



Université d'Oran 2
Faculté des sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master
Département : Géographie et aménagement du territoire
Option : Hydrologie, climatologie et territoire

Thème :

L'INFLUENCE DE TEMPERATURE SUR L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE : ETUDE ET SIMULATION

Présentée et soutenue publiquement par :

M^r. ABDELLAOUI Zin eddine
M^r. ARBOUZ Walid

Devant le jury composé de :

M^{me}. GOURINE Farida

Président

M^{me}. SENHADJI Hafida

Examinatrice

M^r. ALLAL Nadir

Encadreur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur **Mr ALLAL NADIR** pour son conseil et son aide durant toute la période du travail et nous tenons aussi à remercier le corps administratif de département de la géographie et l'aménagement de territoire.*

*Nos remerciements iront également aux membres du jury **Mme GOURINE Farida** et **Mme SENHADJI Hafida** pour avoir accepté d'évaluer Notre travail de recherche. A tous ceux qui nous ont aidées de près ou de loin, par un geste, une parole ou un conseil, on leur dit merci.*

Sans oublier tous nos enseignants qui nous ont assurés des études de haut niveau et qui nous permis d'acquérir des connaissances.

DÉDICACE I

*JE TIENS À REMERCIER TOUTE PERSONNE QUI M'A AIDÉ À RÉALISER
CE TRAVAIL.*

*MES TRÈS CHERS PARENTS MOHAMMED ET SAIDI.H ET MES FRÈRE
YACINE, SIFEDDINE ET ISLLEM QUE DIEU VOUS BÉNISSE.*

LA FAMILLE ABDELLAOUI ET LA FAMILLE SAIDI SANS EXCEPTION.

*MES CHERS ONCLES SAIDI.MOHAMMED, ABDELKADER, MILOUD QUI
M'ONT TOUJOURS TENDU LA MAIN DEPUIS MON ENFANCE.*

MON CHER AMI SMAHI RAMZI, UN DE MES PREMIERS ENCOURAGEURS.

MES CHERS AMIS :

*WALID, YASSINE, MOURAD, ABDELHADI, NOUEDDINE, NASRELLAH, ISSA
ET BEAUCOUP D'AUTRES QUI M'ONT ENCOURAGÉ.*

*TOUTE MA GRANDE FAMILLE ET TOUS QUI M'À CONNU ET SOUHAITÉ DE
LA RÉUSSITE.*

DÉDICACE II

*JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL AUX ÊTRES QUI ME SONT LES PLUS
CHERS JE CITE :*

- *MES CHERS PARENTS, MA MAMAN, MON PÈRE SANS OUBLIER MES
DEUX FRÈRES ET MA SŒUR QUI M'ONT ASSURÉ TOUS LE SUPPORT
ET CONFORT AFIN QUE JE PUISSE RÉALISER CE PROJET
AUJOURD'HUI, AINSI QUE TOUTE MA FAMILLE « ARBOUZ » QUE DIEU
LES GARDE ET LES PROTÈGE.*
 - *MON BINÔME ABDELLAOUI ZIN EDDINE, MES COLLEGUES HELALI
IMAD, MESRI ABDELKARIM, CHIKHI WALID, GHEZIL YAHIA,
HARROUZ ABDELHADI ET SMAHI RAMZI QUI M'ONT SOUTENU AU
LONG DE TOUT MON PARCOURS QUE DIEU LEURS OFFRE LA
CHANCE, LE BONHEUR ET LA RÉUSSITE.*
 - *TOUS MES AMIS ET MES PROCHES, PARTICULIÈREMENT :
CHAKIB, HOUARI, YUCEF, OTMAN, AYMEN, BILAL QUE DIEU LES
BÉNISSE.*
-

Sommaire

Résumé	1
Introduction générale	2
Chapitre I Généralités sur l'énergie solaire	5
I.1 Le soleil.....	7
I.2 Le rayonnement solaire.....	9
I.2.1 Le rayonnement global	10
I.2.2 Le rayonnement direct	10
I.2.3 Le rayonnement diffus.....	10
I.2.4 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	10
I.3 L'énergie solaire.....	11
I.3.1 Energie solaire thermique.....	11
I.3.2 Energie solaire photovoltaïque	11
I.4 Calcul de l'énergie solaire	11
I.4.1 Position du soleil	11
I.4.2 L'Irradiance solaire	12
I.4.3 Description des différentes irradiances	13
I.4.3.1 Irradiance sur un plan toujours orienté vers le soleil	13
I.4.3.2 Irradiance sur un plan horizontal	13
I.4.4 Calcul des énergies	14
I.4.5 Programme de calcul des énergies	14
I.5 Conclusion	15
Chapitre II La cellule photovoltaïque.....	16
Introduction.....	17
II.1 L'effet photovoltaïque.....	17
II.2 La cellule photovoltaïque	18
II.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	18
II.4 Types de cellules photovoltaïques	19
II.4.1 Les cellules monocristallines.....	19
II.4.2 Les cellules polycristallines	20
II.4.3 Les cellules amorphes.....	20
II.5 Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire	21
II.5.1 Circuit électrique équivalent.....	22
II.5.2 Caractéristiques d'une cellule solaire	22
II.5.2.1 Tension en circuit ouvert V_{co}	22

II.5.2.2	Courant de court-circuit I_{cc}	23
II.5.2.3	Point du fonctionnement P_m (V_m).....	23
II.5.2.4	Facteur de forme FF.....	23
II.5.2.5	Rendement η	23
II.6	Générateur photovoltaïque.....	24
II.6.1	Association des cellules photovoltaïques	24
II.6.2	Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque	25
II.6.3	La puissance maximale du générateur photovoltaïque.....	26
II.7	Influence de la météorologie sur les cellules photovoltaïques.....	27
II.7.1	Influence de la température :	27
II.7.2	Influence de l'éclairement	28
II.7.3	Couverture nuageuse	28
II.7.4	Le sable et la poussière.....	28
II.7.5	Précipitations (La pluie, la neige et la grêle)	29
II.7.6	Le vent et la foudre	29
II.8	Installation des panneaux photovoltaïques	29
II.9	Conclusion	30
Chapitre III	32
Modélisation d'un Système Photovoltaïque.	32
III.1	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	33
III.1.1	Le courant de la cellule	34
III.1.2	Le photo-courant.....	34
III.1.3	Le courant de saturation I_0	35
III.1.4	Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)	35
III.1.5	Le courant du panneau	35
III.1.6	La puissance fournie par un module PV.....	36
III.1.6.1	Premier approche	36
III.1.6.2	Deuxième approche.....	37
III.1.6.3	Troisième approche	37
III.1.7	Effet de la température de fonctionnement de la cellule.....	38
III.2	Les différentes conditions de test	38
III.2.1	Les organismes de standardisation	39
III.2.2	La caractérisation en laboratoire	39
III.2.3	La caractérisation en extérieur	40
III.3	Mesures et procédures pour l'obtention des caractéristiques I-V	40

III.3.1	Les normes	40
III.3.1.1	Les mesures sous lumière artificielle	40
III.3.1.2	Les mesures sous lumière naturelle	41
III.3.2	La mesure de la caractéristique I-V	41
III.4	Conclusion.....	42
Chapitre IV	Simulation d'un Système Photovoltaïque.	43
IV.1	Logiciel Matlab/Simulink : L'outil de simulation.....	44
IV.2	Simulation d'une cellule photovoltaïque	44
IV.2.1	Influence de la température sur la cellule	46
IV.2.2	Influence de l'éclairement sur la cellule	46
IV.3	Simulation d'un générateur PV sous MATLAB-SIMULINK	47
IV.3.1	Influence de la température sur le générateur PV	49
IV.3.2	Influence de l'éclairement sur le générateur PV	50
IV.4	Exemple de fonctionnement des modules PV en conditions réelles(NOCT).....	51
IV.4.1	Etude de l'influence de la température et l'éclairement sur le fonctionnement des modules PV sur la région d'Oran Es-Senia	51
IV.4.1.1	Pendant une journée :	51
IV.4.1.2	Pendant une année.....	54
IV.5	Conclusion	57
Conclusion générale	52	
Annexe	60	
Référence	73	

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

Figure (I.1) : Distribution de l'énergie solaire dans le monde.....	6
Figure (I.2) : Distribution moyenne de la somme de 10 ans de l'énergie solaire en Algérie ..	7
Figure (I.3) : Coupe schématique du soleil.	8
Figure (I.4) : Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	9
Figure (I.5) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.	10
Figure (I.6) : La position du soleil observée d'après l'origine O.	12
Figure (I.7) : L'angle horaire et l'angle de la déclinaison.	12

Chapitre II : La cellule photovoltaïque

Figure (II.1) : Les cellules photovoltaïques.	18
Figure (II.2) : Présentation schématique le principe d'une cellule solaire.	18
Figure (II.3) : Cellule monocristallines.....	20
Figure (II.4) : Cellule poly cristalline.....	20
Figure (II.5) : Cellule amorphe.	20
Figure (II.6) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement.	21
Figure (II.7) : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.	24
Figure (II.8) : Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série.	24
Figure (II.9) : Caractéristique résultante du regroupement de Np cellules en parallèle.....	25
Figure (II.10) : Les différentes zones de la caractéristique I(V), T=25°, E=1000W/m ²	25
Figure (II.11) : Intersection de la caractéristique courant-tension avec la ligne de charge....	26
Figure (II.12) : Effet de la température sur la caractéristique I(V) [25].....	27
Figure (II.13) : Effet de la température sur la caractéristique P(V) [25].....	27
Figure (II.14) : Effet d'éclairement sur la caractéristique I(V) [25].	28

Chapitre III : Modélisation d'un système photovoltaïque

Figure (III.1) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.	32
Figure (III.2) : Schéma bloc d'une cellule PV.	35

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque

Figure (IV.1) : Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.	44
Figure (IV.2-a) : Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, E=1000W/m ²).....	44
Figure (IV.2-b) : Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, E=1000W/m ²).	44
Figure (IV.3-a) : Caractéristique I(V) pour différentes températures (E=1000W/m ²).....	45
Figure (IV.3-b) : Caractéristique P(V) pour différentes températures (E=1000W/m ²).....	45
Figure (IV.4-a) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	46
Figure (IV.4-b) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	46
Figure (IV.5) : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.....	47

Figure (IV.6-a) : Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, E=1000W/m ²).....	47
Figure (IV.6-b) : Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, E=1000W/m ²).	47
Figure (IV.7) : Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (E=1000W/m ²).	48
Figure (IV.8) : Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (E=1000W/m ²).	48
Figure (IV.9-a) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	48
Figure (IV.9-b) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).	48
Figure (IV.10) : histogramme qui décrit la puissance et le rendement pour un éclairement E (200-1000w/m ²) et des températures de 25°C, 35°C et 45°C.	49
Figure (IV.11) : Variation de la Puissance Max en fonction de la température et de l'éclairement (21 Mars 2016).	49
Figure (IV.12) : Variation du rendement en fonction de l'éclairement (21 Mars 2016).	50
Figure (IV.13) : Variation de la Puissance Max en fonction de la température et de l'éclairement (21 Juin 2016).	51
Figure (IV.14) : Variation du rendement en fonction de l'éclairement (21 Juin 2016).	51
Figure (IV.15) : Variation de la Puissance Max en fonction de la température et de l'éclairement (21 Décembre 2016).	51
Figure (IV.16) : Variation du rendement en fonction de l'éclairement (21 Décembre 2016)	51
Figure (IV.17) : l'énergie moyenne mensuelle de l'année 2016.	52
Figure (IV.18) : Température du panneau (°C) par rapport à la température ambiante (°C).	52
Figure (IV.19) : Puissance (W) par rapport à la température du panneau (°C).	53
Figure (IV.20) : Variation de la puissance maximale en fonction de T cell pour les températures ambiantes	55
Figure (IV.21) : Variation de la puissance maximale en fonction de T cell pour les températures maximales.	55
Figure (IV.22) : Variation de la puissance maximale en fonction de T cell pour les températures minimales.	55

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Caractéristiques principales du soleil.	8
Tableau (IV.1) : Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards STC ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$).	43
Tableau (IV.2) : Caractéristique électrique de GPV dans les conditions standards.	46
Tableau (IV.3) : Variation des différentes caractéristiques du panneau solaire en fonction de l'éclairement et la température.	49
Tableau (IV.4) : Variation des différentes caractéristiques du panneau solaire en fonction de l'éclairement et la température moyenne mensuelle sur la région d'Oran (2016).	53

Nomenclature

PV	Photovoltaïque
I	Courant (A)
V	Tension (V)
E	Eclairement solaire (W/m^2)
T	Température de l'air
T cell	Température de la cellule
A	Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.
I_{ph}	Courant photonique(A)
I_{cell}	Courant délivré par la photopile (A)
I_d	Courant de la diode (A)
I_{Rsh}	Courant shunt (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_m	Puissance maximal (W)
P_{inc}	Puissance incidente
PA	La puissance mesurée pour le verre de module nettoyé
PB	La puissance mesurée pour le verre de module non nettoyé
N	Nombre de jours
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)
V_{co}	Tension en circuit ouvert (V)
m	Masse d'aire optique
τ	Transmittance atmosphérique
δ	Déclinaison
ω	L'angle horaire
TSV	Temps solaire vrai
α	L'angle d'azimut
Λ	La longitude
Ψ	L'angle zénithal
h	Angle d'altitude solaire
λ	Longueur d'onde
φ	La latitude
S_{p0}	Irradiance solaire extra-atmosphérique

S_{pb}	Irradiance solaire directe
S_{pd}	Irradiance solaire diffuse
S_b	Irradiance directe sur une surface horizontale
S_d	Irradiance diffuse sur une surface horizontale
S_t	Irradiance totale sur une surface horizontale
J_i	Energie suivant l'indice i
I_{obs}	Intensité dans l'obscurité (A)
I_s	Courant de saturation (A)
n	Facteur de qualité de la diode
V_{th}	Potentiel thermique (V)
K	Constant de Boltzmann
K_i	Courant-circuit divisé par le coefficient de température du panneau
T_{ref}	Température de référence (298 K)
E_g	Energie de gap du semi-conducteur
N_s	Nombre de cellules connectées en série dans un module
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module
IEC	Commission Internationale Electrotechnique

Résumé

Aujourd'hui, Les énergies renouvelables sont devenues une alternative aux énergies fossiles. L'énergie solaire, en particulier photovoltaïque, poursuivent son essor dans le monde et confortent son domination en terme de nouvelle capacité de production d'énergie électrique sur les énergies fossiles. Cependant et malgré les améliorations technologiques sur le rendement des cellules photovoltaïques, les performances des panneaux solaires photovoltaïques sont fortement affectées par des paramètres météorologiques tels que le rayonnement solaire, la température, l'humidité et la pluviométrie.

L'objectif visé dans ce travail est l'étude par la simulation l'effet des paramètres météorologiques précisément la température et l'éclairement solaire sur le rendement des cellules des panneaux solaires. Une modélisation d'un module photovoltaïque est élaborée sur l'environnement Matlab afin de simulé les caractéristiques électriques *courant – tension* (V-I) et puissance – tension (P-V) en fonction d'une part de la température de l'air et de l'irradiance (calculé sur le plan du panneau) d'autre part.

Mots clés: Energie solaire, cellules photovoltaïque, température, éclairement solaire, simulation, Modélisation.

Introduction générale

Actuellement, la production de l'énergie est basée en grande partie sur des ressources fossiles limitées, le pétrole, le gaz et le charbon. Ces sources deviennent de plus en plus rares pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

Étant donné que ces formes d'énergie ont des effets nuisibles sur l'environnement (effet de serre, réchauffement climatique...), il est nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais. Pour cela, beaucoup de recherches scientifiques ont été réalisées afin de trouver une source d'énergie illimitée, économique et peu polluante telles que le solaire et l'éolien, car la protection de l'environnement est devenue un point important.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables. Découverte par **E. Becquerel** en 1839, elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique solaire en électricité [1].

L'expérience montre que le fonctionnement des cellules solaires dépend fortement de plusieurs paramètres ; internes (lié au dispositif lui-même ; la technologie d'élaboration du dispositif photovoltaïque) et externes (lié à l'entourage du fonctionnement : éclairement, température, etc.). L'étude de l'influence de ces différents paramètres sur le fonctionnement des photopiles solaires est possible par la modélisation des éléments physiques de la conversion de l'énergie et le comportement de la cellule photovoltaïque à travers la connaissance de l'influence de chaque paramètre sur la caractéristique courant – tension (I-V) de la cellule.

L'éclairement solaire et la température sont deux paramètres extrêmement importants dans le comportement des cellules solaires. Ils influent énormément sur la puissance électrique et le rendement de la cellule solaire d'où l'importance de l'étude de l'influence de ces deux paramètres météorologiques pour optimiser les performances des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires. Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est extraite sous

forme d'énergie électrique, en conséquence c'est la grande partie de l'énergie incidente qui devra être dissipée sous forme de chaleur. Ceci conduit, sous rayonnement, à une température de fonctionnement relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée.

Plusieurs modèles ont été proposés pour la caractérisation de la cellule PV. Le choix d'un modèle dépend du nombre des paramètres qui intervient dans le calcul des grandeurs électriques de sortie (courants, tensions, puissance) et la technologie de la cellule.

Développé par **Borowy** et **Salamen** en 1996, le modèle basé sur le circuit équivalent à une diode [9] fait usage des spécifications des modules photovoltaïques données par les fabricants. Il offre une façon très simple pour le calcul de la puissance produite par les modules photovoltaïques [10].

Avant l'usage, les modules PV sont soumis à des tests dans plusieurs conditions afin de connaître leurs performances dans différents climats d'exposition. Les Conditions de test Standards **STC** (en anglais Standard Test Condition STC) permettent le calcul de la puissance nominale maximale d'un panneau solaire avec une masse d'air $AM=1,5$ fois le spectre solaire, une température de cellule de 25°C et pour un rayonnement solaire de 1000 Watts/m^2 . Adopté par plusieurs organismes de normes et de standards comme **ASTM** International et (American Society for Testing and Materials) et **IEC** (International Electrotechnical Commission), les STC offrent la possibilité de comparer les modules PV des différents fabricants.

Cependant, ces conditions ne peuvent être effectuées que dans les laboratoires alors que, en extérieur, les cellules PV d'un module soumis à l'ensoleillement maximum fonctionnent à une température plus élevée que la température ambiante de l'air. Alors, il a été aussi décidé par ces organismes de choisir comme conditions normales (**NOCT**, Nominal Operating Cell Température), une irradiance de 800 W/m^2 à 45°C , une température ambiante de 20°C et une vitesse de vent de 1 m/s .

Notre principal objectif est l'étude par simulation de l'effet de la température sur le rendement des panneaux solaire poly-cristalline.

Ce modeste rapport est organisé par quatre parties distinguées :

- Le premier chapitre sera consacré entièrement sur l'énergie solaire et son rayonnement, avec les différents types des irradiances voir les énergies et comment les calculer sur le plan théorique.
- On trouve dans le second chapitre, l'énergie solaire photovoltaïque, les cellules photovoltaïques, le principe de fonctionnement, caractéristique d'une cellule solaire, et à la fin les paramètres météorologiques précisément la température et l'éclairement qui influent sur le rendement des cellules PV.
- Dans le troisième chapitre, nous discuterons la modélisation du comportement de la cellule PV et le différent paramètre qui intervient dans sa caractérisation. Nous montrerons aussi comment l'influence de la température dans le calcul de la puissance électrique produite.
- Le quatrième chapitre sera consacré pour présenter la différente simulation du modèle choisis dans l'environnement MATLAB d'un générateur photovoltaïque, sous les conditions standard STC et les conditions normales NOCT (pour la région d'Oran Es-Senia).

A la fin, une discussion sur les résultats de l'étude est menée plus une conclusion générale qui couronne ce mémoire de fin du cycle.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie solaire

Introduction

L'énergie solaire est une source énergétique qui dépend directement du soleil. Inépuisable en pratique, cette énergie renouvelable a l'avantage d'être propre et de ne pas dégager de gaz à effet de serre, son potentiel est immense et elle gratuite et disponible dans le monde entier. Ses caractéristiques en font aujourd'hui une source d'énergie renouvelable incontournable.

La Terre et son atmosphère reçoivent du Soleil en un peu plus d'une demi-heure l'équivalent de la consommation mondiale annuelle d'énergie, soit environ 100.000 TWh ou encore 8,7 Mds de tonnes équivalent pétrole en 2011 [2].

Le secteur de l'énergie solaire devrait encore croître fortement au cours des années à venir. Afin de couvrir l'ensemble des besoins mondiaux en électricité, il faudrait recouvrir une surface de 100 000 km² de panneaux solaires, ce qui correspond à l'équivalent de la surface de l'Islande [3].

Voici une carte qui illustre la distribution de l'énergie solaire par an dans le monde :

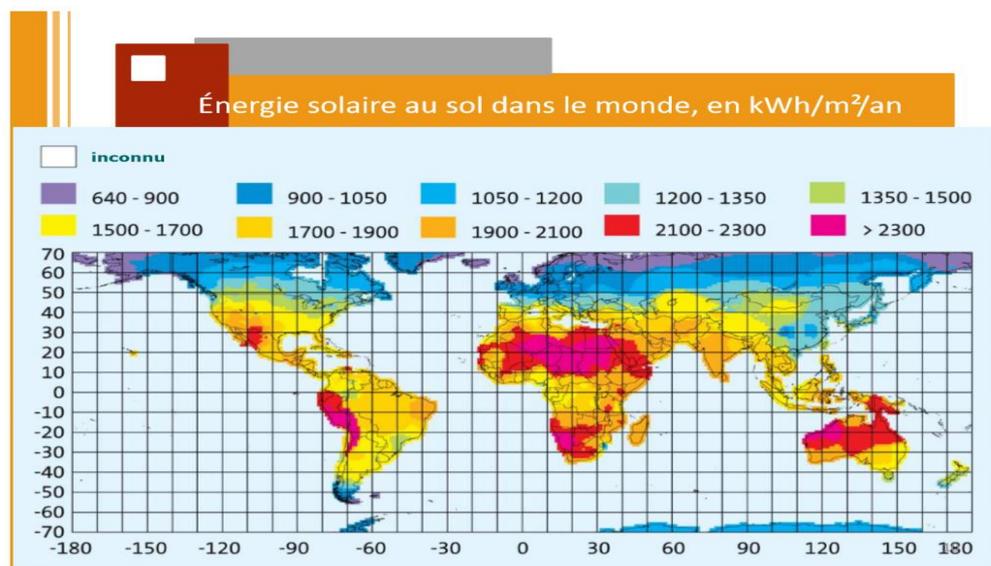


Figure (I.1) : Distribution de l'énergie solaire dans le monde

Un énorme potentiel d'énergie solaire est observé entre les deux latitudes 40° Nord et 40° Sud, dont cinq majeures parties du globe qui reçoivent la quantité la plus immense du gisement solaire, le désert de Mojave (USA), désert d'Atacama (Chile), désert du Sahara (Nord de l'Afrique), désert du Kalahari (Sud-Ouest de l'Afrique), et le Nord-Ouest de l'Australie.

En 2019, au niveau mondial, la production d'électricité solaire photovoltaïque atteignait 724,4 TWh, soit 2,7 % de la production mondiale de l'électricité, dans la même année cinq pays concentrent 69 % de la puissance photovoltaïque mondiale installée.

La Chine à elle seule concentre 32,6 % de cette puissance. Viennent ensuite les États-Unis 12 %, Japon 10 %, l'Allemagne 7,8 % et l'Inde 6,6 %.

L'Algérie se classe parmi les pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde, avec une durée d'insolation de 2.000 à 3.900 heures par an, et une irradiation journalière sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 3 KWh à 6 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit plus de 1700KWh/m² par an au Nord et 2300 kWh/m² par an au Sud du pays., qui est l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale [5].

Voici une carte qui illustre la distribution moyenne de l'énergie solaire de la somme de 10 ans en Algérie :

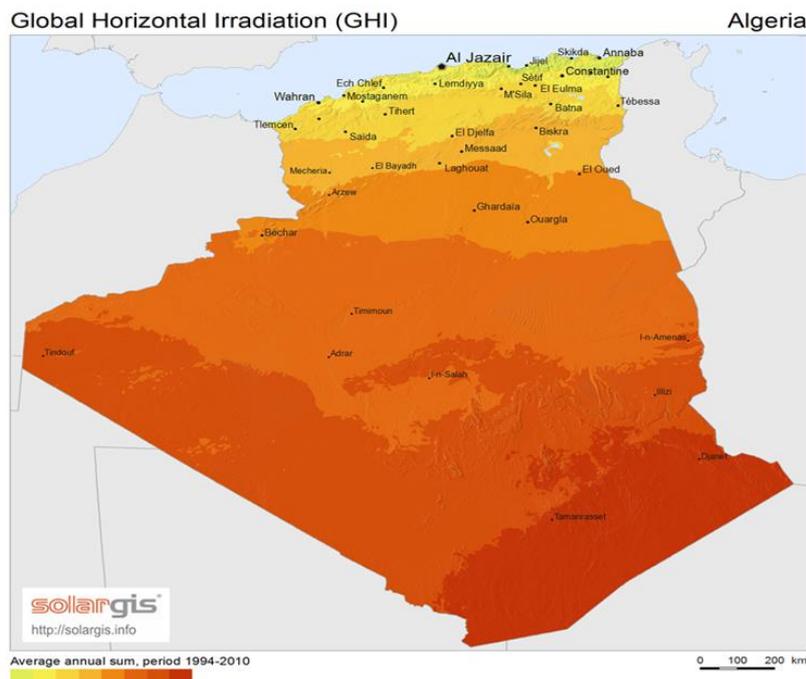


Figure (Error! No text of specified style in document.2) : Distribution moyenne de la somme

Eu égard à ces statistiques particulièrement favorables au développement de l'énergie photovoltaïque, qui demeure la plus importante en disponibilité et puissance et sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes, le gouvernement algérien avait décidé de lancer dès l'année 2011 un programme à long terme d'exploitation d'énergie solaire.

I.1 Le soleil

Sur le plan cosmogonique, le soleil est une étoile quelconque dont ni les propriétés physiques ni la position ne la distinguent des milliards d'autres étoiles formant la Galaxie. Sur le plan humain, cette étoile a une importance primordiale puisque sans elle la vie n'existerait pas sur terre.

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

Caractéristiques	Valeur
Masse	1.989×10^{30} kg
Diamètre	1.392×10^9 km
Masse volumique moyenne	1410 Kg.m^{-3}
Puissance rayon	3.83×10^{26} W
Température superficielle	5770K

Table (I.2) : Caractéristiques principales du soleil [2].

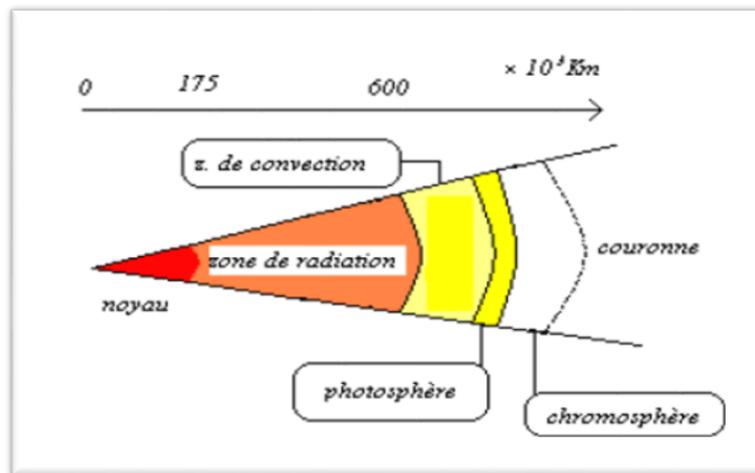


Figure (I.3) : Coupe schématique du soleil.

La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.3). 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 ($\sim 105 \text{ Kg.m}^{-3}$), 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.

Le soleil est composé chimiquement 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 connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à 150×10^6 Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient huit minutes après avoir été émise [6,7].

I.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques.

La répartition spectrale du rayonnement solaire est déterminée par la température de sa surface, à savoir 5900 °K [1]. La figure (I.4) donne l'allure de la répartition spectrale du rayonnement solaire réel hors atmosphère (l'éclairement spectral est défini comme une puissance reçue par une surface pour une longueur d'onde donnée ; comparé à celle du corps noir à 5900 K, on constate que le soleil se comporte approximativement comme un corps noir.

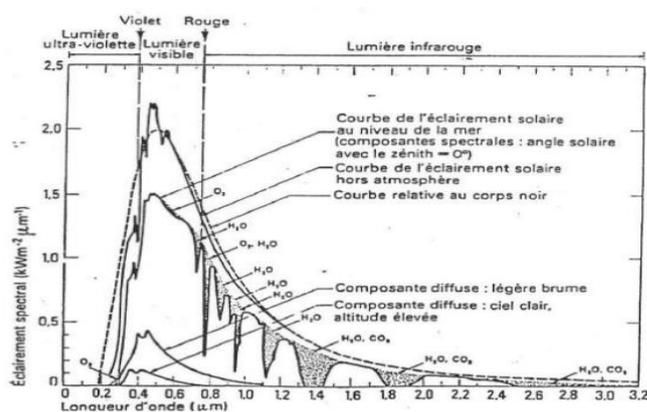


Figure (I.4) : Répartition spectrale du rayonnement solaire.

Ces spectres montrent que le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur variant de 0.2 μm (ultraviolet) à 10 μm (infrarouge). Ce rayonnement solaire se décompose en bandes comme suit [1] :

- 6,4 % dans la bande ultraviolet (UV) : $0.2 < \lambda \leq 0.38 \mu m$
- 48,0 % dans la bande visible : $0.38 < \lambda \leq 0.78 \mu m$
- 45,6 % dans la bande infrarouge (IR) : $0.78 < \lambda \leq 10 \mu m$

La figure (I.4), montre aussi, l'atténuation observée après le passage à travers une épaisseur d'atmosphère correspondant à une masse d'air 1,5 (on la définit ci-dessous), soit l'équivalent d'une hauteur du soleil de 41.8° au niveau de la mer.

En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

I.2.1 Le rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par **un pyranomètre** ou **un solarimètre** sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par **un pyranomètre** placé horizontalement à l'endroit requis [9].

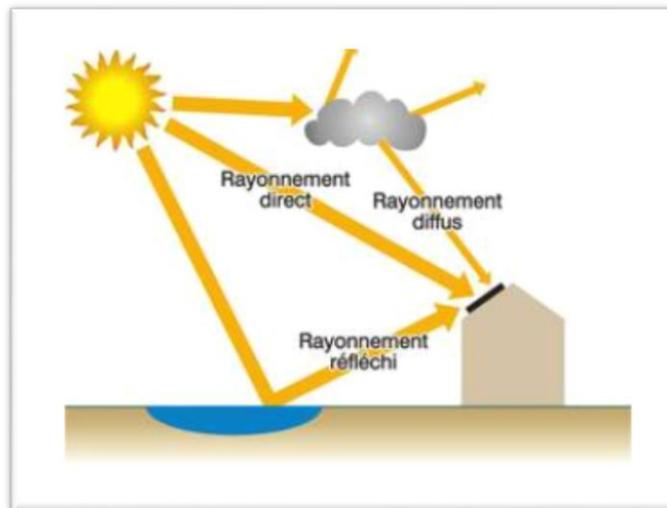


Figure (I.5) : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [8].

I.2.2 Le rayonnement direct

C'est la partie reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par **un pyrhéliomètre** [8].

I.2.3 Le rayonnement diffus

La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau incident en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Il est constitué par la lumière diffusée par les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières (aérosols). Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [8].

Il peut être mesuré par un pyranomètre avec un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct.

I.2.4 Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (Eau, neige, etc.) [8]. Il peut être mesuré par **un Albedomètre**.

I.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus disponible et la plus importante. Cependant, l'énergie solaire reçue par la Terre représente par an près de 15 000 fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle [9].

On distingue deux moyens principaux de convertir l'énergie solaire:

- Conversion en électricité : énergie solaire photovoltaïque.
- Conversion en chaleur : énergie solaire thermique.

I.3.1 Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée sous forme de chaleur à partir de la lumière du soleil.

Elle peut être utilisée de façon passive ou active. On parle de solaire thermique passif pour les installations permettant de chauffer directement un bâtiment par ses surfaces vitrées (effet de serre) et ou l'accumulation de chaleur sur des murs exposés au rayonnement solaire. Le solaire thermique actif consiste à récupérer la chaleur du soleil dans des panneaux solaires ou capteurs solaires thermiques dans lesquels circule un fluide caloporteur¹.

I.3.2 Energie solaire photovoltaïque

Elle désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des cellules solaires photovoltaïques. Le principe de conversion des photons en électrons repose sur l'effet photovoltaïque dans une jonction semi-conducteur.

L'énergie solaire photovoltaïque est également appelée énergie photovoltaïque.

Une discussion plus détaillée sur l'énergie solaire photovoltaïque est présentée dans le chapitre II.

I.4 Calcul de l'énergie solaire

La connaissance de la position du soleil et les heures du jour, permettent de connaître l'énergie rayonnée par le soleil. Le calcul de la position du soleil se fait en fonction de la latitude, altitude du lieu donnée et du temps ainsi que le trajectoire (ou course) du soleil le long d'un jour donné. En connaissant le positionnement du soleil sur une journée, on peut calculer les différentes irradiances provenant du soleil et par la suite les énergies.

I.4.1 Position du soleil

La position du soleil sur la sphère céleste est donnée par l'angle d'altitude h et l'angle d'azimut a . Elle dépend de la date, la période du jour, et de la position géographique de l'observateur ou bien la latitude φ [10].

¹ Un fluide chargé de transporter la chaleur entre plusieurs sources de température.

La date, en nombre de jours N , détermine l'angle solaire de déclinaison δ de la terre, qui est au point O en radian. Elle est exprimée par l'équation suivante :

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (N + 284)\right) \dots\dots\dots (I.1)$$

Le temps de la journée, en heures, est le reflet d'un angle nommé angle horaire du soleil ω en degré équivalant à l'heure, se mesure à partir de midi solaire. Il est positif avant midi et négatif l'après-midi. Il est donné par l'équation suivante :

$$\omega = 15(12 - TSV) \dots\dots\dots (I.2)$$

L'altitude h et l'azimut a à un certain temps et date, à longitude Λ et à latitude φ , sont calculés à partir des équations (1.3) et (1.4) [11] :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \dots\dots\dots (I.3)$$

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \dots\dots\dots (I.4)$$

On note que l'azimut solaire a est négatif le matin et positif l'après-midi. Pour des positions sur l'hémisphère nordique, l'angle d'altitude h est positif entre le lever et le coucher du soleil ; tandis que sur l'hémisphère méridional, il est négatif.

L'angle de déclinaison δ est défini positif pendant l'été sur l'hémisphère nordique. L'angle de latitude géographique φ est positif sur l'hémisphère nord et négatif sur l'hémisphère sud figure(I.7)[11.12].

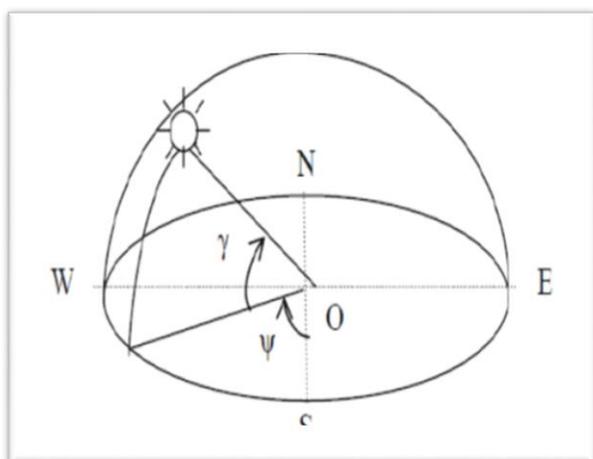


Figure (I.6) : La position du soleil observée d'après l'origine O [6].

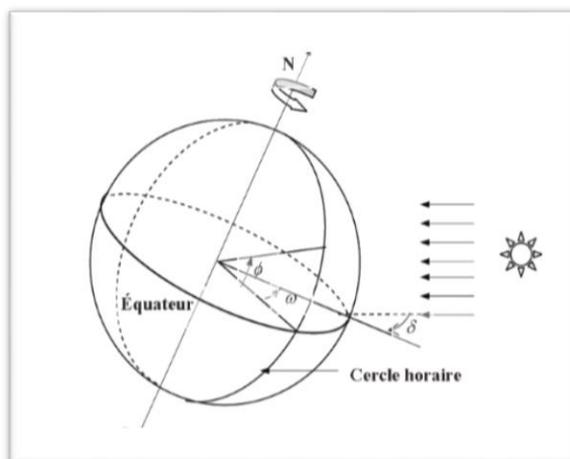


Figure (I.7) : L'angle horaire et l'angle de la déclinaison [9].

I.4.2 L'Irradiance solaire

L'irradiation solaire est la magnitude qui mesure l'énergie par unité de surface du rayonnement solaire incident sur une surface placée dans un lieu et une plage de temps bien spécifiés.

C'est-à-dire que tout le rayonnement solaire généré par le Soleil n'atteint pas la Terre. La magnitude qui décrit le rayonnement solaire qui atteint la Terre est l'irradiance. L'éclairement énergétique est exprimé en unités de puissance par surface, généralement en watts par mètre carré. Lorsque nous parlons d'irradiation solaire, nous entendons la quantité d'irradiance reçue dans un temps donné.

L'éclairement énergétique étant mesuré en watts par mètre carré, l'irradiation solaire est généralement mesurée en wattheures par mètre carré.

L'irradiation solaire à la surface de la Terre est, d'un point de vue technique, l'addition dans un intervalle de temps donné du rayonnement solaire filtré par l'interposition de l'atmosphère. La valeur de l'irradiation solaire en surface dépend de la période de l'année, de la latitude, de la météo locale et des heures de la journée. [13]

1.4.3 Description des différentes irradiances

1.4.3.1 Irradiance sur un plan toujours orienté vers le soleil

L'irradiance du rayonnement solaire extra-atmosphérique sur une surface perpendiculaire au rayon est désignée par la variable S_{p0} ($S_{p0} = 1367 \text{ W m}^{-2}$), tandis que l'irradiance solaire directe sur une surface terrestre perpendiculaire au rayon est désignée par la variable S_{pb} , l'irradiance diffuse est désignée par la variable S_{pd} . Ces deux trois grandeurs se mesurent en W.m^{-2} . Elles sont liées par une relation dans laquelle on introduit la transmittance atmosphérique τ , un nombre sans dimension dont la valeur pour un ciel bleu est comprise, selon Campbell, entre 0.65 et 0.75. On prend $\tau=0.7$.

$$S_{pb} = S_{p0}\tau^m \dots\dots\dots (1.5)$$

$$S_{pd} = 0.3(1 - \tau^m) * S_{p0}\cos(\Psi)\left(\frac{1+\cos(\Psi)}{2}\right) \dots\dots\dots (1.6)$$

Avec :

- m : masse optique d'air $m = \frac{e \cdot \text{altitude}}{8200 \cdot \cos(\psi)}$
- Ψ : est l'angle zénithal

$$\cos(\Psi) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \dots\dots\dots (1.7)$$

1.4.3.2 Irradiance sur un plan horizontal

- L'irradiance directe (beam irradiance) sur une surface horizontale est désignée par la variable S_b .
- l'irradiance diffusée sur une surface horizontale par la variable S_d .
- l'irradiance totale sur une surface horizontale par la variable S_t .

$$S_b = S_{pb} \cos(\psi) = \tau^m S_{p0} \cos(\psi) \dots\dots\dots (I.8)$$

$$S_d = 0.3(1 - \tau^m) S_{p0} \cos(\psi) \dots\dots\dots (I.9)$$

$$S_t = S_b + S_d = (0.3 + 0.7\tau^m) S_{p0} \cos(\psi) \dots\dots\dots (I.10)$$

I.4.4 Calcul des énergies

La formule suivante donne la longueur du jour pour toute latitude et position du soleil.

$$DJ = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan\phi \tan\delta) \dots\dots\dots (I.11)$$

On peut ainsi intégrer l'irradiance sur une période de temps, par exemple la journée. Cela permet de suivre l'évolution de l'énergie reçue tout au long de l'année. Selon les disciplines ou les habitudes, l'énergie s'exprime en Joule (le plus souvent MJ) ou en kWh. N.B. : 1 kWh = 3.6 MJ, les énergies irradiées par mètre carré sont des intégrales temporelles des irradiances.

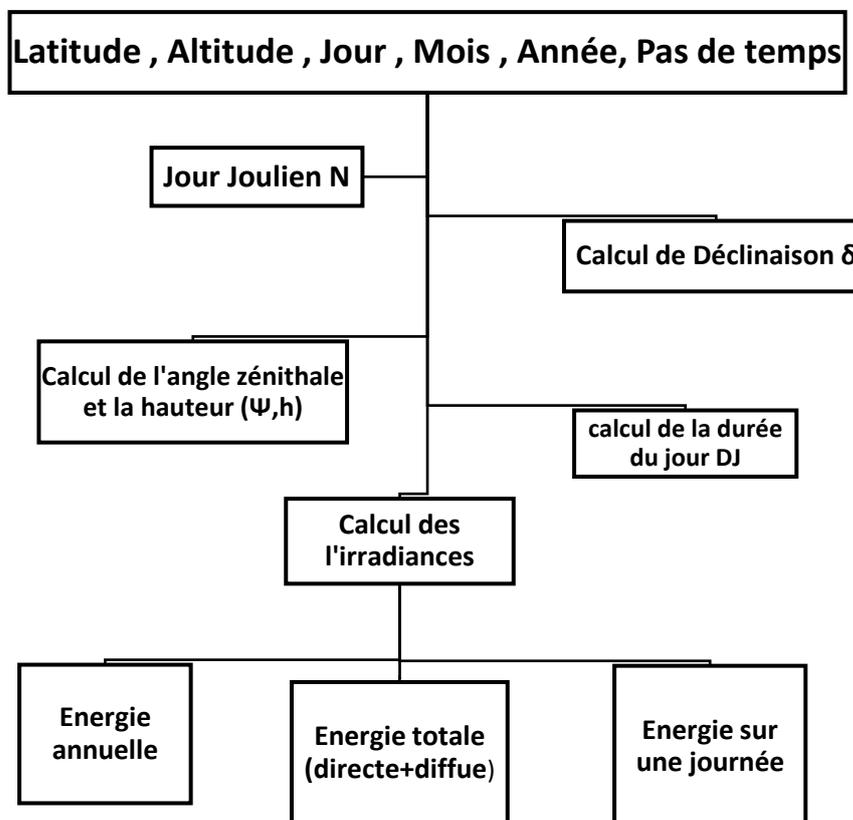
$$J_i = \int S_i dt \dots\dots\dots (I.12)$$

i : indice d'énergie

Le but de ces calculs est d'avoir une première idée des répartitions spatiales et temporelles des énergies provenant de l'irradiance solaire.

I.4.5 Programme de calcul des énergies

Voici un organigramme qui montre comment se fait le calcul des énergies suivant les étapes précédentes :



Le calcul des énergies se déroule comme suit :

- Premièrement, on identifie le jour et le mois de l'année suivi par la valeur de la latitude (en degré) et l'altitude (en mètre) du lieu donné ainsi on fixe un pas de temps en fonction de l'angle horaire (**L'équation I.2**).
- On obtient donc le nombre du jour julien qu'on va l'injecter dans (**L'équation I.1**) pour obtenir la valeur de la déclinaison (en degré).
- La durée du jour (en heure) donnée est calculée en fonction de la latitude et de la déclinaison (**L'équation I.11**).
- Le calcul de l'angle de la hauteur solaire se fait par (**L'équation I.3**) suivant un pas de temps le long du jour permis de déduire l'angle zénithale (**L'équation I.7**) car les deux angles sont complémentaires entre eux.
- Sachant les valeurs des angles zénithales le long du jour ainsi que l'altitude du même lieu on peut calculer les irradiances du jour demandé (en W/m^2) par les équations (**I.5**), (**I.6**), (**I.8**), (**I.9**), (**I.10**).
- A la fin l'énergie sera la somme des intégrales temporelles de ces irradiances sur la durée du même jour identifié (en Wh/m^2) (**L'équation I.12**).

I.5 Conclusion

Dans cette première partie du rapport, nous avons présenté les équations nécessaires pour calculer la position du soleil (course solaire) afin d'obtenir l'angle d'incidence des rayons sur la surface des modules PV, à chaque instant

Un programme de poursuite solaire en tout moment, et les différents paramètres de calcul des énergies sur une journée ou sur une année a été développé en langage C.

Le code de calcul et les résultats obtenus pour le site ES-Senia sont exposés dans l'annexe (voir annexe 1).

Chapitre II

La cellule photovoltaïque

Introduction

La conversion de la lumière en électricité, appelé effet photovoltaïque, a été découverte en 1839 par un physicien français, Antoine César Becquerel. En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts, mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation [14].

Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Les recherches d'après-guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. Grâce à ces cellules, on entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites.

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point. Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres.

En 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware. Ainsi au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie. En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001. Bien que le prix se soit peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année ne cesse d'augmenter.

II.1 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau [15]. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière.

Le terme « Volt » vient du patronyme d’Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l’électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c’est pour cette explication qu’il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921) [16].

II.2 La cellule photovoltaïque

La figure (II.1) montre la cellule photovoltaïque. Elle permet de transformer l’énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [10,17]:

- Absorption des photons (dont l’énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l’énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.



Figure (II.1) : Les cellules photovoltaïques [17].

II.3 Principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l’élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s’agit d’un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l’énergie lumineuse fournie par une source d’énergie tel que le soleil.

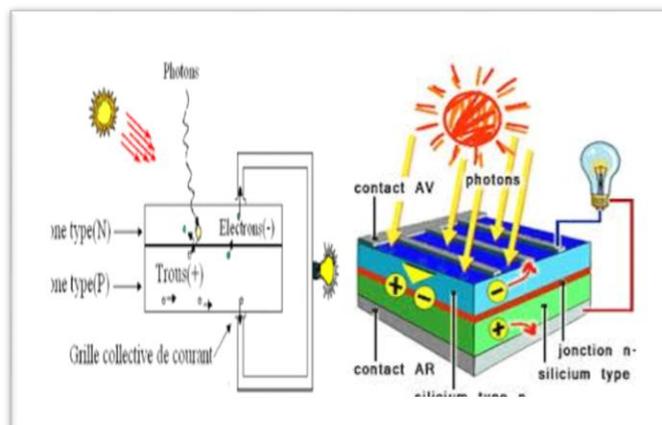


Figure (II.2) : Présentation schématique le principe d’une cellule solaire [17].

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 (dite p-n) a été formée.

En ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, une diode est ainsi obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite² communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence³ dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone *n* rejoignent les trous de la zone *p* via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel Figure (II.2) [18].

II.4 Types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres.

Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellule :

II.4.1 Les cellules monocristallines

Les cellules monocristallines se distinguent à leurs coins cassés et à leur aspect uniforme. Elle se caractérise par [14]:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère ;
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur ;
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire.

² Bande interdite : Une bande qui ne comporte aucun niveau d'énergie qui puisse être occupé par l'électron

³ Bande de valence : Une bande partiellement ou totalement occupée par un électron à $T = 0^\circ\text{K}$



Figure (II.3) : Cellule monocristallines.

II.4.2 Les cellules polycristallines

Les cellules polycristallines ont quant à elles un aspect plus irisé provenant de l'orientation des différents réseaux cristallins par rapport au plan de coupe. Elle se caractérise par [14] :

- Coût de production moins élevé ;
- Procédé moins gourmand en énergie ;
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

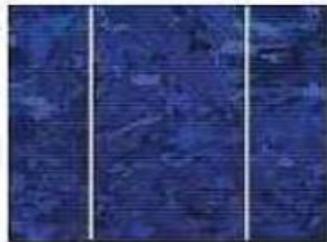


Figure (II.4) : Cellule poly cristalline.

II.4.3 Les cellules amorphes

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (thin film). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD

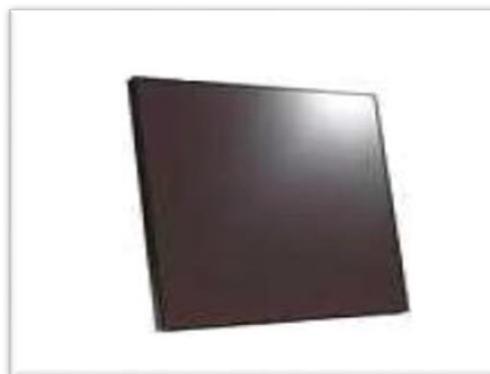


Figure (II.5) : Cellule amorphes.

(Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres.

Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales (en raison de leur poids par watt crête plus faible) et aux technologies de concentration.

Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. Ces technologies sont caractérisées par des efficacités de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique allant de 6% (αSi_4) à 5 à 11% (CdTe₅) (efficacité des cellules, les modules présentant une efficacité un peu moindre due aux espaces entre les cellules) [18].

II.5 Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire

La description physique de la cellule photovoltaïque discutée précédemment montre que la jonction servant de base à la photopile est une diode.

La puissance électrique délivrée par la cellule est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes (batterie, moteur électrique, système d'éclairage, ...).

La variation du courant « I » en fonction de la tension « V » à l'obscurité et en particulier sous éclairement, permet d'évaluer la performance de la cellule solaire ; la figure (II.6) montre deux exemples de caractéristiques $I - V$ de cellule solaire sans et avec éclairement.

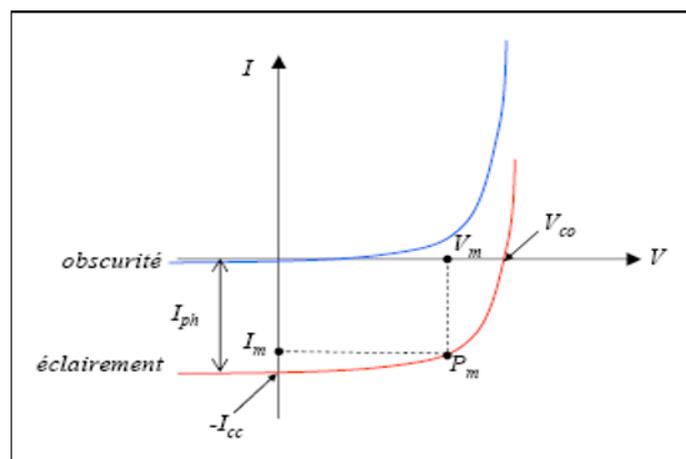


Figure (II.6) : Caractéristique I-V d'une cellule solaire; à l'obscurité et sous éclairement.

⁴ αSi : Cellules au silicium amorphes.

⁵ CdTe : Cadmium Telluride.

II.5.1 Circuit électrique équivalent

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, la caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivante [19] :

$$I_{obs} = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (II.1)$$

Où :

- I_s : le courant de saturation en Ampère (A).
- n : le facteur de qualité de la diode; sans dimension.
- V_{th} : Le potentiel thermique en Volt (V) ;

Il est donné par :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \dots\dots\dots (II.2)$$

- K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \cdot 10^{-23}$ J/K = $8.61400 \cdot 10^{-5}$ eV/K).
- T : la température absolue en Kelvin (K).
- q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \cdot 10^{-19}$ C).

Sous éclairement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{nV_{th}}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (II.3)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords doivent être pris en considération

II.5.2 Caractéristiques d'une cellule solaire

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extrait de caractéristique courant-tension :

II.5.2.1 Tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = nV_{th} \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}\right) \dots\dots\dots (II.5)$$

II.5.2.2 Courant de court-circuit I_{cc}

En court-circuit, la tension V est nulle (V=0), d'où

$$I_{cc} = I_{ph} \dots\dots\dots (II.6)$$

II.5.2.3 Point du fonctionnement P_m (V_m)

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m \dots\dots\dots (II.7)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_m (V_m, I_m) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension **V_m** et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement [20]

II.5.2.4 Facteur de forme FF

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_m** et la puissance formée par le rectangle **I_{cc}*V_{co}** (voir la figure II.6). Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également.

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \dots\dots\dots (II.8)$$

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

II.5.2.5 Rendement η

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale **P_m** produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule. Si **S** est la surface de la cellule (en m²) et **P_{inc}** est l'éclairement-irradiante (en W/m²). Le rendement énergétique s'écrit : [19]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}S} \dots\dots\dots (II.9)$$

P_{inc} : Puissance incidente

S : surface de la cellule photovoltaïque

Ou d'après :

$$P_m = FF \times I_{cc} \times V_{co} \dots\dots\dots (II.10)$$

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{inc} S} \dots\dots\dots (II.11)$$

II.6 Générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV). Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [21].

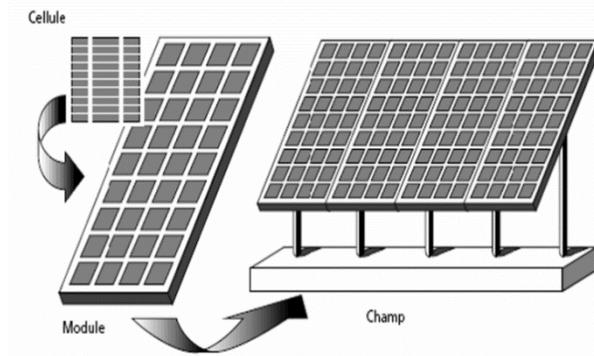


Figure (II.7) : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.

II.6.1 Association des cellules photovoltaïques

Les cellules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation.

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

- L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [22].

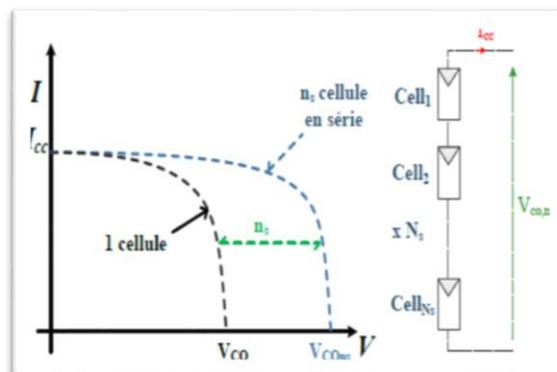


Figure (II.8) : caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série.

- En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

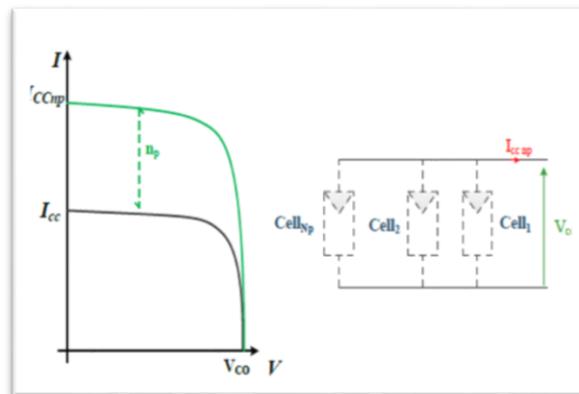


Figure (II.9) : caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle.

II.6.2 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque ;

La figure (II.10) représente trois zones essentielles :

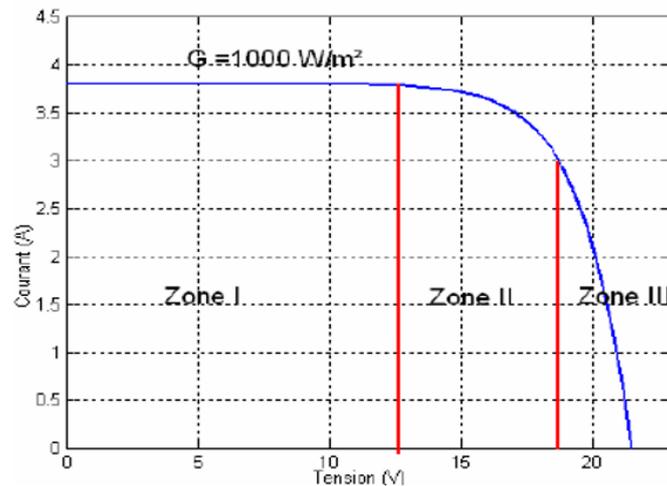


Figure (II.10) : Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$, $T=25^\circ\text{C}$, $E=1000\text{W/m}^2$

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension [23].

II.6.3 La puissance maximale du générateur photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque sous un ensoleillement constant et uniforme a une caractéristique courant-tension de telle sorte que pour chaque ensoleillement il n'y a qu'un seul point de fonctionnement qu'on l'appelle le point de puissance maximale (MPP : Maximum Power Point). Pour ce dernier, le panneau fonctionne au rendement maximal et produit sa puissance maximale. Quand on lie une charge directement à un panneau photovoltaïque, ce point de fonctionnement n'est pas forcément le MPP, mais il sera l'intersection de la caractéristique courant-tension avec la ligne de charge. Cette situation est représentée sur la figure (II.11).

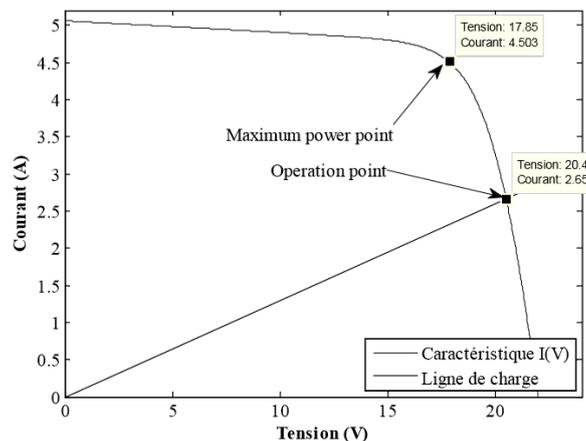


Figure (II.11) : Intersection de la caractéristique courant-tension avec la ligne de charge.

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge reliée à ses bornes. À cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur (hacheur ou onduleur). Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau photovoltaïque à sa puissance maximale.

La méthode de suivi de la puissance maximale connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque. Contrairement au contrôle à tension fixe, le MPPT n'est pas basé sur une valeur de référence prédéterminée mais il s'agit d'une recherche de la valeur de référence pour atteindre le maximum de la puissance sur la caractéristique courant-tension. À noter que le MPPT joue un rôle très important parce qu'il maximise le rendement et il réduit au minimum le coût.

II.7 Influence de la météorologie sur les cellules photovoltaïques

Les conditions ou bien les paramètres météorologiques ont un immense impact sur le fonctionnement et les performances des systèmes PV autrement dit elles influent sur le rendement de ces systèmes et peuvent même les endommager.

II.7.1 Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques car les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température. La figure (II.12) présente une courbe de l'effet de la température sur la caractéristique I(V).

Pour voir l'effet de la température une simulation a été faite avec un éclairage constant soit $E=1000\text{W/m}^2$ pour plusieurs valeurs de températures (0°C , 25°C , 50°C , 75°C et 100°C). D'après la courbe l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale figure (II.13).

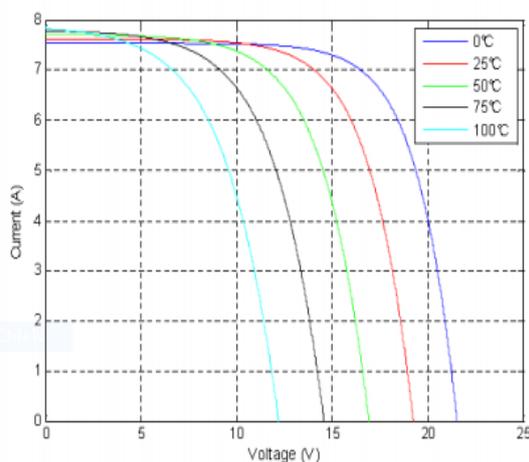


Figure (II.12) : Effet de la température sur la caractéristique I(V) [25].

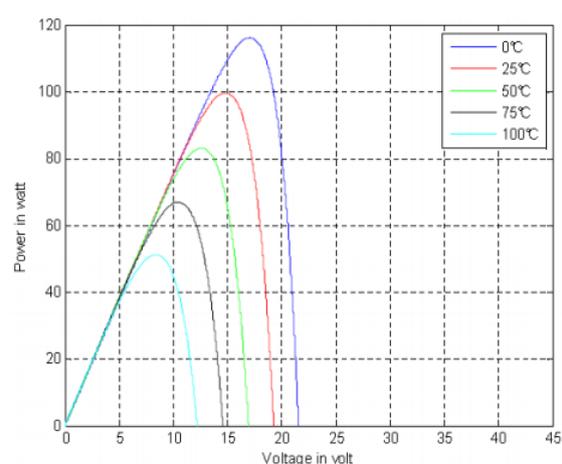


Figure (II.13) : Effet de la température sur la caractéristique P(V) [25].

II.7.2 Influence de l'éclairement

La figure (II.14) présente une courbe de l'effet de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$, Pour une température constante (25°C) pour différents éclairements, l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement.

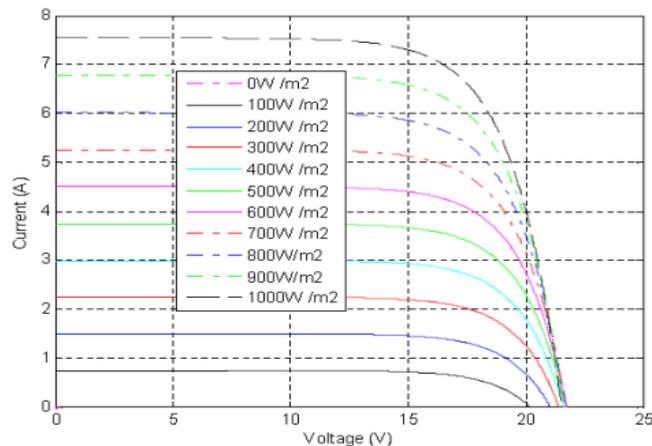


Figure (II.14) : Effet d'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ [25].

II.7.3 Couverture nuageuse

Les nuages impactent les panneaux photovoltaïques. En effet, la quantité d'énergie que peuvent produire les panneaux photovoltaïques est directe et dépend en grande partie du niveau de lumière qu'ils reçoivent. Tout au long des heures d'ensoleillement, les panneaux photovoltaïques produisent à leur capacité optimale. S'il y a assez de lumière pour projeter une ombre, malgré les nuages, les panneaux solaires doivent fonctionner à environ la moitié de leur pleine capacité. Même si la présence de nuage a un impact sur la production d'énergie des panneaux solaires, il est tout à fait possible que ceux-ci puissent produire en temps nuageux. En effet, si le soleil se déplace entre les nuages, les panneaux solaires pourront capter pleinement la lumière du soleil réfléchi par les nuages. Cependant, avec une couverture nuageuse lourde, la production d'énergie des panneaux solaires est réduite.

II.7.4 Le sable et la poussière

Il est évident que l'accumulation du sable ou de la poussière sur les panneaux solaires à cause des tempêtes, des chasses sables peut être néfaste. En effet les poussières et le sable qui s'accumulent, causes de baisses de rendement de 20 % à 30 % ce qui peut réduire significativement l'efficacité de ces dernières. Cependant, dans ces cas-là, asperger de l'eau avec un tuyau d'arrosage c'est la meilleure solution.

II.7.5 Précipitations (La pluie, la neige et la grêle)

Les fabricants de panneaux solaires savent bien que ces derniers ne resteront pas parfaitement secs toute l'année. C'est pour cette raison que les composants électriques des panneaux sont protégés contre l'humidité : en cas d'averse, l'eau glisse tout simplement dessus sans causer de dommages. Un peu de bruine peut même se montrer bénéfique, car elle nettoie les panneaux de la poussière et de la saleté.

Les chutes de neige sont en revanche moins souhaitables, car la neige recouvrant l'installation et prive les panneaux de la lumière. Cependant, il ne s'agit généralement pas d'une situation permanente, ce qui ne devrait pas faire une grande différence en terme de production.

En ce qui concerne la grêle, elle peut en effet causer nombre de dégâts. Mais, les panneaux sont assez solides pour résister aux chocs.

II.7.6 Le vent et la foudre

Les panneaux ont une espèce d'une surface patinée qui les protègent du vent, et s'ils ont été bien installés suivant les normes ils seront fixés solidement afin qu'ils puissent résister à des vents violents.

Pour les effets de la foudre. Pas de crainte si les panneaux sont bien reliés au sol. Il y a même des panneaux qui sont équipés du système classique de protection contre la foudre (Paratonnerre).

Dans l'ensemble, on peut dire que les conditions météorologiques ne représentent pas un grand risque pour les panneaux solaires. Seule une catastrophe naturelle pourrait les endommager.

II.8 Installation des panneaux photovoltaïques

Pour optimiser au mieux la production d'énergie photovoltaïque solaire. Il est très important de ne pas sous-estimer l'importance de l'inclinaison et de l'orientation du panneau solaire.

L'inclinaison des panneaux est importante pour optimiser l'irradiation du rayonnement direct et diffus reçue par les capteurs.

Plus la surface du panneau solaire est perpendiculaire aux rayons incidents du soleil, meilleur est le rendement.

La position d'un panneau est en fait :

- Son orientation, ou azimut, c'est-à-dire l'angle qu'il fera avec l'axe nord-sud dans le plan horizontal.
- Son inclinaison, c'est-à-dire l'angle qu'il fera avec le plan horizontal.

II.9 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de la conversion photovoltaïque, les caractéristiques électriques fondamentale et le schéma électrique équivalent d'une cellule et d'un module photovoltaïque, afin de mieux comprendre leur fonctionnement et leurs performances

La modélisation des cellules PV nous permet de faire la comparaison entre les caractéristique fournis par le constructeur et obtenues dans les laboratoires aux mesures I-V effectuer dans des autres environnements plus réalistes dans le but de déterminer la pertinence du modèle et leurs précisions.

Chapitre III

Modélisation d'un Système Photovoltaïque.

Introduction

Dans ce chapitre, on va étudier la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur GPV (composé de 36 cellules connectées en deux branche en série)

Puis, en va parler sur les conditions de test standards et normales et leurs caractérisations en laboratoire et en extérieur suivi par les mesures et les procédures pour obtenir ces caractéristiques.

III.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un modèle 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.

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

Parmi ces modèles proposés pour la caractérisation des modules PV et pour l'estimation de l'énergie électrique photovoltaïque produite est celui basé sur le schéma électrique d'une diode à cinq paramètres représenté comme suite :

La photopile présentée par la figure ci-dessous (Fig. III.1) comporte en réalité une résistance série (**R_s**) et une résistance Shunt (**R_{sh}**).

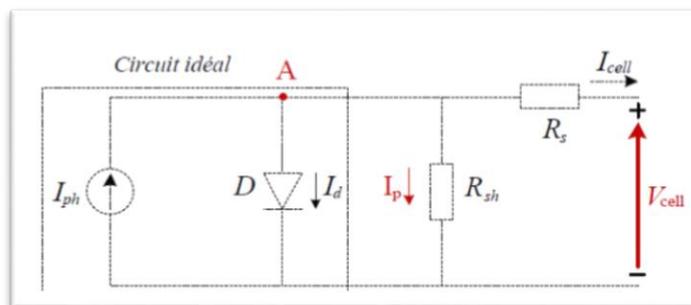


Figure (III.1) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V :

- **La résistance série** : elle représente 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** : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes par la diode et les câbles de liaisons.

Ce modèle dit à cinq paramètres fait intervenir le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}) pour la caractérisation électrique de la cellule PV.

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant infini, on retrouve un modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à trois paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude.

Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision et Les caractéristiques I-V de la cellule et celle du module PV seront décrites par les expressions des différents courants du schéma électrique.

III.1.1 Le courant de la cellule

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge.

En application le théorème de Kirchhoff dans le circuit ci-dessus (fig III.1), on obtient :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \quad \dots\dots\dots (III.1)$$

Avec :

- I_{cell} : Courant délivré par la photopile.
- I_{ph} : Photo courant.
- I_d : Courant de la diode.
- I_{Rsh} : Courant shunt.

Si la résistance de shunt (R_{sh}) est plus élevée, on peut donc négliger le courant I_{Rsh} d'où l'équation (III.1) devienne :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \quad \dots\dots\dots (III.2)$$

III.1.2 Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{cc} + Ki(T - T_{ref})] * \frac{E}{E_{ref}} \quad \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec :

- I_{cc} : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).
- Ki : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.
- T : Température ambiante.
- E : Irradiation sur la surface de la cellule.
- T_{ref} : Température de référence (298 K).
- E_{ref} : Irradiation de référence (1000 W/m²).

III.1.3 Le courant de saturation I_0

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{Rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \dots\dots\dots (III.4)$$

Avec :

- E_g [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

III.1.4 Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{Rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{qV_{oc}}{KAT}\right) - 1} \dots\dots\dots (III.5)$$

Où :

- V_{oc} : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).
- q : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °c).
- A : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).
- K : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut en déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \dots\dots\dots (III.6)$$

III.1.5 Le courant du panneau

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elles sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau. En tenant compte du nombre et la disposition des cellules utilisées, l'équation spécifique à un module sera :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s} \right)}{AKT} \right) - 1 \right] - \frac{N_p (V_{cell} + R_s I_{cell})}{R_{sh}} \dots\dots\dots (III.7)$$

Où,

- N_s : Nombre de cellules connectées en série dans un module.
- N_p : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

III.1.6 La puissance fournie par un module PV

La structure d'un module PV (cellule) peut être simplifiée par le schéma bloc ci-dessous (Figure III.2) avec deux variables d'entrée et deux variables de sortie :

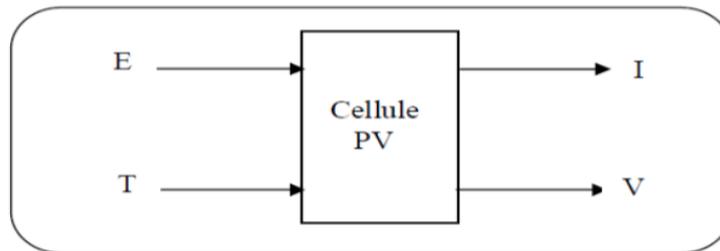


Figure (III.2) : schéma bloc d'une cellule PV

- **E** : Eclairage dans le plan de la cellule (W/m^2).
- **T** : Température de la cellule ($^{\circ}C$).
- **I** : Intensité de courant fournie par la cellule (A).
- **V** : Tension électrique aux bornes de la cellule.

La manière la plus simple pour calculer le productible d'une installation sur une année, une fois l'inclinaison et l'orientation sont choisis, est par le calcul de l'énergie fournie par l'éclairage incident dans le plan des modules tout en utilisant les données du constructeur.

Avec cette méthode, le rendement est constant et fixé à celui mesurées dans les conditions STC.

C'est aussi une manière simple pour déterminer la variation de rendement ($\Delta\eta = \eta_{\text{mesuré}} - \eta_{\text{STC}}$) en fonction de l'éclairage directement à partir des mesures en extérieur :

$$E_{\text{an}} = \eta_l * L * E_{h,m} \dots\dots\dots(III.8)$$

Où E_{an} est l'énergie produite à l'année (kWh), L ($0 \leq L \leq 1$) représente les différentes pertes (ombrages, salissures, effet d'incidences...), η est le rendement STC des modules PV et $E_{h,m}$ est la moyenne annuelle de l'irradiation globale quotidienne sur la surface des modules PV (kWh).

III.1.6.1 Premier approche

Le modèle d'essai élaboré et validé expérimentalement par Lu Lin en 2004 [4, 5] et présenté ci-dessous par l'équation permet le calcul de la puissance maximale fournie par le module, en utilisant la température et l'éclairage solaire incident.

$$P_m = -(a * G + b)T_c + c * G + d \dots\dots\dots(III.9)$$

P_m : Puissance maximale produite (W);

a, b, c et **d** sont des constantes positives qui peuvent être connues expérimentalement ;

T cell : Température de la cellule.

III.1.6.2 Deuxième approche

La puissance produite du générateur photovoltaïque peut être calculée à partir de l'équation suivante [8]:

$$P = \eta * S * N * G \dots\dots\dots (III.10)$$

S : Surface du module photovoltaïque ; **G** : Eclairage solaire sur plan incliné (W/m2); **N** : Nombre de modules constituant le champ photovoltaïque.

Le rendement instantané est représenté par la relation suivante [7, 8]:

$$\eta = \eta_r(1 - \gamma(T_c - T_0)) \dots\dots\dots (III.11)$$

η : Rendement de référence du module sous les conditions standards. (T = 25 °C, E = 1000 W/m² et AM1.5)

γ : Coefficient de température (°C) déterminé expérimentalement, il est défini comme étant la variation du rendement du module pour une variation de 1 °C de la température de la cellule. Les valeurs typiques de ce coefficient se situent entre 0.004 et 0.006 °C.

L'intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur dans les conditions standard (la puissance totale **P**, la tension en circuit ouvert **V_{co}**, le courant de court-circuit **I_{cc}** et la surface du panneau).

III.1.6.3 Troisième approche

Le modèle mathématique a été développé par Borowy et Salameh en 1996. Ce modèle est basé sur le circuit équivalent à une diode Figure (III.1).

Ce modèle fait usage des spécifications des modules photovoltaïques données par les fabricants. Donc il offre une façon très simple de connaître la puissance produite par les modules photovoltaïques [9, 10].

$$I_m = I_{cc} \cdot \{1 - [C_1 \exp(\frac{V_m}{C_2 \cdot V_{co}}) - 1]\} + \Delta I \dots\dots\dots (III.12)$$

Avec :

C₁, C₂ sont des paramètres qui peuvent se calculer par les relations suivantes

$$C_1 = (1 - \frac{I_{mp}}{I_{cc}}) * \exp(-\frac{V_{mp}}{C_2 \cdot V_{co}}) \dots\dots\dots (III.13)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mp}-1}{V_{co}}}{\ln(1-\frac{I_{mp}}{I_{cc}})} \dots\dots\dots (III.14)$$

ΔI Est un paramètre qui dépend de la différence de température et de l'éclairage solaire. Il est défini par l'expression suivante.

$$\Delta I = \alpha_0 \left(\frac{G}{G_0} \right) \cdot \Delta T + \left(\frac{G}{G_0} - 1 \right) \cdot I_{cc} \dots\dots\dots (III.15)$$

Avec :

$$\Delta I = \alpha$$

$$\Delta T = T_c - T_0$$

La tension V_m du module est déterminée par l'équation suivante :

La résistance série R_s est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

$$V_m = V_{mp} \left[1 + 0,0539 * \log \left(\frac{G}{G_0} \right) \right] + \beta_0 \cdot \Delta T - R_s \cdot \Delta I \dots\dots\dots (III.16)$$

La puissance optimale à la sortie d'un module est déterminée par :

$$P_m = I_m \times V_m \dots\dots\dots (III.17)$$

III.1.7 Effet de la température de fonctionnement de la cellule

La température de fonctionnement d'un module PV a un fort impact sur sa tension et donc sur ses performances. Or, elle dépend de beaucoup de facteurs propres à la fabrication du module, du semi-conducteur utilisé, du site d'implantation et du montage du module sur ce site ce qui a pour conséquence des températures de fonctionnement différentes selon les modules pour des mêmes conditions d'installation.

Lorsque la cellule fonctionne, sa température augmente, ce qui aura un effet direct sur son rendement. La température agit plus particulièrement sur la tension V_{oc} décrite par l'équation :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_{cs}}{I_0} \right) \dots\dots\dots (III.18)$$

V_{oc} est donc de façon logarithmique, proportionnelle au courant de court-circuit et à l'inverse du courant de saturation I_0 . Or, le courant de saturation varie nettement avec la température.

III.2 Les différentes conditions de test

Pour faire la comparaison entre les modules PV de différents fabricants, une décision par convention a été faite pour choisir comme condition standard une irradiance de 1000 W/m² et une température de 25°C, ce qu'on appelle les STC (Standard Test Conditions).

Ces conditions-là sont des conditions de laboratoire, ce qui veut dire qu'il est quasiment impossible de les obtenir en réalité, pour cela une autre convention était faite, pour choisir une condition normale qui est la NOCT, une abréviation de l'anglicisme (Normal

Operating Cell Température), qui signifie en français : température nominale d'utilisation des cellules, cette dernière avait choisi comme conditions :

- Niveau d'éclairement : 800 W/m²
- T_{noct} = 45 °C
- Température extérieure : 20 °C
- Vitesse du vent : 1 m/s
- Air Masse : AM=1.5

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{ref}} + \frac{T_{\text{noct}} - 20}{800} * E \dots\dots\dots (III.19)$$

T_{cell} Correspond à la température qu'atteint une cellule encapsulée dans un module en court-circuit, soumis aux conditions décrites ci-dessus.

III.2.1 Les organismes de standardisation

Il existe plusieurs organismes, qui dépend des différents pays ou un groupe de pays, Chargés d'instaurer des normes pour le PV.

Il existe plusieurs organismes, parmi ces organismes on cite l'IEC, c'est une organisation mondiale de standardisation qui comprend tous les comités électrotechnique nationaux, qui a comme but produire et publier des standards internationaux, des spécifications techniques et des guides.

III.2.2 La caractérisation en laboratoire

L'avantage de cette caractérisation est que les mesures ne sont pas dépendantes des conditions extérieures, on peut atteindre une grande reproductibilité car les conditions STC peuvent être ajustées aux valeurs désirées de température et d'éclairement.

Les données du constructeur sont mesurées uniquement sous les conditions STC et même les techniques de mesures et les simulateurs solaires sont fabriqués pour fonctionner dans des conditions proches des conditions STC, cependant les simulateurs solaires se diffèrent en point de vue critères et ils ne sont pas des sources parfaites de lumières et leur qualité dépendra de la précision de la mesure.

Le problème face à cette caractérisation, est premièrement le cout financier élevé des sources lumineuses, et deuxièmement c'est que les simulateurs sont utilisés comme source continue de lumière, avec un écart de distribution d'éclairement ce qui cause le sur échauffement de quelques cellules du générateur par rapport aux autre.

III.2.3 La caractérisation en extérieur

Certains fabricants apposent sur chacun des modules, une étiquette indiquant les paramètres principaux effectivement mesurés dans les conditions STC et le comportement du générateur PV en utilisation réelle, les avantages cette caractérisation sont :

- La lumière incidente peut être, par temps clair et stable, extrêmement uniforme sur toute la surface du générateur PV quel que soit sa dimension.
- Elle permet de disposer de toutes les conditions de température et d'éclairement.
- C'est une solution qui coûte nettement moins cher qu'en intérieur car il n'y a pas besoin de sources lumineuses coûteuses.

Cette caractérisation présente quelques inconvénients qui sont :

- La variation continue des conditions météorologiques équivaut à dire que les conditions STC sont très rares.
- Tous les paramètres influant la réponse du générateur varient ensemble, il est donc difficile de décorrélérer l'effet de chacun.
- La difficulté de faire une comparaison entre les performances des différents générateurs car il est très difficile de trouver une caractérisation réelle (NOCT) proche à celle du laboratoire (STC).

III.3 Mesures et procédures pour l'obtention des caractéristiques I-V

Pour la grande majorité, les modules sont caractérisés sous un l'éclairement incident standard qu'il n'en est pas de même pour les méthodes de mesure de la caractéristique I-V. Cette partie aborde les exigences, les conseils et les normes liées à cette mesure, puis on va parler du principe de cette mesure.

III.3.1 Les normes

Les principales exigences concernant la mesure des caractéristiques I-V d'une cellule ou d'un module PV, que ce soit en intérieur ou en extérieur, sont énoncées dans la norme IEC60904-1 [24].

III.3.1.1 Les mesures sous lumière artificielle

Il est exigé, dans cette norme, d'avoir une instrumentation qui réponde aux conditions suivantes :

- Une cellule de référence semblable à la cellule testée pour calibrer le simulateur solaire.

- Des capteurs de température (pour la cellule de référence et la cellule testée).
- Un simulateur solaire de haute classe.
- Un capteur d'irradiation, pour vérifier l'intensité lumineuse instantanée fournie par le simulateur.
- Un spectroradiomètre qui permet de connaître le spectre de l'éclairement du simulateur.
- La surface active de la cellule testée doit être dans le même plan que la cellule de référence.

III.3.1.2 Les mesures sous lumière naturelle

Les caractérisations sous éclairage naturel doivent être faites seulement lorsque la lumière ne fluctue pas à plus de 1% au cours de la mesure et lorsque l'intensité lumineuse est d'au moins 800 W m^{-2} . Il est exigé, dans la norme IEC 60904-1 [24], d'avoir une instrumentation qui réponde aux conditions suivantes :

- Une cellule de référence calibrée ou un pyranomètre mesurant l'irradiance reçue.
- Des capteurs de température (pour la cellule de référence et la cellule testée).
- Un tracker deux-axes qui suit le soleil.
- Un spectroradiomètre qui permet de connaître le spectre solaire à tout moment.
- La surface active de la cellule testée doit être dans le même plan que la cellule de référence.

III.3.2 La mesure de la caractéristique I-V

Le principe de mesure de la caractéristique I-V est de faire varier la charge aux bornes du module, de zéro (court-circuit) à l'infini (circuit-ouvert). Il est possible de la faire varier dans le sens décroissant, soit de **Voc** à **Isc** ou bien dans le sens croissant, de **Isc** à **Voc**.

Certains instruments peuvent caractériser des semi-conducteurs en polarisation direct ou inverse, c'est à dire que l'instrument peut être soit source soit charge.

D'autres instruments ne fonctionnent que dans le 4ème quadrant. On parle alors de charge variable. De plus, des programmes sont souvent livrés avec l'instrument pour faciliter sa prise en main et rendent l'acquisition de données accessible très rapidement. Les principaux inconvénients de ces instruments sont le prix qui est souvent très élevé et les limites en courant, tension et puissance ce qui pose un problème pour la caractérisation de certains modules.

III.4 Conclusion

On a décrit dans ce troisième chapitre la notion de la modélisation par un schéma électrique équivalant d'une cellule et du générateur, et la puissance qui peut fournir dans les différentes caractérisations des conditions STC et NOCT, en tenant compte des exigences conseillées par les experts qui sont les normes et les procédures de caractérisations de la mesure.

Chapitre IV

Simulation d'un Système Photovoltaïque.

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons simuler les caractéristiques de la cellule puis un générateur photovoltaïque polycristallins par le schéma électrique équivalent basé sur une diode (voir chapitre 3) puis nous étudierons l'influence de la température sur les caractéristiques électriques par le calcul du rendement dans différentes conditions (STC et NOCT).

IV.1 Logiciel Matlab/Simulink : L'outil de simulation

Logiciel MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes) ;
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires ;
- Des bibliothèques de blocs Simulions spécialisés (Blocksets) ;
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur ;
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

Le SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communications et de traitement du signal.

Pour notre travail, nous avons exploité essentiellement la bibliothèque **SimScape** qui regroupe sous forme blocs les différents composants physique, électrique et électronique de simulation, à savoir :

- Fondtion Library .
- SinElectronics.
- SimPOwerSystems.
- Utilities.

IV.2 Simulation d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques électriques de cellule sont données dans le tableau suivant :

Eclairement standard	$E=1000 \text{ W/m}^2$
Température standard	$T=25^\circ\text{C}$
Facteur d'idéalité A	$A=1.6$
Energie de la bande interdite	$E_g \approx 1.1\text{eV}$
Courant de court-circuit I_{cc}	7.34 A
Tension a circuit ouvert V_{oc}	0.6V

Tableau (IV.1) : Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards STC ($T=25^\circ\text{C}$, $E=1000\text{W /m}^2$)

La figure suivant (IV.1) représente le schéma bloc du modèle, conçu pour la caractérisation d'une cellule PV dont les détails sont présentés dans le rapport des propriétés du modèle de Simulation en **annexe 3**

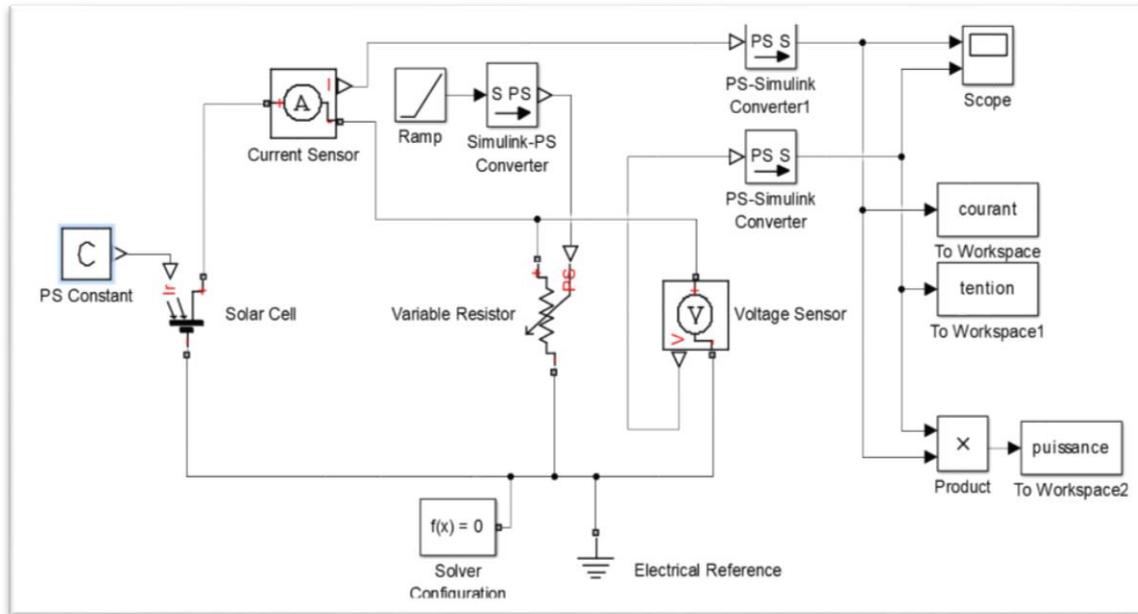


Figure (IV.1) : Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.

Les résultats de simulation, aux conditions STC, pour la caractéristique I-V et p P-V sont représentés dans les figures suivantes :

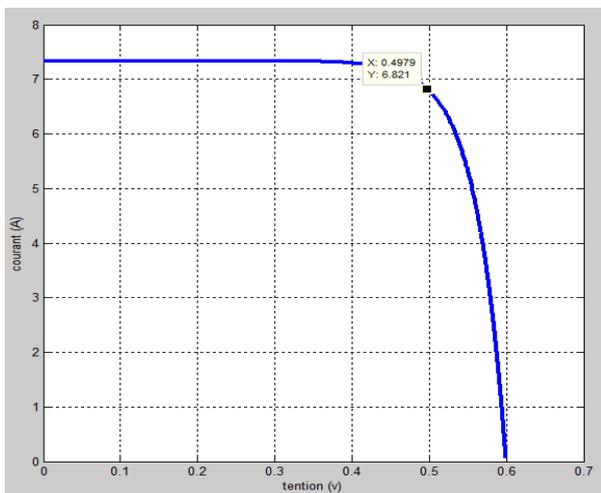


Figure (IV.2-a) : Caractéristique I-V d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$).

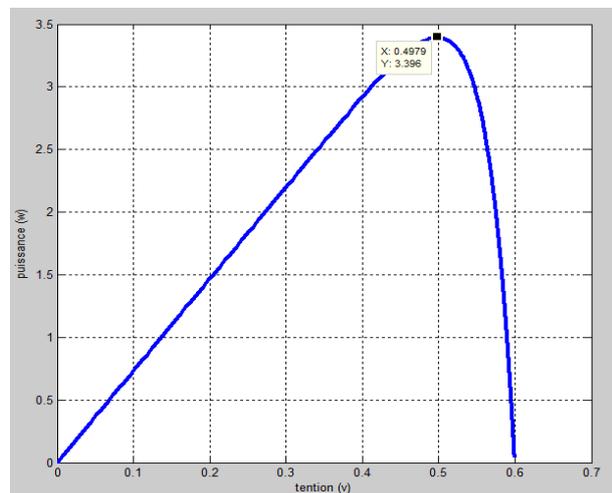


Figure (IV.2-b) : Caractéristique P-V d'une cellule ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$).

On remarque que la puissance augmente avec la tension jusqu'à atteindre la valeur maximale (P_m) puis elle décroît. La puissance maximale fournie par le modèle de la cellule simulé est de **3.396 Watts** pour une tension maximale de **0.4979 Volts** et d'un courant maximale généré de **6.8206 A** (sous STC).

IV.2.1 Influence de la température sur la cellule

Avec le même modèle, nous inspectons l'effet de la température sur l'énergie fournie par la cellule.

Les figures (IV.3-a), (IV.3-b) représentent les caractéristiques I-V et P-V dans la même condition de l'éclairement ($E=1000 \text{ W/m}^2$) mais pour différentes valeurs de température ($T=0^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}, 40^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}$)

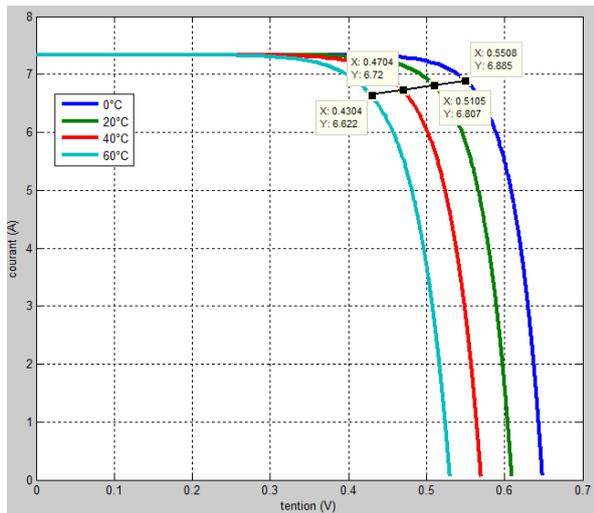


Figure (IV.3-a) : Caractéristique I-V pour différentes températures ($E=1000 \text{ W/m}^2$).

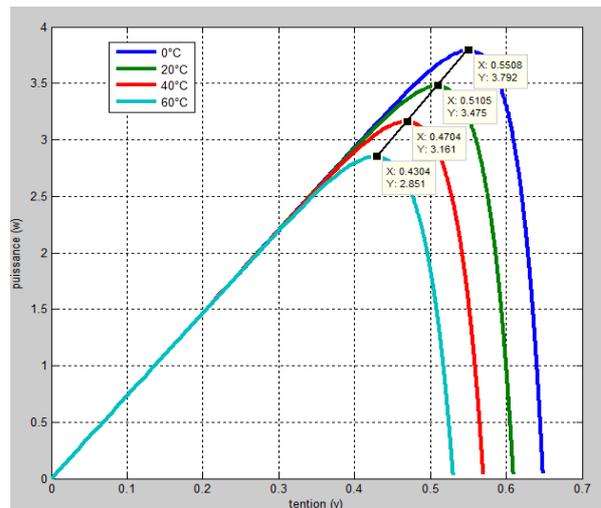


Figure (IV.3-b) : Caractéristique P-V pour différentes températures ($E=1000 \text{ W/m}^2$).

Sur la figure à gauche, on voit clairement que la tension de circuit ouvert V_{co} diminue avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement avec l'augmentation de la température alors que la puissance maximale (figure à droite) chute avec la variation de la température.

On constate alors que la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert.

IV.2.2 Influence de l'éclairement sur la cellule

De la même manière, nous simulons les caractéristiques de la cellule PV modélisée en fonction de la variation de l'éclairement $E=[400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2]$ et à une température constante ($T_{cell}=25^\circ\text{C}$).

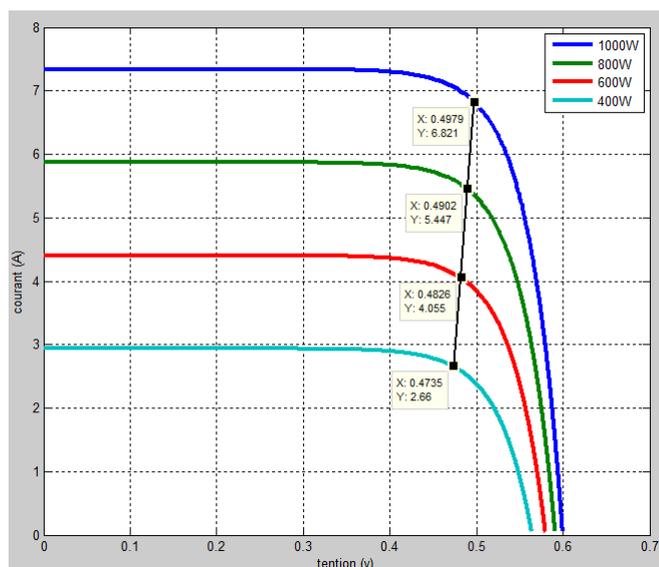


Figure (IV.4-a) : Caractéristique I-V pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

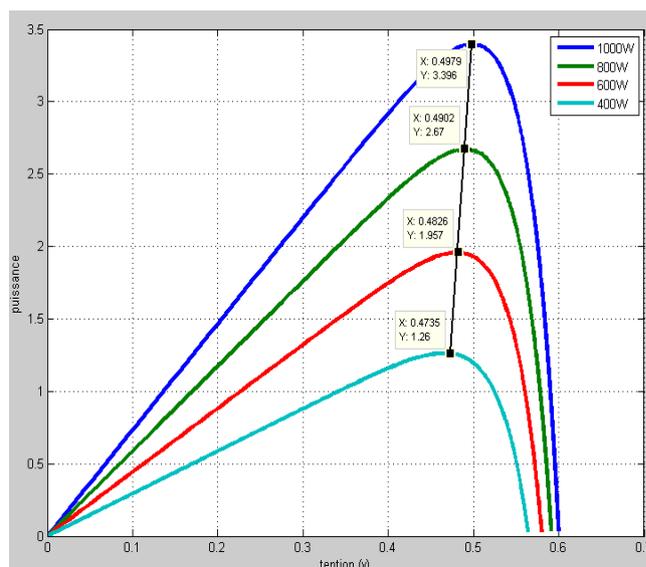


Figure (IV.4-b) : Caractéristique P-V pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

Comme il est illustré dans les graphes ci-dessus, il est toute à fait clair que la puissance fournie croît avec l'intensité du rayonnement incidents. L'intensité du courant délivré augmente mais la tension V_{co} est presque constance dans l'intervalle de l'éclairement [200 -1000 W/m²] et par conséquent, le rendement de la cellule ne change pas.

IV.3 Simulation d'un générateur PV sous MATLAB-SIMULINK

Nous avons pris un générateur composé de 36 cellules connectées par deux branches composées de 18 cellules en série. La simulation est effectuée et est considéré dans les conditions standards. T=25°C, E=1000W/m².

DONNEES TECHNIQUES

Type de module	KS-20T
Référence	M030020B
Puissance nominale P sous CTS	20 Wc
Tension maximum pour puissance nominale	17,4 V
Courant maximum pour puissance nominale	1,16 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	21,7 V
Courant de court-circuit (Isc)	1,26 A
Longueur	520 mm
Largeur	352 mm
Epaisseur	22 mm
Poids	2,4 Kg
Câble de sortie de 2 x 1 mm ²	2,45 m
Nombre de cellules	36
Technologie des cellules	Polycristalline
Forme des cellules	Rectangulaire
Montage des chaînes de cellules	2 branches en série de 18 cellules raccordées au niveau du boîtier

Ces valeurs électriques sont valables dans les conditions de test standard (CTS) :
 Radiation incidente de 1000 W/m².
 Masse d'air AM 1,5 et température cellule de 25°C.

Tableau (IV.2) : Caractéristique électrique de GPV dans les conditions standards.

Cette figure représente le schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK :

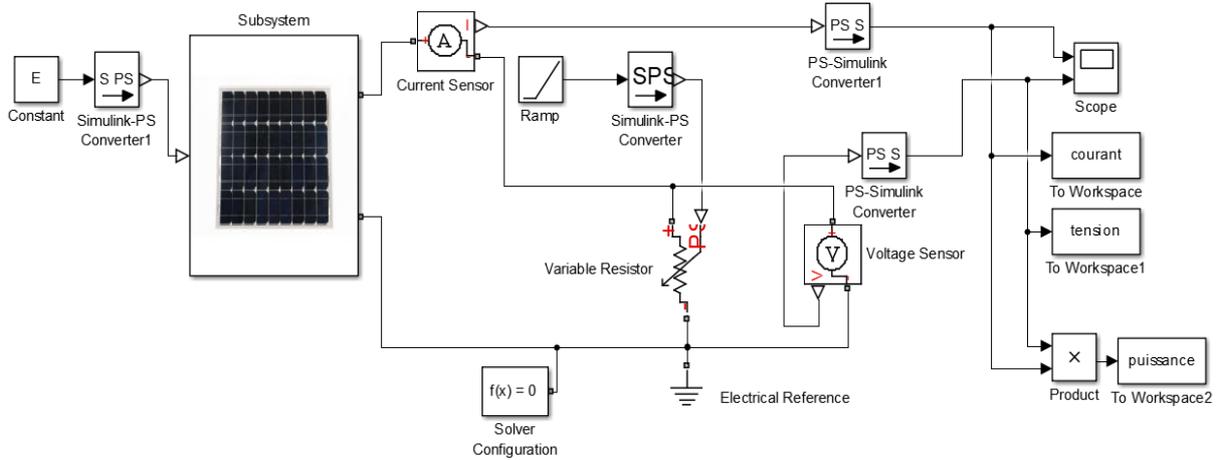


Figure (IV.5) : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Les résultats de simulation, aux conditions STC, pour la caractéristique I-V et P-V sont représentés dans les figures suivantes :

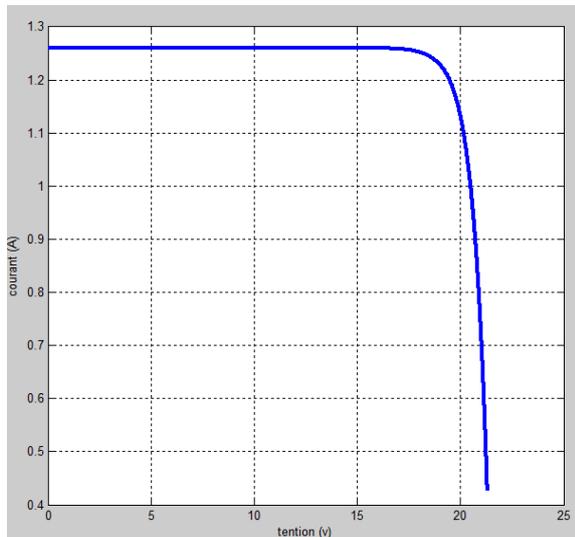


Figure (IV.6-a) : Caractéristique I-V d'une générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$).

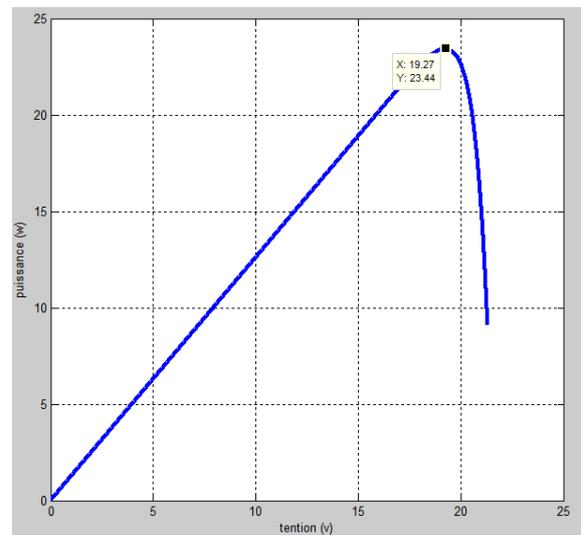


Figure (IV.6-b) : Caractéristique P-V d'une générateur PV ($T=25^{\circ}\text{C}$, $E=1000\text{W}/\text{m}^2$).

La puissance maximale fournie par le module photovoltaïque simulé est de **23.44 Watts** pour une tension maximale de **19.27 Volts** et d'un courant maximale généré de **1.2163 A** (sous STC).

IV.3.1 Influence de la température sur le générateur PV

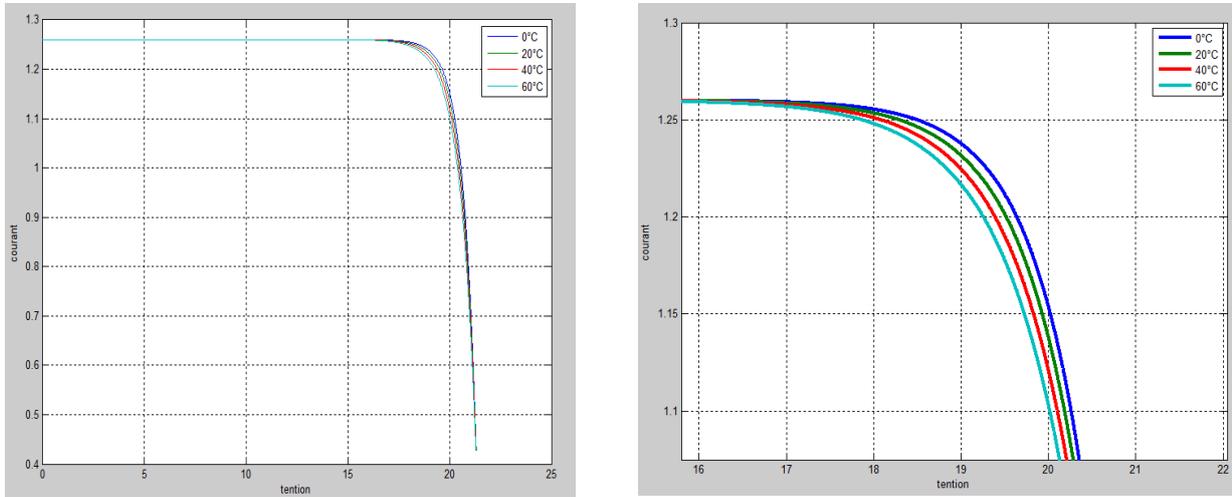


Figure (IV.7) : Caractéristique I-V d'un générateur pour différentes températures ($E=1000\text{W/m}^2$).

La figure (IV.7) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de générateur.

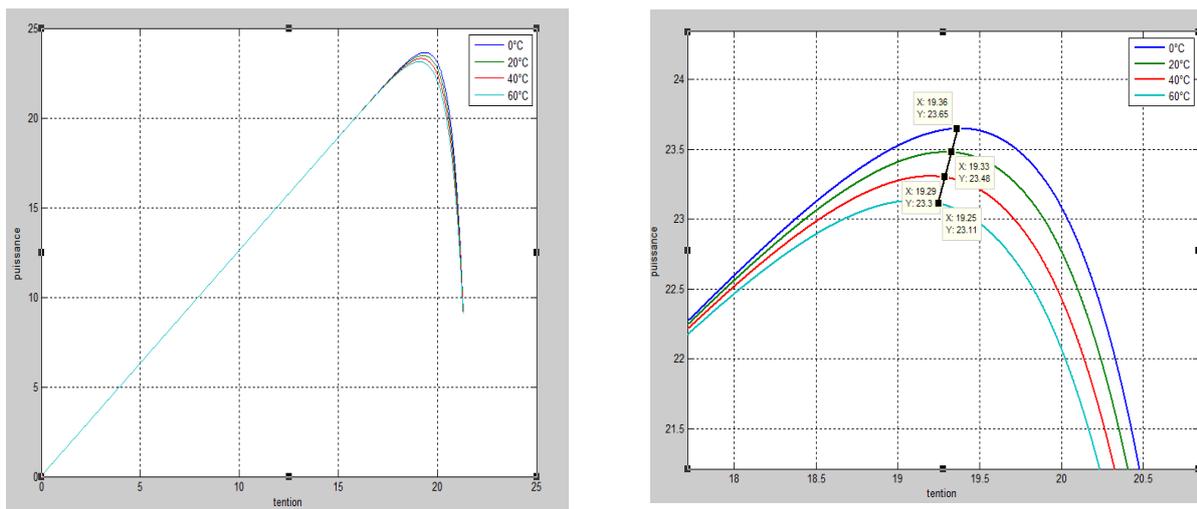


Figure (IV.8) : Caractéristique P-V d'un générateur pour différentes températures ($E=1000\text{W/m}^2$).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

IV.3.2 Influence de l'éclairement sur le générateur PV

Les figure (IV.9) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristique I-V et P-V à T=25°C, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique (P idem).

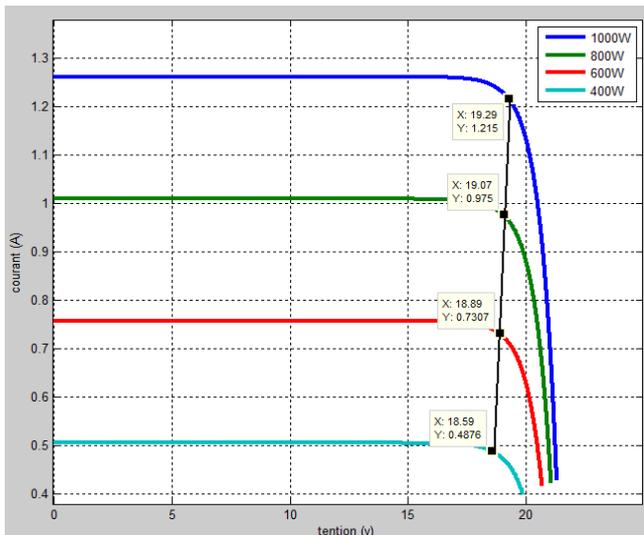


Figure (IV.9-a) : Caractéristique I-V pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

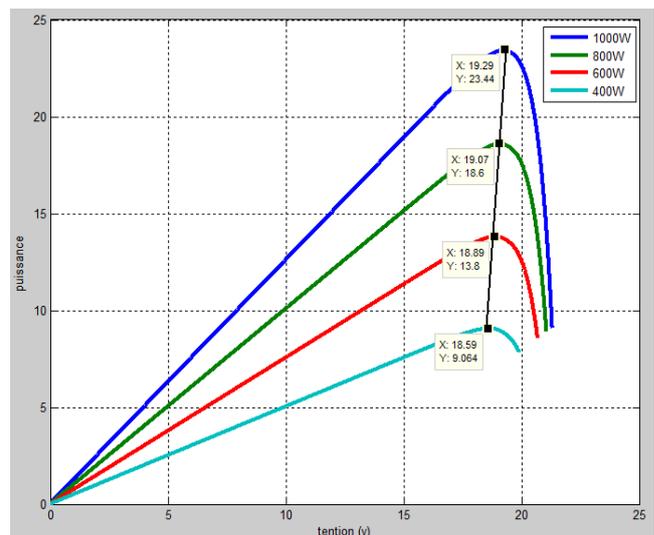


Figure (IV.9-b) : Caractéristique P-V pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

Le tableau suivant représente la variation des différentes caractéristiques du panneau solaire pour un éclairement E (200-1000w/m²) et des températures de 25°C, 35°C et 45°C.

E (w/m ²)	T (°C)	V (v)	I (A)	P max (w)	V max (v)	I max (A)	FF	η
200	25°C	12,5999	0,252	3,1751	12,5999	0,2520	1,00	8,67
	35°C	12,5899	0,252	3,1751	12,5899	0,2522	1,00	8,67
	45°C	12,5797	0,252	3,175	12,5797	0,2524	1,00	8,67
400	25°C	19,8848	0,504	9,0635	18,6600	0,4857	0,90	12,38
	35°C	19,8403	0,504	9,0209	18,6100	0,4847	0,90	12,32
	45°C	19,7947	0,504	8,9763	18,5700	0,4834	0,90	12,26
600	25°C	20,6956	0,756	13,803	19,3400	0,7137	0,88	12,57
	35°C	20,6732	0,756	13,7431	18,9900	0,7237	0,88	12,51
	45°C	20,6494	0,756	13,6827	18,9200	0,7232	0,88	12,46
800	25°C	21,0697	1,008	18,59	19,2300	0,9667	0,88	12,70
	35°C	21,0596	1,008	18,5244	19,1700	0,9663	0,87	12,65
	45°C	21,0472	1,008	18,4502	19,0900	0,9665	0,87	12,60
1000	25°C	21,3135	1,26	23,4358	19,3600	1,2105	0,87	12,80
	35°C	21,311	1,26	23,3498	19,3500	1,2067	0,87	12,76
	45°C	21,307	1,26	23,2631	19,2900	1,2060	0,87	12,71

Tableau (IV.3) : Variation des différentes caractéristiques du panneau solaire en fonction de l'éclairement et la température.

Le tableau (IV.3) nous montre que les valeurs de la tension V et la puissance P et par conséquent le rendement η diminues tandis que du courant I augmente légèrement avec l'augmentation de la température pour un éclairement E fixe.

Il montre aussi que les valeurs du courant I et de la tension V et la puissance P et par conséquent le rendement η croît avec le croisement de l'éclairement pour une température T fixe.

On remarque aussi que la puissance maximale P_{max} et le rendement η idéal du panneau solaire seront fournis sous les deux conditions 1000 w/m^2 et 25°c .

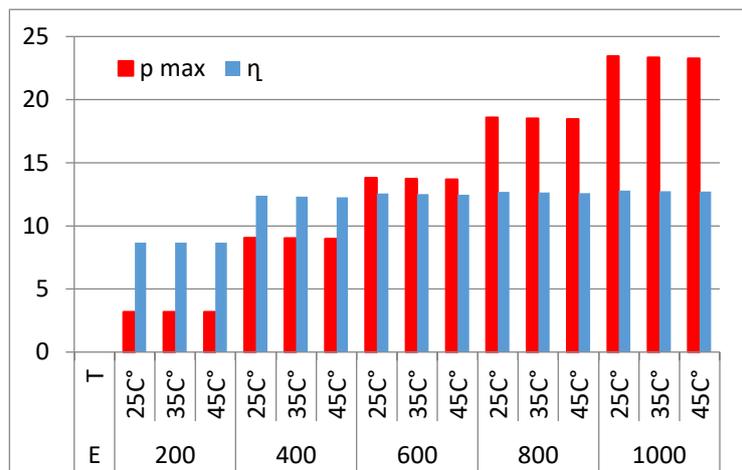


Figure (IV.10) : Histogramme qui décrit la puissance et le rendement pour un éclairement E (200-1000w/m²) et des températures de 25°C, 35°C et 45°C.

IV.4 Exemple de fonctionnement des modules PV en conditions réelles(NOCT)

IV.4.1 Etude de l'influence de la température et l'éclairement sur le fonctionnement des modules PV sur la région d'Oran Es-Senia

IV.4.1.1 Pendant une journée :

On a pris les données horaires de l'éclairement et la température des dates suivants :

- Equinoxe de printemps 21 Mars 2016
- Solstice d'été 21 juin 2016
- Solstice d'Hiver 21 Décembre 2016

Pour que les résultats de cette étude seront plus clairs, on a choisi ces dates-là qui ont des températures différentes l'un des autres et des durées de jours distincts autrement dit des durée d'ensoleillement distincts (12h en équinoxe et 14.42h pour le solstice d'été, 9.58h pour celui de l'hiver).

Les figures suivantes sont issues des tableaux de résultats de simulation voire **Annexe 2**

Les figures (IV.11) (IV.12) présentent l'influence de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du panneau suivant les données horaires (temps UTC) durant la journée du 21 Mars 2016 :

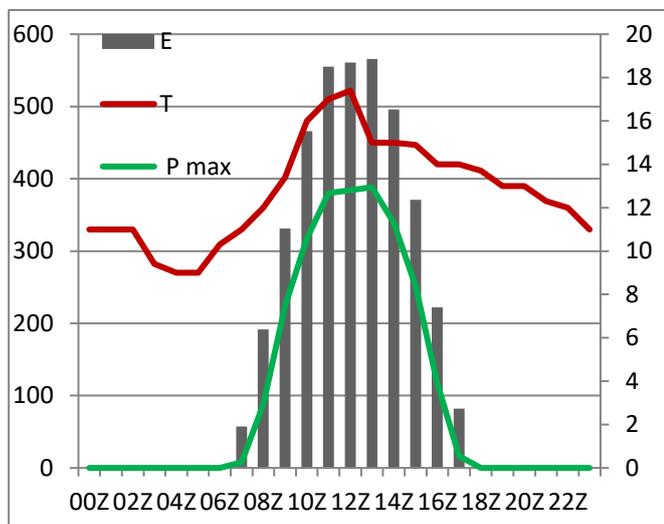


Figure (IV.11) : Variation de la Puissance Max en fonction de la température et de l'éclairement (21 Mars 2016).

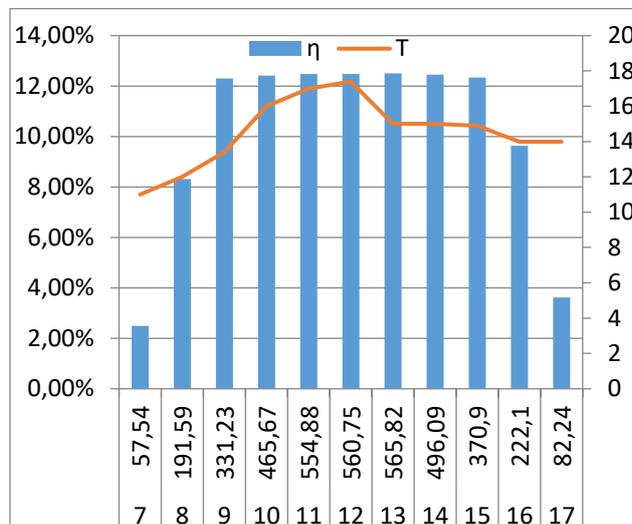


Figure (IV.12) : Variation du rendement en fonction de l'éclairement (21 Mars 2016).

Les figures (IV.13) (IV.14) présentent l'influence de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du panneau suivant les données horaires (temps UTC) durant la journée du 21 Juin 2016 :

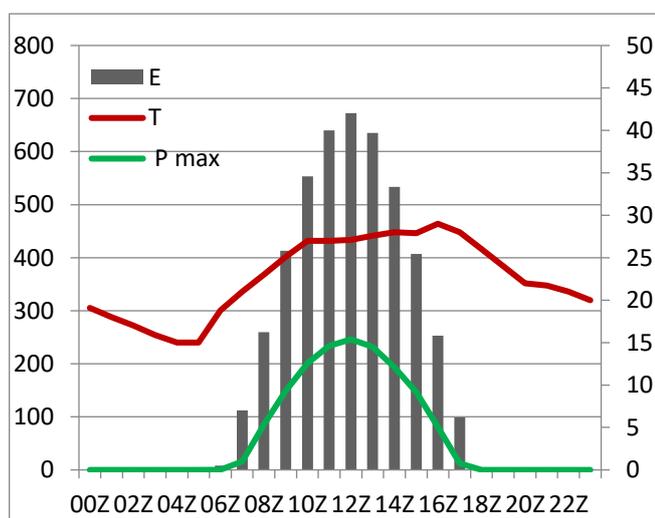


Figure (IV.13) : Variation de la Puissance Max en fonction de la température et de l'éclairement (21 Juin 2016).

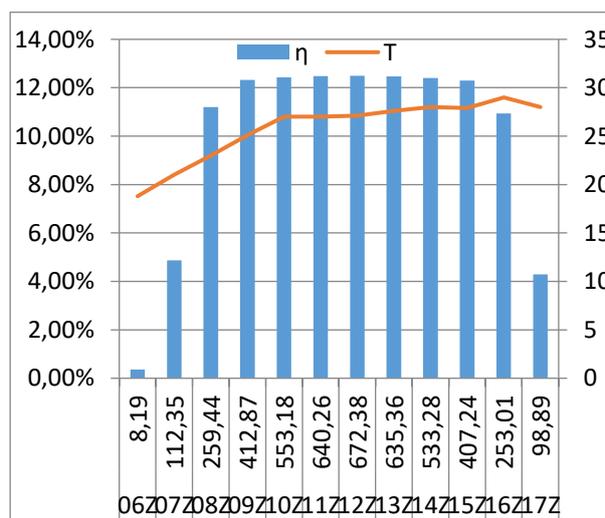


Figure (IV.14) : Variation du rendement en fonction de l'éclairement (21 Juin 2016).

Les figures (IV.15), (IV.16) présentent l'influence de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du panneau suivant les données horaires (temps UTC) durant la journée du 21 Juin 2016 :

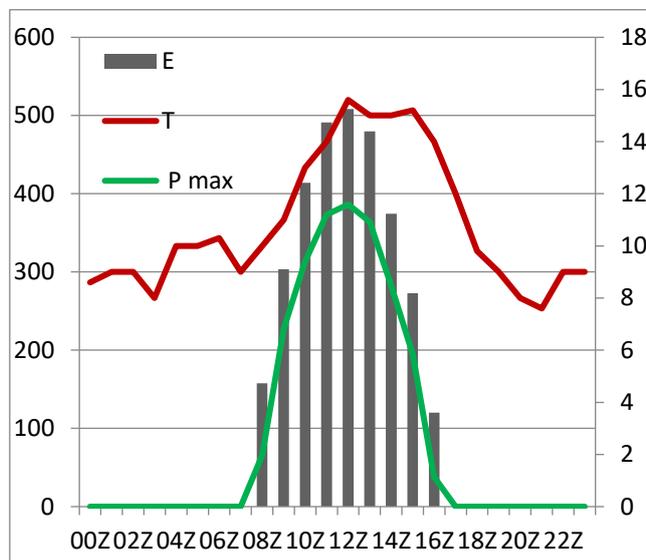


Figure (IV.15) : Variation de la Puissance Max en fonction de la température et de l'éclairement (21 Décembre 2016).

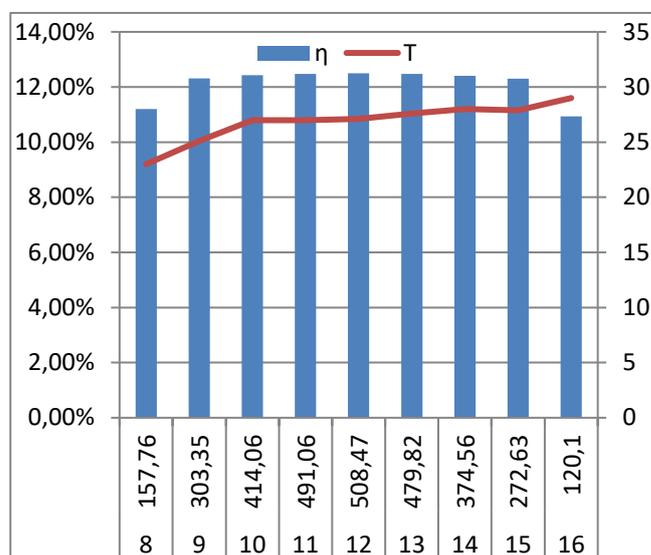


Figure (IV.16) : Variation du rendement en fonction de l'éclairement (21 Décembre 2016).

D'après les figures précédentes on voit que la puissance maximale P max fournie dans la journée du 21 juin 2016 est plus importante par rapport aux autres journées. Car en juin les valeurs températures de l'air seront plus grandes et on reçoit plus d'énergie solaire par rapport aux autres jours (position du soleil).

On ne voit pas une grande différence dans les pourcentages du rendement η entre les trois journées mais la durée du jour se diffère entre les trois. En juin on a une durée d'ensoleillement (éclairement E) plus longue donc plus de production d'énergie photovoltaïque que celle du 21 Mars et 21 décembre en dernier.

D'après les figures précédentes, le rendement η (12,5%) et la puissance sont proportionnels et atteignent une valeur maximum pour une température de $T = 27,1^\circ\text{C}$ et un éclairement $E = 672,38\text{W/m}^2$ (en juin). On remarque aussi que le rendement η (12,5%) atteint son maximum dans le 21 Mars pour une température de $T = 15^\circ\text{C}$ et un éclairement $E = 565,82\text{W/m}^2$ donc on a obtenu le même rendement avec moins d'éclairement et avec une plus basse température.

IV.4.1.2 Pendant une année

On a pris les données de l'éclairement moyen mensuel et la température moyenne mensuelle (2016) :

La figure (IV.17) illustre la quantité de l'énergie directe moyenne reçue chaque mois :

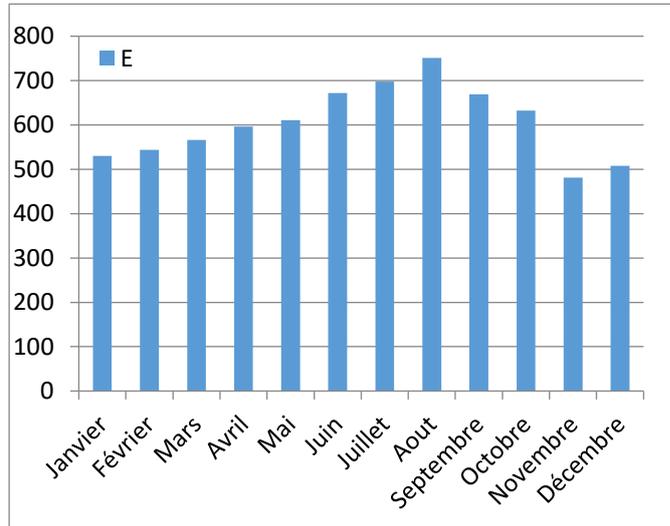


Figure (IV.17) : L'énergie moyenne mensuelle de l'année 2016.

Et le tableau au-dessous montre la variation des caractéristiques du panneau en fonction de l'éclairement moyen mensuel et de la température moyenne mensuelle :

E	Mois	T air	T cell	V	I	P max	V max	I max	FF	η %
530	Janvier	13,9	30,5	20,4839	0,6678	12,1000	18,9300	0,6392	0,88	12,47
544	Février	14,2	31,2	20,5265	0,6854	12,4362	18,7800	0,6622	0,88	12,49
566	Mars	13,6	31,3	20,5912	0,7132	12,9568	18,8900	0,6859	0,88	12,51
596	Avril	16,9	35,5	20,6618	0,7510	13,6450	18,9400	0,7204	0,88	12,51
611	Mai	20,0	39,1	20,6913	0,7699	13,9797	18,9400	0,7381	0,88	12,50
672	Juin	23,8	44,8	20,8178	0,8467	15,3943	19,0100	0,8098	0,87	12,52
698	Juillet	26,1	47,9	20,8647	0,8795	15,9927	19,0000	0,8417	0,87	12,52
751	Aout	26,3	49,8	20,9598	0,9463	17,2432	19,0400	0,9056	0,87	12,54
669	Septembre	24,6	45,5	20,8101	0,8429	15,3183	18,9600	0,8079	0,87	12,51
632	Octobre	21,8	41,6	20,7361	0,7963	14,4633	18,9800	0,7620	0,88	12,50
481	Novembre	15,9	30,9	20,3023	0,6061	10,9457	18,8900	0,5794	0,89	12,43
508	Décembre	13,2	29,1	20,4126	0,6401	11,5935	18,9100	0,6131	0,89	12,47

Tableau (IV.4) : Variation des différentes caractéristiques du panneau solaire en fonction de l'éclairement et la température moyenne mensuelle sur la région d'Oran (2016).

La figure (IV.18) montre clairement une corrélation positive entre la température du panneau et la température ambiante. Cela montre que la température de l'air autour du panneau détermine la chaleur du panneau.

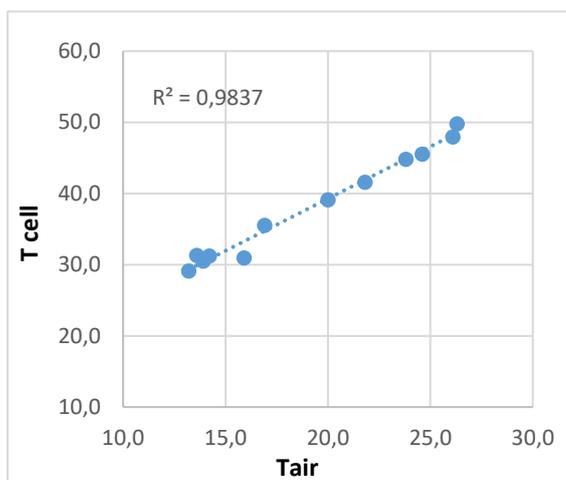


Figure (IV.18) : Température du panneau (°C) par rapport à la température ambiante (°C).

La figure (IV.19) montre que la puissance croît avec la croissance de la température de cellule et une forte corrélation positive ($R^2 = 0,9322$) entre les deux dans la plage [40°C,50°C] par rapport à celle entre [0°C,40°C]. Cette corrélation positive nous indique que plus de puissance est produite lorsque la température du panneau augmente.

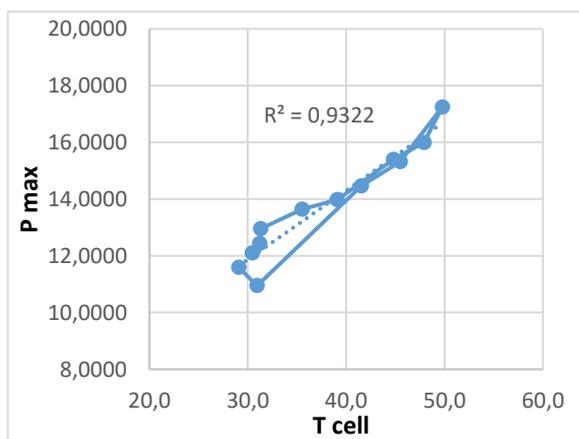


Figure (IV.19) : Puissance (W) par rapport à la température du panneau (°C).

Pour voir la variation des caractéristiques du panneau on fonction de la température, on a pris les différents températures moyennes mensuelles (l'air ambiant, minimal et maximal) de l'année 2016 pour la région ES-SENIA ORAN, les figures suivantes sont issues des tableaux de l'annexe 2

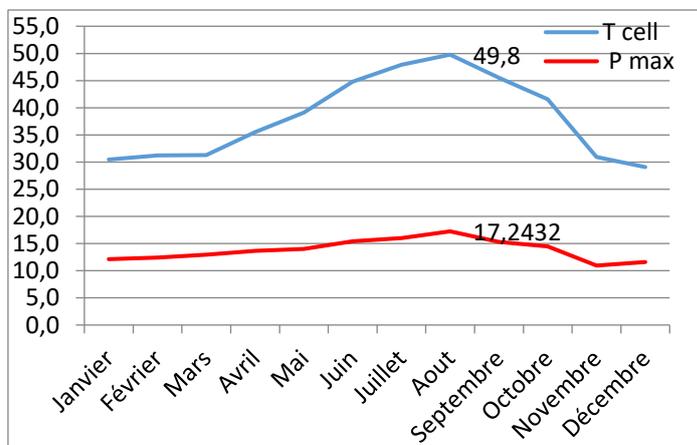


Figure (IV.20) : Variation de la puissance maximale en fonction de T cell pour les températures ambiantes.

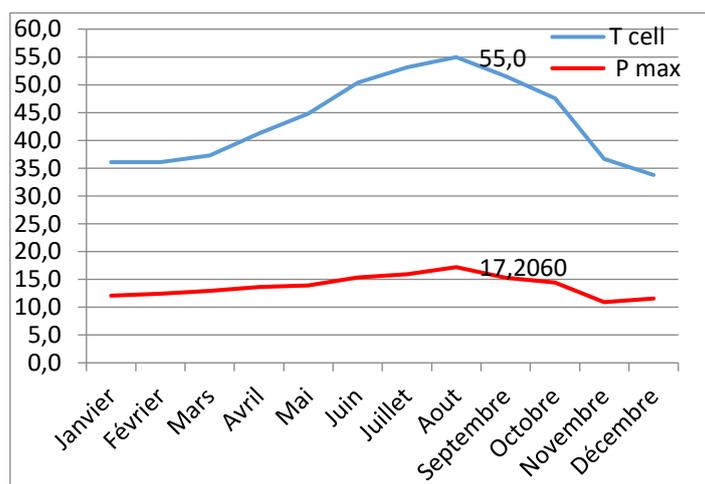


Figure (IV.21) : Variation de la puissance maximale en fonction de T cell pour les températures maximales.

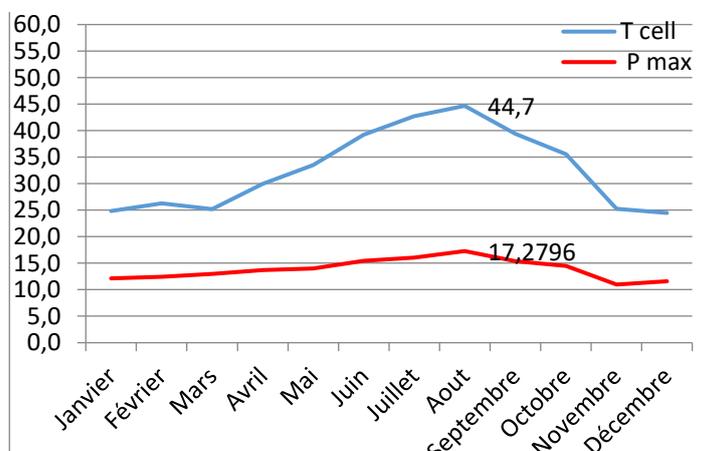


Figure (IV.22) : Variation de la puissance maximale en fonction de T cell pour les températures minimales.

Les figures précédentes montrent que si on prend le mois d'aout par exemple (maximum d'éclairement) on voit que la puissance maximale la plus importante (17,2796 W) fournie par le panneau est sous la température minimale moyenne de ce mois 21,2°C ($T_{cell} = 44,7^{\circ}\text{C}$), par contre la température maximale moyenne 31,5°C ($T_{cell} = 55^{\circ}\text{C}$) fournie moins de puissance maximale (17,2060 W) et pour la température de l'air ambiant moyenne 26,3°C ($T_{cell} = 49,8^{\circ}\text{C}$) une puissance maximale de (17,2432 W) est fournie.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre là on a tiré comme conclusion qu'une élévation de la température des cellules photovoltaïques provoque une diminution de la tension et du courant et par conséquent la puissance maximale et le rendement diminuent aussi, donc plus la température augmente et moins le module est performant. La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'éclairement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé.

Conclusion générale

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est par nature difficile. En effet, pour le côté source (un générateur photovoltaïque), la production de la puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des modules solaires constituant le champ photovoltaïque pour opter à un système photovoltaïque suffisant afin de couvrir les besoins et la capacité de charge (batterie, pompe, chaudière, ...).

Pour avoir un dimensionnement optimal, il convient indispensable d'utiliser un modèle mathématique cohérent modélisant les différents éléments intervenants dans le calcul de la puissance et le rendement fournis.

A cet effet, nous avons assigné à ce travail comme objectif l'étude de l'influence de la température sur l'énergie électrique photovoltaïque par la simulation du comportement de la cellule PV sous les conditions standard de test conventionnelles (CTS et NOCT) ; le modèle de la simulation est celui basé sur le schéma d'une diode développé par **Borowy et Salamen** (1996).

Si les conditions standards de test permettent la comparaison entre les performances de différentes technologies photovoltaïques, La caractérisation en extérieur peut présenter certains avantages :

- La lumière incidente peut être, par temps clair et stable, extrêmement uniforme sur toute la surface du module quel que soit sa dimension ;
- Le spectre solaire peut être plus proche du spectre AM1.5G ;
- Il n'y a pas de problème de temps de caractérisation trop court et donc la capacité de la cellule n'est plus un obstacle ;
- - Elle permet de disposer de toutes les conditions d'éclairement, de température, d'incidence, dans lesquelles peuvent être caractérisé un module ;
- C'est une solution qui coûte nettement moins cher qu'en intérieur car il n'y a pas besoin de sources lumineuses coûteuses ;

Les résultats des simulations obtenus ont montrés que l'effet de la température sur le panneau varie en fonction de l'éclairement, de la température ambiante. D'autres facteurs non discutés dans ce rapport peuvent intervenir aussi comme le refroidissement par le vent, le site choisi (ombrage partiel), types d'installation des modules (intégré au toit ou aéré) et le vieillissement des cellules PV.

L'augmentation de la température a entraîné sur les caractéristiques du module simulé :

- Une chute de la tension ;
- Une légère augmentation du courant ;
- Une perte non négligeable de puissance et par conséquent le rendement.

Alors que pour l'éclairement, nous avons conclu que :

- Le courant diminue très rapidement lorsque l'éclairement s'abaisse et engendre une décroissance moins prononcée de la tension de circuit ouvert.
- L'éclairement augmente, l'intensité du courant croit, la tension croit aussi, ces croissances permettant au module de produire une puissance plus importante, ce qui donne un rendement plus important.
- Le rendement du panneau photovoltaïque dépend fortement de l'éclairement et à un degré moins important de la température des cellules.

Un bon rendement sera autour des températures 21°C pour un éclairement de 750 W/m².

En plus de l'utilité des conditions standard et nominale de test pour le dimensionnement des installations photovoltaïques, l'utilisation des données d'observation météorologiques permettent de mieux la validation du modèle mathématique d'une cellule PV avec les caractéristiques fournies par le constructeur et par conséquent optimiser les estimations de production durant les années.

Dans cette optique, nous proposons comme perspectives :

- Elaboration d'un modèle de simulation par la caractérisation expérimentale d'un panneau solaire.
- Elaboration d'un masque solaire pour la modélisation de l'effet de l'ombrage naturelle et urbain.

Annexe

Annexe 1 : Programme de calcul des énergies en langage C

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
//une fonction qui calcule le jour julien
int jourjulian(int j ,int m, int y)
{
    int mb[12],mm[12] ,i,jj;
    mb[1]=31;mb[2]=29;mb[3]=31;mb[4]=30;mb[5]=31;mb[6]=30;mb[7]=31;mb[8]=31;mb[9]=
30;mb[10]=31;mb[11]=30;mb[12]=31;
    mm[1]=31;mm[2]=28;mm[3]=31;mm[4]=30;mm[5]=31;mm[6]=30;mm[7]=31;mm[8]=31;m
m[9]=30;mm[10]=31;mm[11]=30;mm[12]=31;
    jj=0;
    if(y%4==0)
    {
        for(i=1;i<m;i++)
            { jj=jj+mb[i];

                }
        jj=jj+j;}
    else
    {
        for(i=1;i<m;i++)
            { jj=jj+mm[i];

                }
        jj=jj+j;
    }
    printf("jj = %d\n",jj);
return jj;
}
int main()
{
    float
nt,TL,w0,dec,longi,lat,w,he,TSV,ET,B,a,h,hmax,min,heur,zamin,za,dj,mo,spb,alt,jpb,jp0,jb,sb,sd,jd,j
t,jpd,spd,jpt;
    int ne,i,j,jj,m,y;
    float pi = 3.14159265359;
    float sp0 = 1367;
    float tau = 0.7;
    printf("entrer le jour\n");
    scanf("%d", &j);
    printf("entrer le mois\n");
    scanf("%d", &m);
    printf("entrer l'annee\n");
    scanf("%d", &y);
    jj=jourjulian(j,m,y);
    printf("Entrer la latitude\n");

```

```

scanf("%f", &lat);
printf("Entrer l'altitude\n");
scanf("%f", &alt);
dec = 23.45*sin(2*pi*(jj+284)/365);
printf("la declinaison solaire ce jour ci est %.3f ° \n",dec);
dj=acos(-(tan(lat*pi/180)*tan(dec*pi/180)));
dj=24/pi*dj;
printf("la duree de ce jour en heure est %f \n",dj);
TL= 12-(dj/2);
w0 = 15*(12-TL);
nt= (2*w0);
printf("nt est %f \n",nt);
jpb=0;
jb=0;
jd=0;
jpd=0;
for (i=1;i<=nt-1;i++){
w=(nt/2)-i;
h=asin(sin(dec*pi/180)*sin(lat*pi/180)+cos(dec*pi/180)*cos(lat*pi/180)*cos(w*pi/180));
if (h<0){
za=-90-h*180/pi;
}
if (h>0){
za=90-h*180/pi;
}
mo=exp(-alt/8200)/cos(za*pi/180);
spb=sp0*pow(tau,mo);
sb=pow(tau,mo)*cos(za*pi/180)*sp0;
sd=0.3*(1-pow(tau,mo))*cos(za*pi/180)*sp0;
spd=0.3*(1-pow(tau,mo))*((1+cos(za*pi/180))/2)*cos(za*pi/180)*sp0;
jpb+=spb;
jb+=sb;
jd+=sd;
jpd+=spd;
}
jpb=jpb*(dj/nt);
jpd=jpd*(dj/nt);
jp0=sp0*dj;
jb=jb*(dj/nt);
jd=jd*(dj/nt);
jpt=jpb+jpd;
jt=jb+jd;
printf("jp0 est %f \n",jp0);
printf("jpb est %f \n",jpb);
printf("jpd est %f \n",jpd);
printf("jpt est %f \n",jpt);
printf("jb est %f \n",jb);
printf("jd est %f \n",jd);
printf("jt est %f \n",jt);
return 0;
}

```

Les différentes énergies aux équinoxes et aux solstices en fonction de la latitude :

Equinoxe de printemps - 21 mars – hémisphère nord – énergies en Wh m-2								
Latitude	Heures (h)	$J_{p0} = 1367 \cdot D_j$	J_{pb}	J_{pd}	J_{pt}	J_b	J_d	J_t
0°	12.00	16404	8309	1050	9359	6360	1225	7585
10°	12.00	16400	8236	1039	9275	6214	1219	7433
20°	11.99	16395	8017	1006	9024	5791	1203	6994
30°	11.99	16390	7634	952	8586	5113	1174	6287
40°	11.99	16384	7048	877	7925	4215	1128	5344
50°	11.98	16376	6194	778	6973	3152	1060	4212
60°	11.97	16363	4967	654	5621	2005	955	2961

Solstice d'été - 21 juin – hémisphère nord – énergies en Wh m-2								
Latitude	Heures (h)	$J_{p0} = 1367 \cdot D_j$	J_{pb}	J_{pd}	J_{pt}	J_b	J_d	J_t
0°	12.00	16404	7915	991	8906	5597	1196	6792
10°	12.58	17203	8540	1076	9617	6360	1271	7631
20°	13.21	18059	9045	1144	10189	6884	1339	8223
30°	13.93	19046	9448	1195	10644	7141	1404	8545
40°	14.84	20292	9768	1233	11001	7120	1472	8592
50°	16.15	22075	10030	1262	11292	6829	1551	8380
60°	18.49	25279	10299	1300	11599	6305	1670	7975

Equinoxe d'automne - 21 septembre – hémisphère nord – énergies en Wh m-2								
Latitude	Heures (h)	$J_{p0} = 1367 \cdot D_j$	J_{pb}	J_{pd}	J_{pt}	J_b	J_d	J_t
0°	12.00	16404	8309	1050	9359	6360	1225	7885
10°	11.99	16395	8222	1037	9259	6195	1217	7412
20°	11.97	16363	7990	1003	8993	5755	1200	6955
30°	11.96	16353	7591	947	8538	5062	1169	6231
40°	11.93	16312	6987	869	7856	4152	1121	5273
50°	11.91	16273	6112	769	6881	3082	1050	4132
60°	11.86	16213	4858	642	5500	1936	941	2877

Solstice d'hiver - 21 décembre – hémisphère nord – énergies en Wh m-2								
Latitude	Heures (h)	$J_{p0} = 1367 \cdot D_j$	J_{pb}	J_{pd}	J_{pt}	J_b	J_d	J_t
0°	12.00	16404	7915	991	8906	5597	1196	6792
10°	11.42	15605	7141	889	8030	4636	1109	5745
20°	10.79	14750	6182	769	6951	3537	1004	4542
30°	10.07	13763	4986	630	5616	2382	875	3257
40°	9.16	12517	3492	472	3964	1284	706	1990
50°	7.85	10735	1699	291	1990	413	477	890
60°	5.51	7536	138	91	229	14	167	181

Les différentes énergies aux équinoxes et aux solstices à Oran :

Oran 35.7°N	Durée du jour (h)	$J_{p0} = 1367 \cdot Dj$	J_{pb}	J_{pd}	J_{pt}	J_b	J_d	J_t
21 mars	12.00	16404	7412	904	8316	4679	1140	5819
21 juin	14.42	19714	9719	1205	10924	7214	1426	8640
21 septembre	11.94	16325	7343	895	8238	4604	1132	5736
21 décembre	9.58	13095	4230	537	4767	1760	777	2537

Calcul annuel

Energie (MWh m-2) en fonction de la latitude (hémisphère nord)

	Heures (h)	$J_{p0} = 1367 \cdot Dj$	J_{pb}	J_{pd}	J_{pt}	J_b	J_d	J_t
0°	4380	5.988	2.963	0.373	3.335	2.183	0.442	2.625
10°	4384	5.992	2.941	0.370	3.310	2.145	0.440	2.585
20°	4387	5.998	2.864	0.360	3.224	2.021	0.435	2.455
30°	4392	6.004	2.728	0.343	3.070	1.819	0.424	2.244
35,7°	4395	6.008	2.584	0.325	2.909	1.697	0.415	2.112
40°	4397	6.011	2.519	0.318	2.838	1.556	0.408	1.964
50°	4405	6.022	2.227	0.287	2.514	1.256	0.382	1.639
60°	4418	6.040	1.870	0.250	2.119	0.961	0.346	1.306

Annexe 2 :

- Tableaux de variation des caractéristiques du panneau en fonction de l'éclairement E et de la température T.

21 Mars 2016

UTC time	E	T	T cell	V	I	P max	V max	I max	FF	η
00	0	11	11,0	0	0	0	0	0	/	/
01	0	11	11,0	0	0	0	0	0	/	/
02	0	11	11,0	0	0	0	0	0	/	/
03	0	9,4	9,4	0	0	0	0	0	/	/
04	0	9	9,0	0	0	0	0	0	/	/
05	0	9	9,0	0	0	0	0	0	/	/
06	0	10,3	10,3	0	0	0	0	0	/	/
07	57,54	11	12,8	3,6250	0,0725	0,2628	3,6200	0,0726	1,00	2,50%
08	191,59	12	18,0	12,0701	0,2414	2,9138	12,0700	0,2414	1,00	8,31%
09	331,23	13,4	23,8	19,1216	0,4173	7,4587	18,5600	0,4019	0,93	12,30%
10	465,67	16	30,6	20,2367	0,5867	10,5854	18,7100	0,5658	0,89	12,42%
11	554,88	17	34,3	20,5511	0,6991	12,6758	18,8200	0,6735	0,88	12,48%
12	560,75	17,4	34,9	20,5669	0,7065	12,8116	18,9300	0,6768	0,88	12,48%
13	565,82	15	32,7	20,5871	0,7129	12,9445	18,9700	0,6824	0,88	12,50%
14	496,09	15	30,5	20,3639	0,6251	11,3044	18,9000	0,5981	0,89	12,45%
15	370,9	14,9	26,5	19,6314	0,4673	8,3759	18,6000	0,4503	0,91	12,34%
16	222,1	14	20,9	13,9913	0,2799	3,9152	13,9900	0,2799	1,00	9,63%
17	82,24	14	16,6	5,2198	0,1044	0,5447	5,2100	0,1045	1,00	3,62%
18	0	13,7	13,7	0	0	0	0	0	/	/
19	0	13	13,0	0	0	0	0	0	/	/
20	0	13	13,0	0	0	0	0	0	/	/
21	0	12,3	12,3	0	0	0	0	0	/	/
22	0	12	12,0	0	0	0	0	0	/	/
23	0	11	11,0	0	0	0	0	0	/	/

21 Juin 2016

UTC time	E	T	T cell	V	I	P max	V max	I max	FF	η
00	0	19,1	19,1	0	0	0	0	0	/	/
01	0	18	18	0	0	0	0	0	/	/
02	0	17	17	0	0	0	0	0	/	/
03	0	15,9	15,9	0	0	0	0	0	/	/
04	0	15	15	0	0	0	0	0	/	/
05	0	15	15	0	0	0	0	0	/	/
06	8,19	18,8	19,1	0,5160	0,0103	0,0053	0,52	0,0103	1,00	0,35%
07	112,35	21	24,5	7,0780	0,1416	1,0020	7,08	0,1416	1,00	4,87%
08	259,44	23	31,1	16,3092	0,3269	5,3198	16,30	0,3264	1,00	11,20%
09	412,87	25,1	38,0	19,9177	0,5202	9,3089	18,62	0,4999	0,90	12,32%
10	553,18	27	44,3	20,5146	0,6970	12,5787	18,84	0,6677	0,88	12,42%
11	640,26	27	47,0	20,7435	0,8067	14,6254	18,96	0,7714	0,87	12,48%
12	672,38	27,1	48,1	20,8121	0,8472	15,3816	18,92	0,8130	0,87	12,50%
13	635,36	27,6	47,5	20,7310	0,8006	14,5059	18,97	0,7647	0,87	12,47%
14	533,28	28	44,7	20,4534	0,6719	12,1064	18,78	0,6446	0,88	12,40%
15	407,24	27,9	40,6	19,8600	0,5131	9,1653	18,60	0,4928	0,90	12,30%
16	253,01	29	36,9	15,9161	0,3188	5,0664	15,92	0,3183	1,00	10,94%
17	98,89	28	31,1	6,2301	0,1246	0,7763	6,23	0,1246	1,00	4,29%
18	0	26	26	0	0	0	0	0	/	/
19	0	24	24	0	0	0	0	0	/	/
20	0	22	22	0	0	0	0	0	/	/
21	0	21,7	21,7	0	0	0	0	0	/	/
22	0	21	21	0	0	0	0	0	/	/
23	0	20	20	0	0	0	0	0	/	/

21 décembre 2016

UTC time	E	T	T cell	V	I	P max	V max	I max	FF	η
00	0	8,6	8,6	0	0	0	0	0	/	/
01	0	9	9	0	0	0	0	0	/	/
02	0	9	9	0	0	0	0	0	/	/
03	0	8	8	0	0	0	0	0	/	/
04	0	10	10	0	0	0	0	0	/	/
05	0	10	10	0	0	0	0	0	/	/
06	0	10,3	10,3	0	0	0	0	0	/	/
07	0	9	9	0	0	0	0	0	/	/
08	157,76	10	14,9	9,9389	0,1988	1,9756	9,9300	0,1990	1,00	6,84%
09	303,35	11	20,5	18,4660	0,3822	6,8199	18,4700	0,3692	0,97	12,28%
10	414,06	13	25,9	19,9771	0,5217	9,3919	18,7000	0,5022	0,90	12,39%
11	491,06	14	29,3	20,3482	0,6187	11,1917	18,8500	0,5937	0,89	12,45%
12	508,47	15,6	31,5	20,4069	0,6407	11,5919	18,8400	0,6153	0,89	12,45%
13	479,82	15	30,0	20,3004	0,6046	10,9225	18,8700	0,5788	0,89	12,44%
14	374,56	15	26,7	19,6659	0,4719	8,4608	18,6200	0,4544	0,91	12,34%
15	272,63	15,2	23,7	17,0844	0,3435	5,8375	17,0800	0,3418	0,99	11,70%
16	120,1	14	17,8	7,5663	0,1513	1,1415	7,5600	0,1510	1,00	5,19%
17	0	12	12	0	0	0	0	0	/	/
18	0	9,8	9,8	0	0	0	0	0	/	/
19	0	9	9	0	0	0	0	0	/	/
20	0	8	8	0	0	0	0	0	/	/
21	0	7,6	7,6	0	0	0	0	0	/	/
22	0	9	9	0	0	0	0	0	/	/
23	0	9	9	0	0	0	0	0	/	/

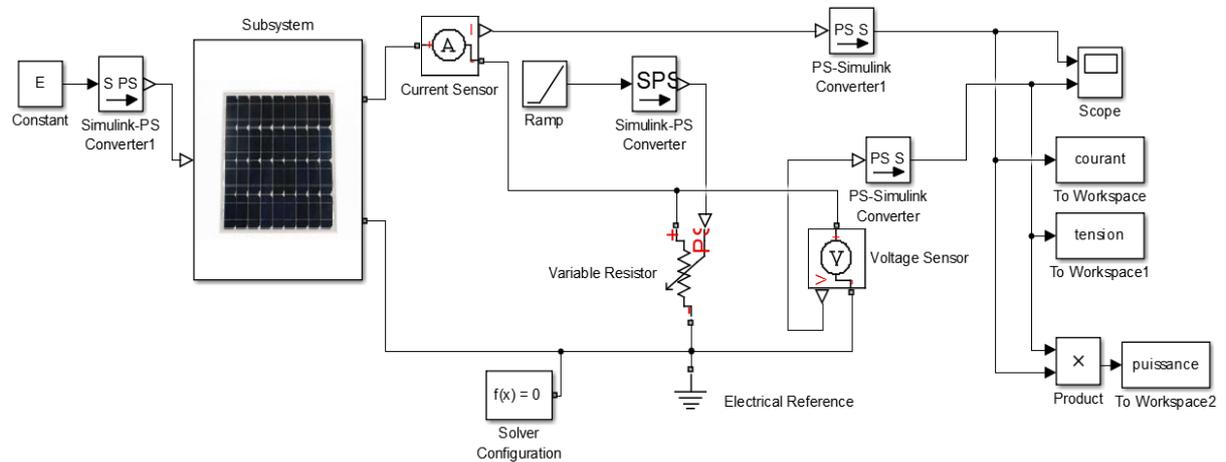
- Tableaux de variation des caractéristiques du panneau en fonction de l'éclairement E et des températures moyennes mensuelles (minimales et maximales).

E	Mois	T max air	T cell	V	I	P max	V max	I max	FF	η
530	Janvier	19,5	36,1	20,4678	0,6678	12,0764	18,8100	0,6420	0,8835	12,4485
544	Février	19,1	36,1	20,5130	0,6864	12,4078	18,8500	0,6582	0,8812	12,4609
566	Mars	19,6	37,3	20,5758	0,7132	12,9223	18,9100	0,6834	0,8806	12,4732
596	Avril	22,6	41,2	20,6482	0,7510	13,6108	18,9200	0,7194	0,8777	12,4765
611	Mai	25,7	44,8	20,6781	0,7699	13,9447	18,9300	0,7366	0,8759	12,4687
672	Juin	29,4	50,4	20,8066	0,8467	15,3574	19,0000	0,8083	0,8717	12,4854
698	Juillet	31,3	53,1	20,8550	0,8795	15,9574	18,9300	0,8430	0,8700	12,4900
751	Aout	31,5	55,0	20,9514	0,9463	17,2060	19,0200	0,9046	0,8678	12,5168
669	Septembre	30,6	51,5	20,7980	0,8429	15,2788	18,9300	0,8071	0,8715	12,4772
632	Octobre	27,8	47,6	20,7228	0,7963	14,4255	18,8500	0,7653	0,8742	12,4700
481	Novembre	21,6	36,6	20,2830	0,6061	10,9166	18,7500	0,5822	0,8880	12,3993
508	Décembre	17,9	33,8	20,3981	0,6401	11,5686	18,8400	0,6140	0,8860	12,4415

E	Mois	T min air	T cell	V	I	P max	V max	I max	FF	η
530	Janvier	8,3	24,9	20,4996	0,6678	12,1377	18,9100	0,6419	0,8866	12,5116
544	Février	9,3	26,3	20,5396	0,6854	12,4625	18,9200	0,6587	0,8853	12,5158
566	Mars	7,5	25,2	20,6064	0,7132	12,9918	18,9900	0,6841	0,8840	12,5403
596	Avril	11,3	29,9	20,6747	0,751	13,6784	18,9700	0,7211	0,8810	12,5384
611	Mai	14,4	33,5	20,7038	0,7699	14,0138	19,0100	0,7372	0,8792	12,5305
672	Juin	18,2	39,2	20,8285	0,8467	15,4310	19,0200	0,8113	0,8750	12,5452
698	Juillet	20,9	42,7	20,8741	0,8795	16,0279	18,9900	0,8440	0,8730	12,5451
751	Aout	21,2	44,7	20,9676	0,9463	17,2796	19,0500	0,9071	0,8709	12,5704
669	Septembre	18,5	39,4	20,8219	0,8429	15,3582	18,9800	0,8092	0,8751	12,5420
632	Octobre	15,8	35,6	20,7488	0,7963	14,5009	18,9700	0,7644	0,8777	12,5352
481	Novembre	10,2	25,2	20,3212	0,6061	10,9747	18,9100	0,5804	0,8910	12,4653
508	Décembre	8,6	24,5	20,4264	0,6401	11,6179	18,8900	0,6150	0,8886	12,4945

Annexe 3 : Modèle de simulation

Cell36



Zine Eddine

23-Sep-2020 15:14:04

Table des matières

- [Model - cell36](#)
- [System - cell36](#)
- [System - cell36/Subsystem1](#)
- [System - cell36/Subsystem2](#)
- [Appendix](#)

Liste des tableaux

1. Constant Block Properties
2. Current Sensor Block Properties
3. Electrical Reference Block Properties
4. Mux Block Properties
5. PS-Simulink Converter Block Properties
6. Product Block Properties
7. Ramp Block Properties
8. Simulink-PS Converter Block Properties
9. Solver Configuration Block Properties
10. ToWorkspace Block Properties
11. Variable Resistor Block Properties
12. Voltage Sensor Block Properties
13. PMIOPortBlockProperties
14. Solar Cell Block Properties
15. PMIOPortBlockProperties
16. Solar Cell Block Properties
17. Block Type Count

Model - cell36

Full Model Hierarchy

1. [cell36](#)
 1. [Subsystem1](#)
 2. [Subsystem2](#)

Simulation Parameter	Value
Solver	ode45
RelTol	1e-3
Refine	1
MaxOrder	5
ZeroCross	on

[\[more info\]](#)

System - cell36

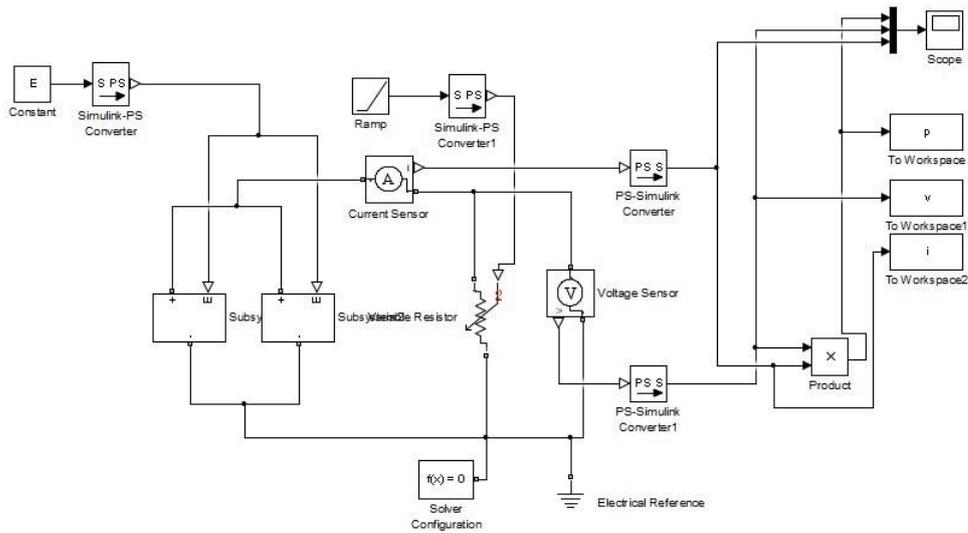


Tableau 1. Constant Block Properties

Name	Value	Vector Params ID	Sampling Mode	Out Data Type Str	Lock Scale	Sample Time	Frame Period
Constant	E	off	Sample based	Inherit: Inherit from 'Constant value'	off	inf	inf

Tableau 2. Current Sensor Block Properties

Name	Component Path	Component Variants	Component Variant Names	Class Name	Schema Version
Current Sensor	foundation.electrical.sensors.current	foundation.electrical.sensors.current	current	current	1

Tableau 3. Electrical Reference Block Properties

Name	Component Path	Component Variants	Component Variant Names	Class Name	Schema Version
Electrical Reference	foundation.electrical.elements.reference	foundation.electrical.elements.reference	reference	reference	1

Tableau 4. Mux Block Properties

Name	Inputs	Display Option
Mux	3	bar

Tableau 5. PS-Simulink Converter Block Properties

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Unit	Affine Conversion
PS-Simulink Converter	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1	off
PS-Simulink Converter1	network_engine_domain	ps_output	input	output	off	1	off

Tableau 6. Product Block Properties

Name	Inputs	Multiplication	Collapse Mode	Collapse Dim	Input Same DT	Out Data Type Str	Lock Scale	Rnd Meth	Saturate On Integer Overflow
Product	2	Element-wise(*)	All dimensions	1	off	Inherit: Inherit via internal rule	off	Floor	off

Tableau 7. Ramp Block Properties

Name	Slope	Start	X0
Ramp	1	0	0

Tableau 8. Simulink-PS Converter Block Properties

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Pseudo Periodic	Noise Distribution	Unit	Affine Conversion	Input Filtering	Simscape Filter Order	Input Filter Time Constant	Udot User Provided
Simulink-PS Converter	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	off	off	1	0.001	1
Simulink-PS Converter1	network_engine_domain	ps_input	input	output	off	none	1	off	off	1	0.001	1

Tableau 9. Solver Configuration Block Properties

Name	Physical Domain	Sub Class Name	Left Port Type	Right Port Type	Accelerate	Simulate Noise	Profile	Use Local Sampling	Enable Switched Linear Optimis	Frequency Domain	Use CCode	Rel Tol	Abs Tol	Min Step	To Workspace	Do DC Tc
Solver Configuration	network_engine_domain	solver	input	generic	off	off	off	off	on	off	off	0.001	1e-06	1e-09	off	off

Tableau 10. ToWorkspace Block Properties

Name	Variable Name	Max Data Points	Decimation	Save Format	Save 2DSignal	Fixpt As Fi
To Workspace	p	inf	1	Array	3-D array (concatenate along third dimension)	on
To Workspace1	v	inf	1	Array	3-D array (concatenate along third dimension)	on
To Workspace2	i	inf	1	Array	3-D array (concatenate along third dimension)	on

Tableau 11. Variable Resistor Block Properties

Name	Component Path	Component Variants	Component Variant Names	Class Name	Schema Version	Rmin	Rmin unit	Ispeci
Variable Resistor	foundation.electrical.elements.variable_resistor	foundation.electrical.elements.variable_resistor	variable_resistor	variable_resistor	1	0	Ohm	off

Tableau 12. Voltage Sensor Block Properties

Name	Component Path	Component Variants	Component Variant Names	Class Name	Schema Version
Voltage Sensor	foundation.electrical.sensors.voltage	foundation.electrical.sensors.voltage	voltage	voltage	1

System - cell36/Subsystem1

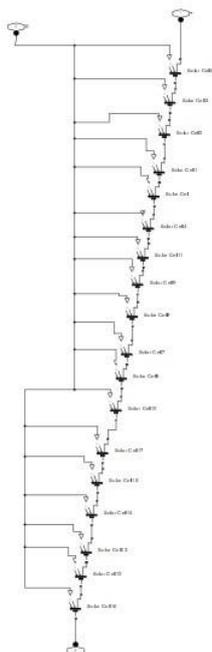


Tableau 13. PMIOPort Block Properties

Name	Port	Side
+	1	Right
-	3	Left
E	2	Right

Tableau 14. Solar Cell Block Properties

Appendix

Tableau 17. Block Type Count

BlockType	Count	Block Names
-----------	-------	-------------

Solar Cell (m)	36	Solar Cell , Solar Cell1 , Solar Cell10 , Solar Cell11 , Solar Cell12 , Solar Cell13 , Solar Cell14 , Solar Cell15 , Solar Cell16 , Solar Cell17 , Solar Cell2 , Solar Cell3 , Solar Cell4 , Solar Cell5 , Solar Cell6 , Solar Cell7 , Solar Cell8 , Solar Cell9 , Solar Cell , Solar Cell11 , Solar Cell10 , Solar Cell11 , Solar Cell12 , Solar Cell13 , Solar Cell14 , Solar Cell15 , Solar Cell16 , Solar Cell17 , Solar Cell2 , Solar Cell3 , Solar Cell4 , Solar Cell5 , Solar Cell6 , Solar Cell7 , Solar Cell8 , Solar Cell9
PMIOPort	6	± , -_E , ± , -_E
ToWorkspace	3	To Workspace , To Workspace1 , To Workspace2
SubSystem	2	Subsystem1 , Subsystem2
Simulink-PS Converter (m)	2	Simulink-PS Converter , Simulink-PS Converter1
PS-Simulink Converter (m)	2	PS-Simulink Converter , PS-Simulink Converter1
Voltage Sensor (m)	1	Voltage Sensor
Variable Resistor (m)	1	Variable Resistor
Solver	1	Solver Configuration
BlockType	Count	Block Names
Configuration (m)		
Scope	1	Scope
Ramp (m)	1	Ramp
Product	1	Product
Mux	1	Mux
Electrical Reference (m)	1	Electrical Reference
Current Sensor (m)	1	Current Sensor
Constant	1	Constant

Références

- [1] Zouak Belgacem, "Etude de l'évolution des caractéristiques des matériaux thermodynamiques des anciennes et nouvelles générations et applications photovoltaïque thermoélectricité", Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, (2012).
- [2] <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01184854>
- [3] <https://blog.lendopolis.com>
- [4] <http://solargis.info>
- [5] www.algerie-eco.com
- [6] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [7] B. Brousse, Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques
Obtenues par dépôt physique, Thèse de doctorat, faculté de sciences et technique, spécialité: Électronique des hautes fréquences et optoélectronique, université de Limoges (France), 2004
- [8] Touil.N, Ghenbazi.S, « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque », MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued Septembre 2015.
- [9] CRDP de Basse-Normandie - thém@doc - Les énergies renouvelables, c'est quoi?
. Énergie solaire. [En ligne]
- [10] Salam Fatah, « Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque interconnecté au réseau électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif-UFAS, (2011).
- [11] Zerguine Bilal, "Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque", Mémoire de Magister, Université Badji Moktar Annaba, (2010).
- [12] Tchouar Ilhem, "Etude, modélisation, simulation de cellule solaire organique", Thèse de Doctorat en Sciences, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, (2011).
- [13] K. Kerkouche, F. Cherfa, A. Hadj Arab S. Bouchakour, K. Abdeladim et K. Bergheul " Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah », juin 2013
- [14] http://gerard.moreau13.free.fr/Guppy/file/Confort&domotique_09_04_2012/l-039optimisation-des-apports-solaires-et-energies-renouvelables-panneaux-photovoltaiques/sequence%20eleve/medias/ressources/historique_photovoltaique-0370346001296127371.pdf
- [15] http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF%20ENERGIE%20Mod3%20Fonctionnement%20technologies%20PV%20FR.
- [16] Ghaleb Fatiha, Bendjbar Kamel et Houari Souad, "Lumière et Cellule Solaire", Polycopie Travaux Pratique, Destiné aux étudiants en 3ème Année Licence, Option : Energie Renouvelable, Faculté de Physique, Département de Physique Energétique, Université d'Oran des Sciences et de la Technologie, (2015-2016).

[17] [https://ssl.Translatoruser.net/office transe/](https://ssl.Translatoruser.net/office%20transe/).

[18] Débile Mariamne, « Etude et optimisations en environnement d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electronique, Université Constantine I, (2015).

[19] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.

[20] Bensalem Salah Eddine, « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires », Mémoire de Magistère, Université Ferhat Abbas-Sétif (2011).

[21] AOUIFI . S, « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-1 UFAS (ALGERIE), 2014

[22] Makhlouf .M « Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application », thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.

[23] Bouguerra.T, « Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif », Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 30/06/2014.

[24] <https://webstore.iec.ch>

[25] T.U. Townsend, «A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems", University of Wisconsin, USA, (1989).

La source des données des températures : www.infoclimat.fr

La source des données des énergies : www.PVGIS.com