1	2.45	40.2

Référence bibliographique

[1] E. Kechar #1, E. Azzag *2, I. Toua_bia , Influence des rayonnements solaires sur le rendement des panneaux photovoltaïques, 2015

[2] SALAHEDDINE BENSALÉM, Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires , 06/01/2011.

[3] R. Jimmy et al., Le pompage photovoltaïque, Édition Multi mondes, 1999

[4] B. Flèche - D. Delagnes ,Energie solaire photovoltaïque.doc ,juin 07..

[5] MORNAY Thomas, VERNAY Alexism, VOLLE Marion, Les cellules photovoltaïques, Classes préparatoires CPE, Année 2004-2005.

[6] <http://www2.cnrs.fr/presse/thema/340.htm>

[7] Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque. [Représentation].

[8]: M. PETIBON Stéphane, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat soutenue le 20 janvier 2009.

[9] La centrale photovoltaïque du Parc des expositions de Bordeaux 1 EDF Energies Nouvelles – Février 2013.

[10] Sonelgaz , Centre Adrar , 1998..

[11] Boukhers Djamil, optimisation d'un system d'energie photovoltaïque application au pompage,le 28/11/2007..

[12] Meziani Zahra, modélisation de module photovoltaïque, université Batna,2012.

[13] David HERVE, Conseiller Energie9 avril 2013.

[14] ww.directindustry.fr/prod/solarfun-power/product-54785-358252.html#product-item_358247

[15] http://wwwbuch-des-ynergie.de/c_neu_html/c_04_10_sonne_pv_typen_4.htm

[16]<http://de.picclick.com/Solarmodul-90Watt-12V-D%C3%BCnnschicht-Sharp-Sunline-Inselanlage-Caravan-381352102224.html>

[17]Modélisation- modules- photovoltaïque 2012.

[18] Jacob P. Bock, Jason R. Robison, Rajesh Sharma, Jing Zhang, Malay. K. Mazumder. An Efficient Power Management Approach for Self-Cleaning Solar Panels with Integrated Electro dynamic Screens Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics 2008, Paper O2

[19] M.MESROUK, A.HADJ ARAB. Effet de la poussière sur le rendement des modules photovoltaïques , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 14 Octobre 2014

[20]M. C. Hottel and B. B. Woertz, "Performance of flat plate solar heat collectors," ASME Trans., vol. 64, pp. 91-104, 1942.

[21]A. Salim, F. Huraib, and N. Eugenio, " PV power-study of system options and optimization," in Proceedings of the 8th European PV Solar Energy Conference, Florence, Italy, 1988 .

[22] F. Wakim, "Introduction of PV power generation to Kuwait," Kuwait Institute for Scientific Researchers, Kuwait City, 1981 .

[23]D. Goossens and E. V. Kerschaever, "Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance," Solar Energy, vol. 66, pp. 277-289 ,1999.

[24]M. Moon. (2009) Google Studies How Dirt Affects Solar Panel Efficiency. PC Magazine: Good Clean Tech. Available :

[25]www.goodcleantech.com/2009/08/google_studies_how_dirt_affect.php.

[26] G. B. Katz. (2008, 27 April 2011). Effect of Dust on Solar Panels. available: www.gregorybkatz.com/Home/effect-of-dust-on-solar-panels.

[27] H. P. Garg, "Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors," Solar Energy, vol. 15, pp. 299-302, 1973.

[28] A. A. M. Sayigh, "Effect of dust on flat plate collectors," in Proceedings of the International Solar Energy Congress, New Delhi, pp. 960-964 ,1978.

[29]A. A. M. Sayigh, S. Al-Jandal, and H. Ahmed, "Dust effect on solar flat surfaces devices in Kuwait," in Proceedings of the Workshop on the Physics of Non-

Conventional Energy Sources and Materials Science for Energy, Triest, Italy, pp. 353–367, 1985.

[30] <https://panneau-solaire.ooreka.fr/fiche/voir/256075/nettoyer-des-panneaux-solaires>

[31] DIALLO Amadou Sadio , Etude de l’Influence de l’inclinaison et des dépôts de poussière sur les performances des modules PV à Kamboinsé (site du 2iE). 13 Juin 2010.p09

[32]<http://photocal.over-blog.com/article-31165053.html> 8 Mai 2009

Résumé

Nous avons traités dans ce travail l'étude l'influence du dépôt de la poussière sur le rendement des panneaux photovoltaïque

Pour cela une étude à été menée durant la période du 09/03/2016 jusqu'au 08/05/2016 à l'université d'ADRAR.

Les résultats obtenus montre que la différence (courant de court circuit augmente et le tension est presque constante) au fil du temps, la différence puissance entre les de module était de 1.6% . Après 58 jours de dépôt de poussière, a atteint 7.3%. et les panneau solaire perdent dans le rendement 5.7% .

Mot clés: photovoltaïque-rendement-poussière.

ملخص

تطرقنا في عملنا هذا إلى دراسة تأثير الغبار على مرد ودية الألواح لشمسية وقمنا بدراسة تجريبية أجريت خلال الفترة الممتدة من 2016/05/8 إلى 2016 9/3

وكانت النتائج المتحصل عليها تبين أن الفرق في التيار يزيد مع مرور الوقت بينما التوتر يبقى ثابتت قريبا، كان فرق الاستطاعة في البداية بين اللوحتين 1.6%. وبعد 58 يوم امن تصفية الغبار قد بلغ الفرق بين اللوحتين إلى نسبة 7.3%.

5.7%. والألواح الشمسية تفقد في هذا الأداء نسبة

الكلمات الرئيسية: الغبار - المرد ودية - الطاقة الفولطا ضوئية