

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :
MESRANE HANI
SACI AKLI

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie Mécanique
Option : Energétique

Thème :

**Evaluation des performances énergétique et exergétiques d'un
Module photovoltaïque solaire**

Devant le jury composé de :

Mr. Lakhel	Grade	UAMOB	Président
Mme.bagheadadi	Grade	UAMOB	Encadreur
Mr.abarkane	Grade	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à
notre dieu de nos avoir donné la force et le

Courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement

Mme baghdadi .f notre promotrice

Enfin nos remerciements vont à tous ceux et
toutes celles qui ont participé de près ou de loin
à la réalisation de ce modeste travail.

Thanmirth nwen

Dédicaces

Nous avons le grand plaisir de dédier ce modeste

travail à :

Nos chers parents, Qui nous toujours soutenus

dans nos études

Tous nos frères et soeurs chacun avec son nom

Tous nos enseignants chacun avec son nom

Chaque personne qui nous aidé

Sommaire

Introduction général

Chapitre I : généralité sur l'énergie solaire

I.1. Introduction.....	1
I .2. Energie renouvelable	1
I .2.1 : classement et liste des EnR.....	2
I .3. Energie solaire.....	3
I .3.1. Energie solaire passive.....	3
I .3.2. Energie solaire active	4
I .3.3. L'utilisation directe de l'énergie solaire.....	4
I .3.3.1. Energie solaire thermique.....	4
I .3.3.2. Energie solaire thermodynamique	5
I .3.3.3.Energie solaire photovoltaïque	5
I.4. le soleil	5
I.4.1. présentation du soleil.....	5
I.4.2.Trajectoire apparente du soleil.....	6
I.4.3.Cordonnées du soleil.....	7
I.5. Cordonnées terrestres.....	11
I.5. 1.Longitude.....	11
I.5.2. Altitude.....	12
I.5.3.Latitude.....	12
I.6. Les paramètre de temps.....	12
I.7. Le rayonnement solaire.....	13
I.7.1 : Le rayonnement solaire direct.....	15
I.7.2. Le rayonnement solaire diffus.....	16
I.7.3. Le rayonnement global	17
I.8.Nomenclature des différents instruments de mesure du rayonnement.....	17

I.9. Gisement solaire.....	18
I.9.1. Gisement solaire mondial	18
I.9.2. Potentiel solaire en Algérie.....	18
I.10. avantage et inconvénients de l'énergie solaire.....	19
I.11. Conclusion	20

Chapitre II : Caractérisation d'une cellule photovoltaïque

II.1. Introduction.....	21
II.2. Définition d'une cellule solaire PV.....	21
II.3. Le générateur photovoltaïque GPV.....	22
II.3.1 Historique	22
II.3.2. L'effet photovoltaïque.....	23
II.3.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	23
II.4. Type des systèmes photovoltaïques.....	24
II.4.1. Systèmes hybrides.....	25
II.4.2. Systèmes connectés au réseau.....	25
II.4.3. Système photovoltaïque de pompage d'eau (Système autonome).....	26
II.5. Les technologies des cellules solaires.....	27
II.5.1. Cellule au silicium monocristallin	27
II.5.2. Le module au silicium poly cristallines.....	28
II.5.3. Le module au silicium amorphe.....	29
II.6. Association des cellules solaires	29
II.6. 1.1. Association en série.....	29
II.6. 1.2. Association en parallèle.....	31
II.6.1.3. Association mixte (en série et en parallèle).....	32
II.7. Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	33
II.7.1. Le modèle à deux diodes	33
II.7.2. Le modèle à une diode	34
II.7.2.a. Le modèle à cinq paramètres	34

II .7.2.b. Le modèle à quatre paramètres.....	35
II .8.Paramètres photovoltaïque.....	35
II .8.1. Courant de court-circuit (I_{cc}).....	36
II .8.2. Tension de circuit ouvert (V_{co}).....	37
II .8.3.Facteur de forme.....	38
II .8.4.Le rendement.....	39
II .9. Les types de pose des panneaux photovoltaïques	39
II .9.1. Panneaux photovoltaïques sur toit incliné	39
II .9.2. Panneaux photovoltaïques sur toit plat.....	40
II .9.3.Panneaux photovoltaïques sol sur structure.....	41
II .9.4. Panneaux PV sur suiveur solaire (ou tracker solaire).....	41
II .9.5. Panneaux photovoltaïques sur façade.....	42
II .9.6. Orientation et inclinaison des modules.....	43
II .10.conclusion.....	44

Chapitre III : modélisation et simulation d'un module PV

III .1.Introduction.....	45
III.2.Présentation de la structure du système photovoltaïque.....	45
III.2.1. La cellule photovoltaïque.....	45
III.2.2. Le module (panneau).....	46
III.2.3. Le générateur photovoltaïque	47
III.3. Modélisation et simulation d'une cellule PV	48
III.3.1. Modélisation d'une cellule PV	48
a. Le photo-courant.....	49
b. Le courant de saturation I_0	49
c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)....	50
d. Le courant du panneau.....	50
III.3.2.Simulation d'une cellule PV.....	51
III.4. Modélisation et simulation de module PV.....	51
III.4.1.Modélisation de module PV.....	51

III.4.2.Simulation du Module Photovoltaïque.....	53
III.4.2.1.Simulation avec logiciel pvsyst 7.2.....	54
III.4.3. Effets climatiques sur un module PV	55
III.4.3.1. Influence de l'éclairement sur un module.....	55
III.4.3.2. Influence de la température sur un module PV.....	57
III.4.3.3. Influence de la résistance série.....	59
III.4.3.4. Influence de la r parallèle.....	60
III.5. Simulation du Module Photovoltaïque par Matlab-Simulink.....	61
III.6.Simulation d'un générateur PV de 8 modules PV	63
II.7 Conclusion.....	65

Chapitre IV : étude énergétique et exégétiques d'un panneau PV

IV.1. Introduction.....	66
IV.2.étude énergétique et exégétiques d'un panneau PV.....	66
IV.2.1.étude énergétique.....	66
IV.2.1.1.le rendement de conversion (power conversion).....	66
a).Définition.....	66
B).Calcule du rendement de conversion	66
IV.2.1.2. rendement énergétique	84
IV.2.1.3 Étude énergétique sur le site d'Adrar	85
IV.2.2.étude exégétiques	85
IV.2.2.1.définition de l'exergie	85
IV.3.Conclusion	91
Conclusion générale	

Liste des Symboles – Abréviations

Indice	Mot clé	Unité
PV	Photovoltaïque	/
GPV	Générateur photovoltaïque	/
MPPT	Le maximum du point de puissance	[W]
Φ	Latitude	/
L	Longitude	/
δ	La déclinaison	/
n	Le numéro d'ordre du jour de l'année	/
ω	L'angle horaire	/
θ	angle d'incidence des rayons solaires	/
TSV	Temps Solaire Vrais	/
TU	Temps universel	/
TSM	Temps solaire moyen	/
TL	Le temps légal	/
h	Hauteur	[m]
C*	La constante solaire.	/
c_0^*	la valeur moyenne de la constante solaire	[W/m ²]
λ	Longitude	/
G	Rayonnement	[W/m ²]
I_s	Le courant de saturation sous polarisation inverse	[A]
V_{bi}	Étant la barrière de potentiel interne.	/
q	la constante de charge d'électron	/
I_{ssc}	le courant de court-circuit .association en série	[A]
V_{soc}	la tension de circuit ouvert. association en série	[V]

<i>V_{poc}</i>	la tension de circuit ouvert. association en parallèle	[V]
<i>I_{gsc}</i>	Courant de court-circuit du module résultant.	[A]
<i>V_{goc}</i>	Tension du circuit ouvert du module résultant.	[V]
<i>V_{co}</i>	Tension de circuit ouvert	[V]
<i>I_{cc}</i>	Courant de court-circuit	[A]
<i>E</i>	L'éclairement	[w/m ²]
<i>S</i>	Surface de la cellule ou du module	[m ²]
<i>H</i>	Angle horaire du soleil	/
<i>n</i>	le facteur d'idéalité	/
<i>I_{cc}</i>	courant de court-circuit	[A]
<i>U_{co}</i>	tension de circuit ouvert	[V]
<i>I_{psc}</i>		/
<i>T_c</i>	la température de la cellule	[C°]
<i>γ</i>	le facteur d'idéalité	/
<i>R_{sh}</i>	la résistance shunt	(Ω)
<i>R_s</i>	la résistance série	(Ω)
<i>FF</i>	facteur de forme	/
<i>P_{max}</i>	la puissance formée par le rectangle	[W]
<i>E</i>	L'éclairement	[w/m ²]
<i>S</i>	Surface de la cellule ou du module	[m ²]
<i>I_{sc}</i>	Le courant maximal	[A]
<i>I_{cell}</i>	Courant délivré par la photopile.	[A]
<i>I_{PH}</i>	Photo courant.	[A]
<i>I_d</i>	Courant de la diode.	[A]
<i>I_{rsh}</i>	Courant shunt.	[A]
<i>I_{cc}</i>	Courant de court-circuit du panneau	[A]
<i>K_i</i>	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau	[A/K]
<i>T</i>	Température ambiante.	[K]
<i>G</i>	Irradiation sur la surface de la module	[W/m ²]
<i>T_{ref}</i>	Température de référence (298 K).	[K]
<i>G_{ref}</i>	Irradiation de référence	[W/m ²]

E_g	Énergie de gap du semi-conducteur	[eV]
V_{oc}	Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).	[V]
q	Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °c).	°c
N_s	Nombre de cellules connectées en série.	/
A	Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).	/
K	Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).	[J/K]
N_s	Nombre de cellules connectées en série dans un module.	/
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.	/
A	Facteur de qualité de la diode.	/
P_{abs}	La puissance lumineuse absorbée par le panneau	[W]
η_{PC}	Rendement de conversion	/
η_{eng}	Rendement énergétique	/
A	Surface de module PV en m^2	m^2
T_a	Température ambiante	[C°]
T_s	Température DE soleil	[k]
T_{noct}	Température nominale de fonctionnement	[C°]
P	pression atmosphérique du lieu.	[Pa]

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau (I.1) : Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique.....15

Tableau (I.2) : Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.....16

Chapitre III :

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque REC 250PE.....53

Chapitre IV :

Tableau(IV.1) : les valeurs de rendement énergétique et de conversion a $T=25C^{\circ}$ et G varié.....84

Tableau(IV.2) : les valeurs de rendement énergétique et de conversion a $T=45C^{\circ}$ et G varié.....84

Tableau(IV.3) : les valeurs des rendements η_{PC} et η_{eng} pendant en journée.....85

Tableau(IV. 4):les valeur de (G.Imp.Vmp.Pmax)de 7:00 a19:00.....88

Tableau(IV. 5):les valures résuletan de calcule de T de module89

Tableau(IV.6):les valeur de exrgie d'entrée,sortie et de rendement exéregtique.....90

LISTE DES FIGURES

Chapitre I :

Figure (I.1) : Composition générale du soleil.....	6
Figure(I.2) : Repérage de la position du soleil.....	7
Figure(I.3) : Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année.....	8
Figure (I.4) : Variation de l'angle horaire en fonction du temps solaire vrai.....	10
Figure (I.5) : Coordonnées horizontales du soleil.....	11
Figure(I.6) : Cordonnée terrestre.....	12
Figure (I-7) : La variation de la band gap et le spectre solaire dans certains métal.....	14
Figure (I.8) : variation mensuelle de la constante solaire.....	15
Figure (I-9) : Moyenne annuelle du Rayonnement solaire journalier sur un plan horizontal.....	18
Figure (I.10) : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre.....	19

Chapitre II :

Figure (II.1) : Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque.....	24
Figure (II.2) : Schéma descriptif du système hybride.....	25
Figure (II.3) : Schéma descriptif du système connecté au réseau.....	26
Figure (II.4) : Système de pompage solaire.....	27
Figure (II-5) : Cellule au Silicium Monocristallin.....	27
Figure (II.6) : cellule poly cristalline.....	28
Figure (II.7) : Cellule au silicium amorphe (couche mince).....	29
Figure (II -8) : Association des modules en série.	30
Figure(II.9) : Caractéristique d'un groupement en série de ns cellules identiques.	30
Figure (II -10) : Association des modules en parallèle.	31
Figure (II -11) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de (ns) cellules identiques.	31
Figure (II -12) : Association mixte des modules.	32
Figure (II-13) : Caractéristique résultante d'un groupement mixte.....	32
Figure (II-14) : Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à sept paramètres.....	33
Figure (II-15) : Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à cinq paramètres.....	34

Figure (II.16) : Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à quatre paramètres.	35
Figure (II.17) : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.	36
Figure (II.18) : Le courant de court-circuit I_{cc} .	36
Figure (II.19) : La tension de circuit ouvert V_{co} .	37
Figure (II.20) : puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.	38
Figure (II.21) : Représentation du facteur de forme.	39
Figure (II.22) : Panneaux photovoltaïques sur toit incliné de maison.	40
Figure (II.23) : Panneaux photovoltaïques sur toit plat de bâtiment résidentiel.	40
Figure (II.24) : Panneaux photovoltaïques au sol sur structure.	41
Figure (II.25) : Panneaux photovoltaïques sur suiveur solaire.	42
Figure (II.26) : Panneaux photovoltaïques sur façade.	42
Figure (II.27) : Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau.	43
<u>Chapitre III :</u>	
Figure (III.1) : Coupe transversale d'une cellule PV.	46
Figure (III.2) : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.	47
Figure(III.3) : composition du système photovoltaïque.	47
Figure(III.4) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.	48
Figure (III.5) : Caractéristique $I(V)$ d'une module ($T=25^{\circ}C$, $G=1000W/m^2$).	54
Figure (III.6) : Caractéristique $P(V)$ d'une module ($T=25^{\circ}C$, $G=1000W/m^2$).	55
Figure (III.7) : Caractéristique $P(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}C$).	56
Figure (III.8) : Caractéristique $I(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^{\circ}C$).	57
Figure (III.9) : Caractéristique $I(V)$ pour différentes températures ($G=1000W/m^2$).	58
Figure (III.10) : Caractéristique $P(V)$ pour différentes températures ($G=1000W/m^2$).	58
Figure (III.11) : Caractéristique $P(V)$ pour différentes niveaux résistance, série($T=25^{\circ}C$).	59
Figure (III.12) : Caractéristique $P(V)$ pour différentes niveaux résistance, parallèle($T=25^{\circ}C$).	60
Figure (III.13) : Schéma bloc du module PV en MATLAB-SIMULINK.	61
Figure (III.14) : Caractéristique $P(V)$ d'une module ($T=25^{\circ}C$).	62
Figure (III.15) : Caractéristique $I(V)$ d'une module ($T=25^{\circ}C$).	62
Figure (III.16) : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.	63
Figure (III.17) : Caractéristique $P(V)$ d'une générateur ($T=25^{\circ}C$).	64

Figure (III.18) : Caractéristique I(V) d'un générateur ($T=25^{\circ}\text{C}$).....	64
---	----

Chapitre IV :

Figure (IV.1) : Caractéristique P(V) pour ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	67
Figure (IV.2) : Caractéristique I(V) pour ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	68
Figure (IV.3) : Caractéristique P(V) pour ($G=200\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	69
Figure (IV.4) : Caractéristique I(V) pour ($G=200\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	70
Figure (IV.5) : Caractéristique P(V) pour ($G=400\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	71
Figure (IV.6) : Caractéristique I(V) pour ($G=400\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	71
Figure (IV.7) : Caractéristique P(V) pour ($G=600\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	72
Figure (IV.8) : Caractéristique I(V) pour ($G=600\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	73
Figure (IV.9) : Caractéristique I(V) pour ($800\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	74
Figure (IV.10) : Caractéristique P(V) pour ($G=800\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^{\circ}\text{C}$).....	75
Figure (IV.11) : Caractéristique P(V) pour ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	76
Figure (IV.12) : Caractéristique P(V) pour ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	76
Figure (IV.13) : Caractéristique P(V) pour ($G=800\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	77
Figure (IV.14) : Caractéristique I(V) pour ($G=800\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	78
Figure (IV.15) : Caractéristique P(V) pour ($G=600\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	79
Figure (IV.16) : Caractéristique I(V) pour ($G=600\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	79
Figure (IV.17) : Caractéristique P(V) pour ($G=400\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	80
Figure (IV.18) : Caractéristique I(V) pour ($G=400\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	81
Figure (IV.19) : Caractéristique P(V) pour ($G=200\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	82
Figure (IV.20) : Caractéristique I(V) pour ($G=200\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^{\circ}\text{C}$).....	82
Figure (IV.21) : Le rendement de conversion à $T=25^{\circ}\text{C}$ et $T=45^{\circ}\text{C}$	83
Figure (IV.22) : variation de vitesse de vent en fonction de temps $V=F(t)$	87
Figure (IV.23) : variation des irradiances en fonction de temps.....	87
Figure (IV.24) : variation de température du module et de température ambiante en fonction de temps (une journée).....	89

Introduction générale

L'énergie reste un facteur clé du développement social et économique. Il est devenu de plus en plus problématique avec les prix élevés du pétrole d'une part et les conséquences environnementales de l'utilisation des combustibles fossiles.

Aujourd'hui, différentes formes d'énergie renouvelable sous différentes technologies (solaire, éolienne, hydroélectrique et biomasse) offrent une grande flexibilité et fiabilité pour pallier les pénuries d'énergie dues à une demande accrue.

Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque constitue la solution la plus avantageuse. L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertir directement le rayonnement lumineux à un courant continu grâce à des modules photovoltaïques, Ensuite l'onduleur convertit le courant continu en courant alternatif utilisable.

Cependant, les constructeurs ne tiennent pas suffisamment compte des conditions dans lesquelles les modules photovoltaïques sont appelés à fonctionner dans des conditions réelles (température, humidité, UV, poussières, ... etc.). Notre étude se concentre principalement sur l'évaluation des performances énergétiques et exergétiques d'un module photovoltaïque. Notre étude présentée et rédigée en quatre chapitres qui se résument comme suit'

Dans le premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les énergies renouvelables en générales et en particulier sur l'énergie solaire aussi on va définir quelques notions sur l'énergie solaire comme les données astronomiques, le gisement solaire, Appareils de mesures du rayonnement solaire qui permet d'assurer la mesure du rayonnement global, Rayonnement diffus Rayonnement direct et Rayonnement réfléchi. Le deuxième chapitre est consacré à les présentations de la cellule photovoltaïque et l'effet photovoltaïque Ensuite on donne les caractéristiques de la cellule PV, les types de systèmes photovoltaïques, et la technologie des cellules (silicium, Cristalline, Etc.), les types d'associations des cellules et en fin on va voir l'effet de certains paramètres comme l'éclairement et la température de la cellule. Le troisième chapitre il est consacré à la simulation et la modélisation d'un module PV en utilisant l'outil MATLAB -SIMULINK et PVSyst pour faire la simulation de comportement de la cellule, module et du générateur PV. Nous terminons notre présent mémoire par l'étude énergétique et exergétique d'un module photovoltaïque. Les différents résultats sont présentes dans les figure et tableaux de chapitre 4.

Enfin comme observation, on inclue que les paramètres métrologiques (le vent, irradiation, température) influent directement sur l'évaluation des performances énergétique et exergétique d'un module PV.

Chapitre I : généralité sur l'énergie solaire

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie et biomasse) se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est produite par une source que la nature renouvelle en permanence, contrairement à une énergie dépendant de sources qui s'épuisent. Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales : le soleil, la terre. [1]

Le soleil est la source essentielle de tout rayonnement reçu par la terre, ce dernier lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie. Pour cette raison on va définir dans ce premier chapitre quelques notions sur l'énergie solaire comme la géométrie solaires, les données astronomiques, les type de rayonnement et le gisement solaire et définir Appareils de mesures du rayonnement solaire qui permet d'assure la mesure du rayonnement global, Rayonnement diffus Rayonnement direct et Rayonnement réfléchi.

Le soleil est une source d'énergie. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires. L'énergie solaire est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, le soleil bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous .Cette distance varie peu au cours de l'année (+/- 1.65 %) car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée ($e= 0.017$), d'où la terre suit une révolution elliptique autour du soleil (en réalité elle est légèrement circulaire).

I .2. Energie renouvelable

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstitua plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des

combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ». Le faible impact environnemental de leur exploitation en fait un élément majeur des stratégies RSE des entreprises en matière de développement durable. [2]

I.2.1. Classement et liste des EnR

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

- **Energie solaire**

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité.

- **Energie éolienne**

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes... Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables.

- **Energie hydraulique**

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité. Les énergies marines font partie des énergies hydrauliques.

- **Biomasse**

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales :

- Le bois
- Le biogaz
- Les biocarburants

- **Géothermie**

L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité.

I .3. Energie solaire

Le soleil est l'origine de la plupart des sources d'énergie, A l' origine du cycle du vent et de L'eau, transformé en énergie par les plantes grâce à la photosynthèse dont nous disposons sans son énergie, aucune vie sur terre ne serait possible, pour cela il y a une distinction entre l'énergie Solaire directe et indirecte. Les systèmes Technique employant l'énergie solaire directe convertissent le rayonnement solaire entrant directement en énergie utile, par exemple l'électricité ou la chaleur ou la lumière (l'éclairage).Vent, eau de rivière et biomasse sont les formes indirectes d'énergie solaire. Ici, les processus normaux convertissent énergie solaire dans d'autres types d'énergie. [3]

I .3.1. Energie solaire passive

Elle remplace avantageusement les énergies conventionnelles utilisées pour chauffer ou refroidir les bâtiments. L'énergie solaire passive, capable de fonctionner seule sans apport l'énergie extérieure, elle utilise l'architecture des bâtiments, l'orientation des murs, toits et fenêtres pour capter les rayons du soleil. [4]

I .3.2. Energie solaire active

A l'aide de capteurs solaires, le capteur solaire actif transforme les rayons solaires en énergie Thermique, Il emploie une source d'électricité supplémentaire pour actionner des pompes ou des ventilateurs qui distribuent l'énergie solaire à l'intérieur du bâtiment.

Celle-ci Est acheminée vers un autre endroit, ou elle sera utilisée immédiatement ou stockée en vue d'un usage ultérieur. Le transfert de chaleur s'effectue au moyen d'un fluide caloporteur, qui peut-être de l'eau, de l'antigel ou de l'air.

On utilise les systèmes solaires actifs principalement pour le chauffage de l'air et de l'eau.

Il existe d'autres applications telles que la climatisation, le séchage de produit, la détoxification d'eau contaminée et la production d'énergie électrique d'origine thermique. [5]

I .3.3. L'utilisation directe de l'énergie solaire

Ce qui nous intéresse c'est l'utilisation directe de l'énergie solaire. Cette dernière est Transmise à la Terre à travers l'espace sous forme de particules d'énergie, les photons du Rayonnement.

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques : la conversion du Rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques (conversion hélio- thermique), et Sa transformation en électricité grâce à des panneaux photovoltaïques (conversion électrique). Ces transformations ont permis le développement de 3 filières d'exploitation.

- Pour l'électricité : solaire thermodynamique.
- Pour l'électricité : solaire photovoltaïque.
- Pour la chaleur : solaire thermique.

I .3.3.1. Energie solaire thermique

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

I .3.3.2. Energie solaire thermodynamique

La solaire thermodynamique utilise le rayonnement solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélio-thermoélectriques. Trois types principaux de centrales sont utilisés [6] :

- Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques.
- Les centrales à capteurs paraboliques.
- Les centrales à tour.

I .3.3.3.Energie solaire photovoltaïque

Elle permet de produire de l'électricité par la transformation d'une partie du rayonnement solaire par l'utilisation des modules photovoltaïques. Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé.

I.4. le soleil**I.4.1. présentation du soleil**

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Il est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène Et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint presque 15 millions de degrés Celsius.

Autour de lui gravitent la Terre (à la vitesse de 30 km/s) à une distance moyenne De 149598000 km. Vu de la terre, le soleil tourne autour de son axe. Le soleil ne tourne pas comme Un corps solide :

- La rotation de l'équateur s'effectue environ dans 27 jours.
- Les régions polaires durant 30 jours.

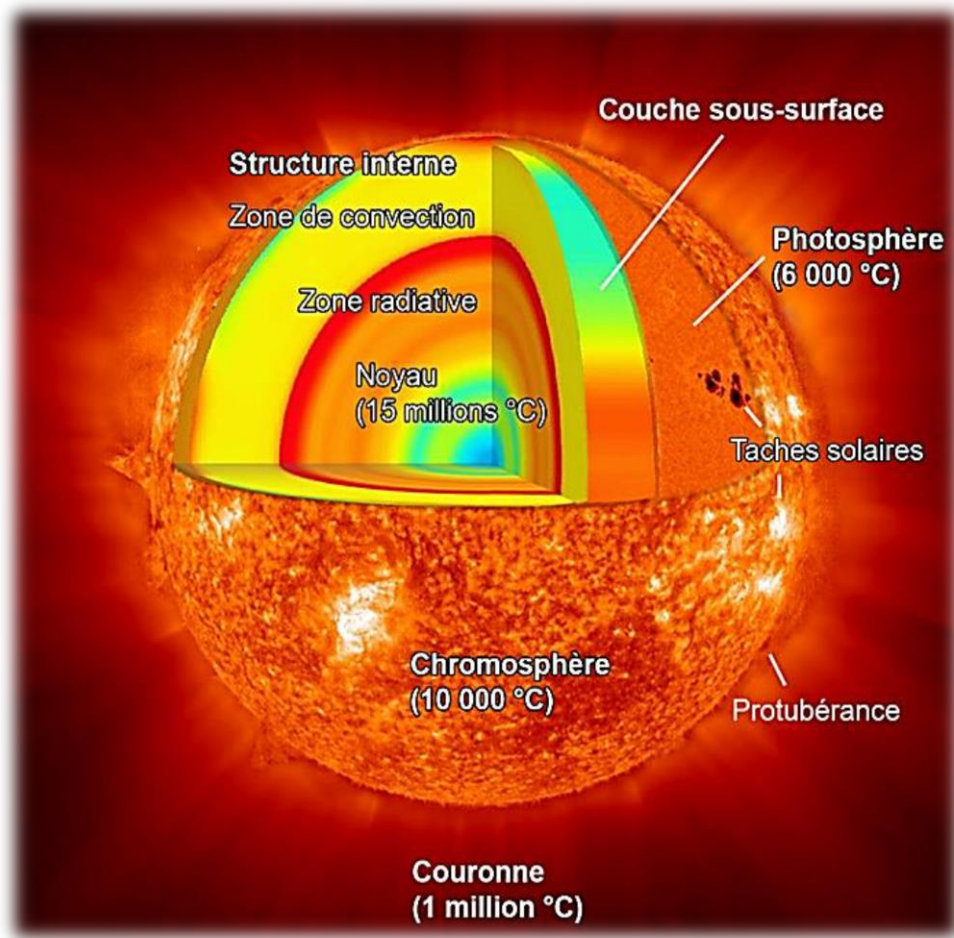


Figure (I.1) : Composition générale du soleil.

I.4.2. Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve, voir figure (I.3).

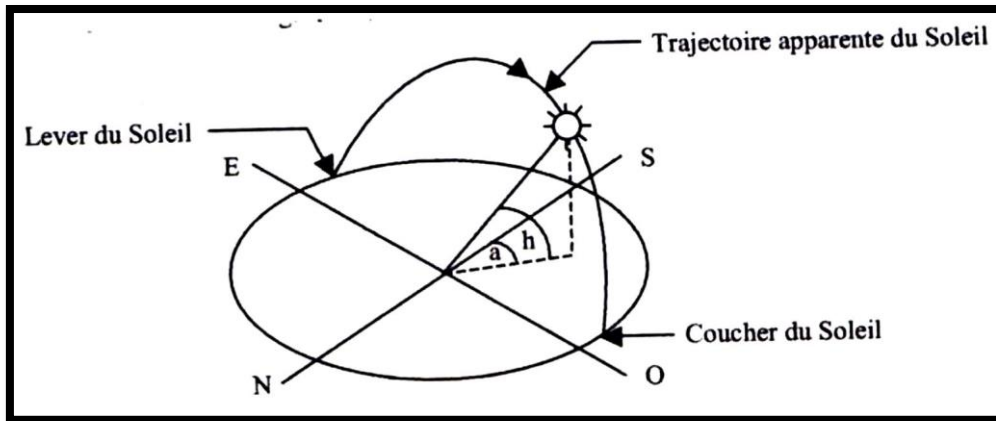


Figure (I.2) : Repérage de la position du soleil [7].

I.4.3. Cordonnées du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents. [8]

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

- Coordonnées équatoriales

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

- **Déclinaison solaire (δ)**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation : [8]

$$\delta = 23.45 \times \sin \left[\frac{360}{365} (J - 80) \right] \tag{I - 1}$$

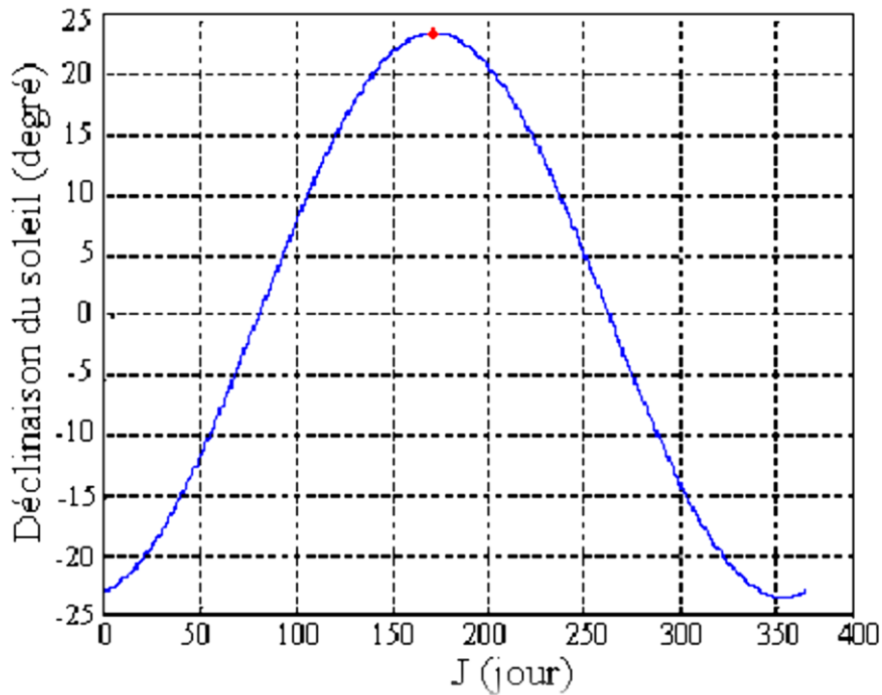
Ou avec plus de précision :

$$\delta = \text{Arc sin} \left[0.389 \times \sin \left[\frac{360}{365} (J - 82) \right] + 2 \times \sin \left[\frac{360}{365} (J - 2) \right] \right] \tag{I - 2}$$

Avec :

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c.-à-d. varie de 1 À 365 ou 366 selon l'année.

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la Figure (I-4) :



Figure(I.3) : Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année. [8]

δ : varie entre deux valeurs extrêmes : $-\delta_0 < \delta < +\delta_0$ avec $\delta_0 = 23.45^\circ$.

$\delta = 0$ aux équinoxes (E.P, E.A)/ Les équinoxes représentent les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, l'équinoxe automnal, le 23 septembre, marquant le début de la chute de la durée de la journée, et l'équinoxe printanier le 21 mars, marquant le début de l'accroissement de la durée du jour. [8]

$\delta = 23.45^\circ$: au Solstice d'été (S.E) (au 21 juin), nous observons que le soleil est à son point le plus élevé dans le ciel. Elle marque le début de l'été dans l'hémisphère nordique.

$\delta = -23.45^\circ$: au Solstice d'hiver (S.H) (au 21 décembre).

$\delta > 0$: aux E.P - S.E- E.A

$\delta < 0$: aux E.A -S.H- E.P

- Angle horaire du soleil H

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée

Selon la relation : [8]

$$H = 15 \text{ TSV} - 12 \tag{I - 3}$$

Avec :

$$\text{TSV} = \text{TL} - \text{TU} + \frac{(\Delta t + \Delta \lambda)}{60} = \text{TL} - \left(-\frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \tag{I - 4}$$

$$\Delta t = 9.87 \times \sin\left\{\left[\frac{360}{365}(J - 81)\right] - 7.35 \times \left[\frac{360}{365}(J - 81)\right] - 1.5 \times \left[\frac{360}{365}(J - 81)\right]\right\} \tag{I - 5}$$

TU : Temps universel : est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

Pour l'Algérie : TU = +1.

TL : Temps légal : temps donné par une montre.

Δt : correction de l'équation du temps.

λ : Longitude du lieu.

H > 0 : après midi.

H < 0 : le matin.

H = 0 : midi TSV

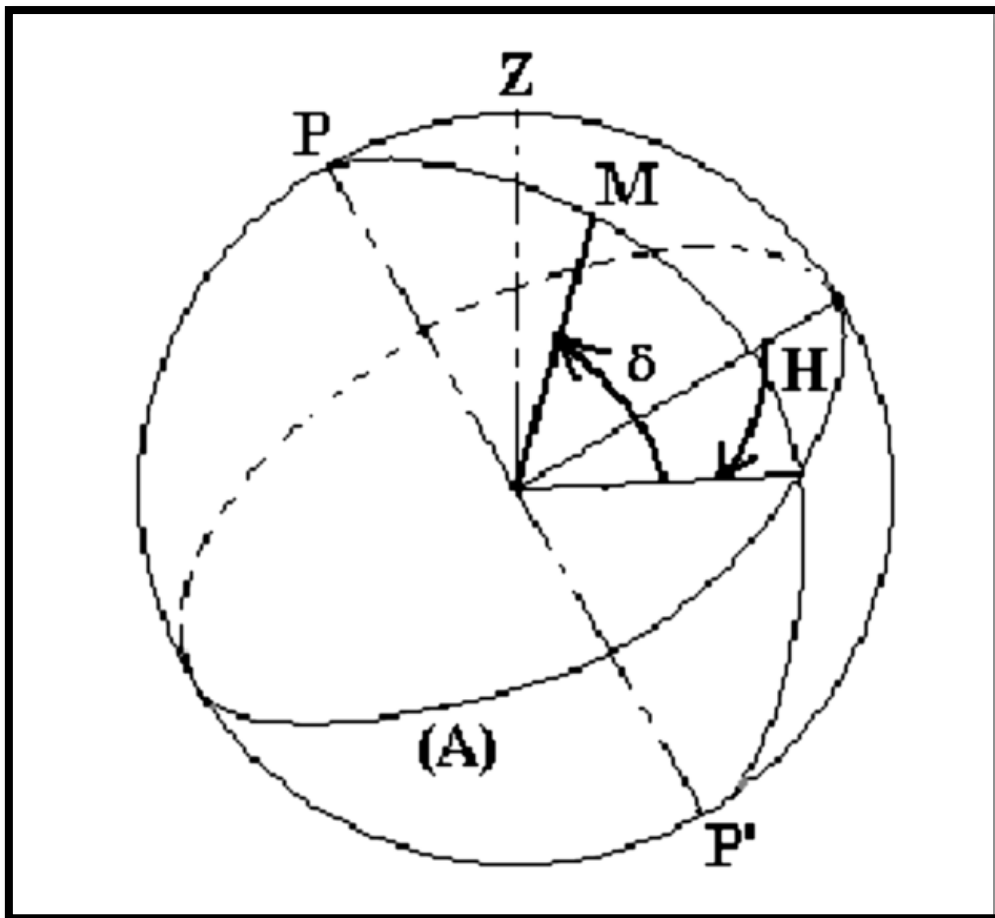


Figure (I.4) : Variation de l'angle horaire en fonction du temps solaire vrai [7]

- Coordonnées horizontales du soleil

La position du soleil à un instant considéré est donnée par l'azimut du soleil a et Son élévation h (voir figure I.5).

- Azimut (a)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan Horizontal et la direction du Sud.

L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation : [8]

$$\sin a = \frac{(\cos \delta \times \sin H)}{\cos h} \quad (\text{I} - 6)$$

A : varie entre -180° et 180° .

On prend :

- $a > 0$: vers l'ouest.

- $a < 0$: vers l'est.

- $a = 0$: direction du sud.

- Hauteur (h)

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan D'horizontal.

La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la

Relation suivante : [8]

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos H + \sin \varphi \times \sin \delta \varphi \quad (\text{I} - 7)$$

La hauteur du soleil varie entre -90° et $+90^\circ$.

- $h = 0$ aux lever et coucher.

- $h > 0$ le jour.

- $h < 0$ la nuit.

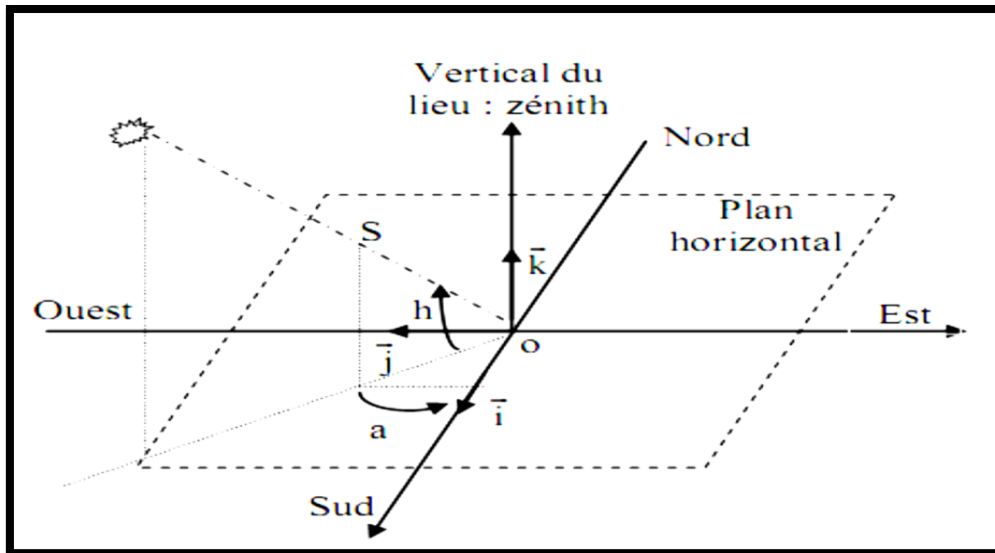


Figure (I.5) : Coordonnées horizontales du soleil. [9]

I.5. Cordonnées terrestres

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont la longitude, la latitude, ainsi que par son altitude, voir figure (1.7).

I.5. 1.Longitude

La longitude (λ) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180 et 180° . A tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. [8]

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

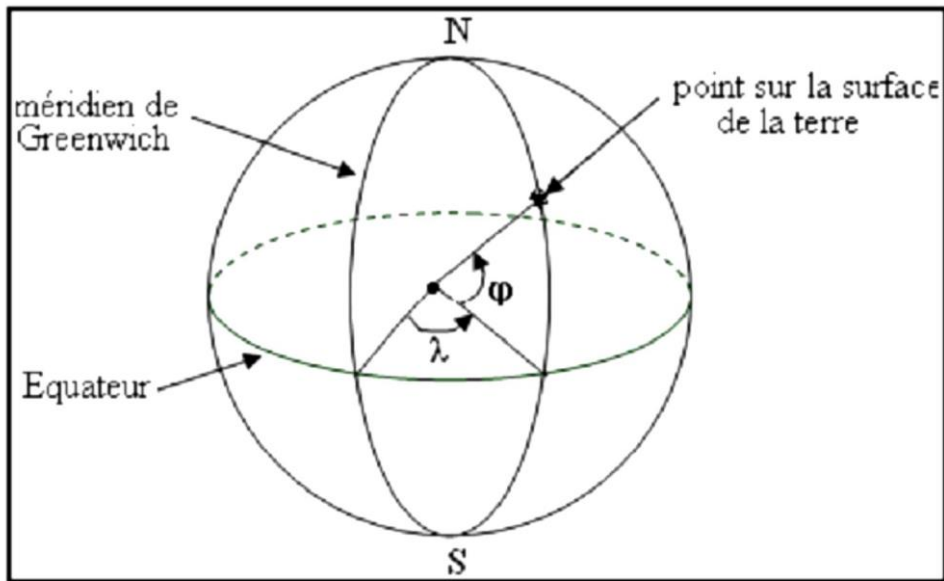
I.5.2. Altitude

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer). [8]

I.5.3.Latitude

L'angle (φ) de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Par convention, le signe (+)

est affecté à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et $+90^\circ$.



Figure(I.6) : Cordonnée terrestre. [8]

I.6. Les paramètre de temps

On distingue : [6]

- Le temps solaire vrai (TSV) est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression :

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} = 12 + \frac{H}{15} \quad (\text{I} - 8)$$

- Le temps solaire moyen (TSM) est donné par :

$$TSV - TSM = ET \quad (\text{I} - 9)$$

- ET est l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM [6] [10] :

$$ET = 9.87 \times \sin(2 \times \dot{N}) - 7.53 \times \cos(\dot{N}) - 1.5 \times \sin(\dot{N}) \quad (\text{I} - 10)$$

$$\dot{N} = (n - 81) \times \frac{360}{365} \quad (\text{I} - 11)$$

- Le temps universel (TU) est le temps moyen de Greenwich :

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (\text{I} - 12)$$

- Le temps légal (TL) est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{I} - 13)$$

ΔH : Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

I.7. Le rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires produites au cœur génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral les rayons X et gamma jusqu'à l'infra rouges (I.R) lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8 μ m.

La constante solaire

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire. La variation de la constante solaire suit la relation suivante

$$C^* = c_0^* + 0.033 \times \cos(0,948 \times n) \quad (\text{I} - 14)$$

C^* : la constante solaire.

$c_0^* = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue.

n : le numéro du jour de l'année.

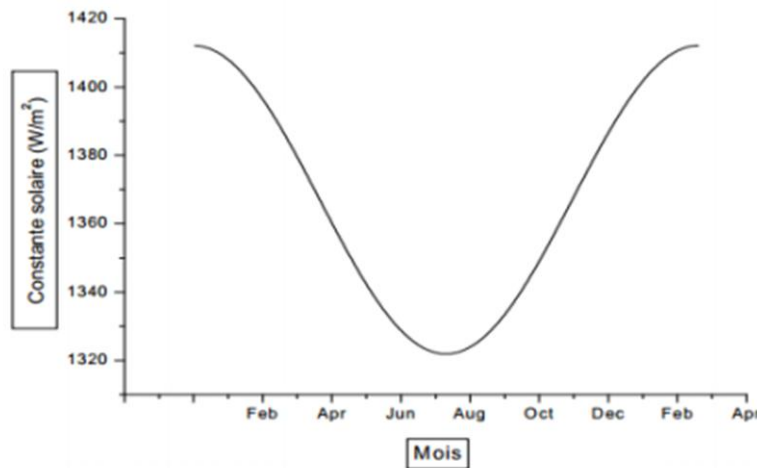


Figure (I.8) : variation mensuelle de la constante solaire. [10]

I.7.1 : Le rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair. L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire (Tableau I-2).

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par :

$$\tau_{dir} = a \times \exp \frac{-p \times b}{1000 \times \sin h} \quad (I - 15)$$

a, b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h : hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau (I.1) : Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique.

Le tableau I-3 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	2500
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau (I.2) : Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par [9]:

$$G_{dirh} = C^* \times \tau_{dir} \quad (\text{I} - 16)$$

G_{dirh} : Éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

L'éclairement énergétique (G_{dir}) reçu sur un plan incliné est donné par :

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos \theta \quad (\text{I} - 17)$$

θ : angle d'incidence des rayons solaires.

I.7.2. Le rayonnement solaire diffus [9]

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réflexion par le sol, il parvient de toute la voûte céleste. La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est :

$$\tau_{dir} = 0.271 - 0.2939 \times \tau_{dif} \quad (\text{I} - 18)$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par :

$$G_{dirh} = C^* \times \sin(h) \times \tau_{dif} \quad (\text{I} - 19)$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par [9] :

$$G_{dif} = G_{dif1} + G_{dif2} \quad (\text{I} - 20)$$

$$G_{dif1} = G_{difh} \times \frac{1+\cos(i)}{2} \quad (\text{I} - 21)$$

$$G_{dif2} = alb \times \frac{1+\cos(i)}{2} \times (G_{difh} \times \sin(h) + G_{difh}) \quad (\text{I} - 22)$$

G_{dif1}, G_{dif2} : rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

alb : albédo du sol.

i : angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

I.7.3. Le rayonnement global

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct [9] :

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (\text{I} - 23)$$

I.8. Nomenclature des différents instruments de mesure du rayonnement

▪ Pyradiomètre

Instrument de mesure du rayonnement total parvenant sur une surface à partir d'un angle solide 2π stéradians ; il sert principalement à la mesure du Rayonnement total descendant, somme des rayonnements solaire et Atmosphérique dirigés vers le sol.

▪ Pyranomètre

Instrument destiné à mesurer le rayonnement global G parvenant à une Surface plane à partir d'un angle solide 2π stéradians ; lorsque l'appareil est Muni d'un dispositif pare-soleil, il peut mesurer le rayonnement diffus D .

▪ Pyrhéliomètre

Instrument mesurant le rayonnement solaire direct I , l'appareil est Orientable de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons Solaires.

- **Pyrradiomètre différentiel ou bilanmètre**

Mesure le bilan du rayonnement total, différence entre le rayonnement total descendant et le rayonnement total ascendant (rayonnement solaire et Atmosphérique renvoyés vers l'espace).

- **Héliographe**

Instrument de mesure et d'enregistrement de la durée de l'insolation.

I.9. Gisement solaire

I.9.1. Gisement solaire mondial [12]

L'énergie solaire reçue est inégalement répartie dans le monde. Dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre 2 300 kWh/m².an (Energie reçue par une surface de 1 m² pendant une année). En Europe centrale l'ensoleillement moyen est de 1100 kWh/m².an.

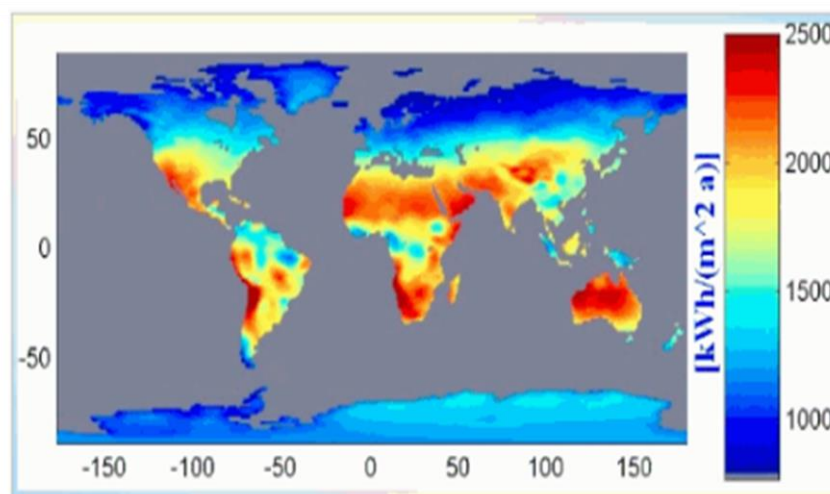


Figure (I.9) : Moyenne annuelle du Rayonnement solaire journalier sur un plan horizontal.

[11]

I.9.2. Potentiel solaire en Algérie [12]

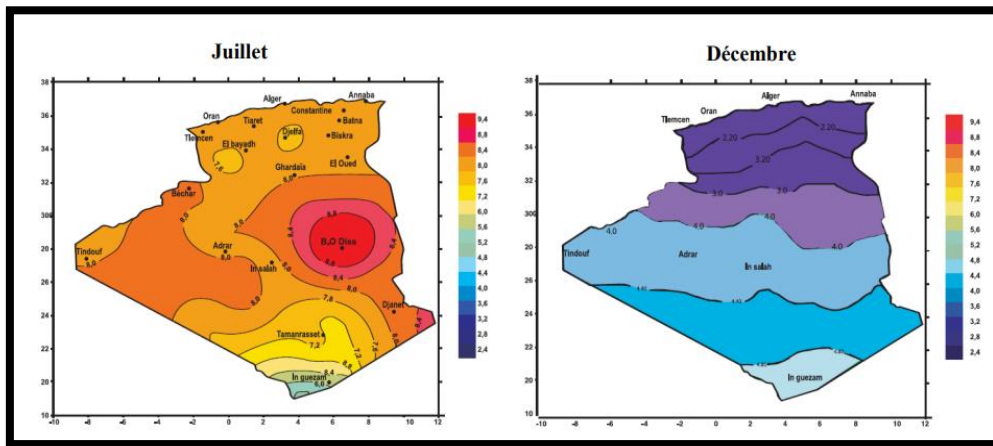
L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une

surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit

Près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montré que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen.

L'Algérie a un gisement solaire de plus de 2000 kWh/m².



Figure(I.10). : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal aux mois de Juillet et Décembre. [12]

I .10.AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉNERGIE SOLAIRE :

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et D'inconvénients qui sont : [13]

Avantage

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages :

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance Pendant de longues périodes
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie où à un Approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de Système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.

- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend Particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins Spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des Besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des Applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit Et non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

Inconvénients

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- la fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le Coût très élevé.
- le rendement réel d'un module photovoltaïque et de l'ordre de 10 à 15 % ,
- ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continu et de faible voltage (< à 30 V)
Donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

I .11.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions importantes sur l'énergie solaire en générale (géométrie solaires, les données astronomiques, les type de rayonnement et le gisement solaire et définir Appareils de mesures du rayonnement solaire qui permet d'assure la mesure du rayonnement global), destinée pour le public dans le secteur photovoltaïque.

Chapitre II : Caractérisation d'une cellule photovoltaïque

II.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du Rayonnement solaire. L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque consiste à convertir directement.

Le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour ce faire des modules ou panneaux photovoltaïques, composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie.

La conversion photovoltaïque est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur.

Le capteur photovoltaïque est décrit par ses caractéristiques courantes tensions I-V.

La modélisation est utilisée généralement pour approximer la sortie du capteur et de la puissance en fonction de deux entrées qui sont la température de la cellule et l'éclairement reçu par le capteur.

La cellule photovoltaïque, les mécanismes de la conversion de la lumière en Électricité ainsi que les différents paramètres qui influencent sur le rendement D'une cellule sont présentés dans ce deuxième chapitre.

II.2. Définition d'une cellule solaire PV

Une cellule photovoltaïque également dénommée cellule solaire est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue. Dans l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique. Selon que la tension appliquée est supérieur ou inférieur à une tension de seuil, la diode est respectivement passante ou bloquante. Le courant I_d dans la diode suit une équation de type Shockley, soit :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II} - 1)$$

Avec :

I_s : Le courant de saturation sous polarisation inverse.

$$V = V_{\text{appliquée}} - V_{bi} \quad (\text{II} - 2)$$

V_{bi} : étant la barrière de potentiel interne.

n : le facteur d'idéalité ($0 < n \leq 1$ ou 1 correspond au cas idéal).

k : la constante de Boltzmann, 1.38×10^{-23} j/k.

q : la constante de charge d'électron, 1.602×10^{-19} C.

T : température de la cellule à 25°C.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et séléniure d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté. L'équation déterminant le courant est alors pour une diode idéale :

$$I = I_s \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) - I_{pH} \quad (\text{II} - 3)$$

Avec :

I_{pH} : est le photo-courant généré.

I : le courant de circuit extérieur.

II.3. Le générateur photovoltaïque GPV

II.3.1 Historique [1]

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- ❖ **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- ❖ **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- ❖ **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

- ❖ **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- ❖ **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- ❖ **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- ❖ **1995** : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été Lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

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

II.3.2. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [2] .

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé .Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [3]. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de gallium et l'arséniure de gallium.

II.3.3.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4] [5]

La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'élément de base de l'effet Photovoltaïque (ou conversion par photopiles) permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce phénomène implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (qui est la plupart du temps, le silicium). En heurtant la surface de ce matériau, les photons transfèrent leur énergie aux électrons contenus dans la matière dopée négativement et positivement (Jonction p-n). Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant

électrique continu (I_{cc}) qui est recueilli par des fils métalliques très fins micro soudés en surface (voir figure (II.1)).

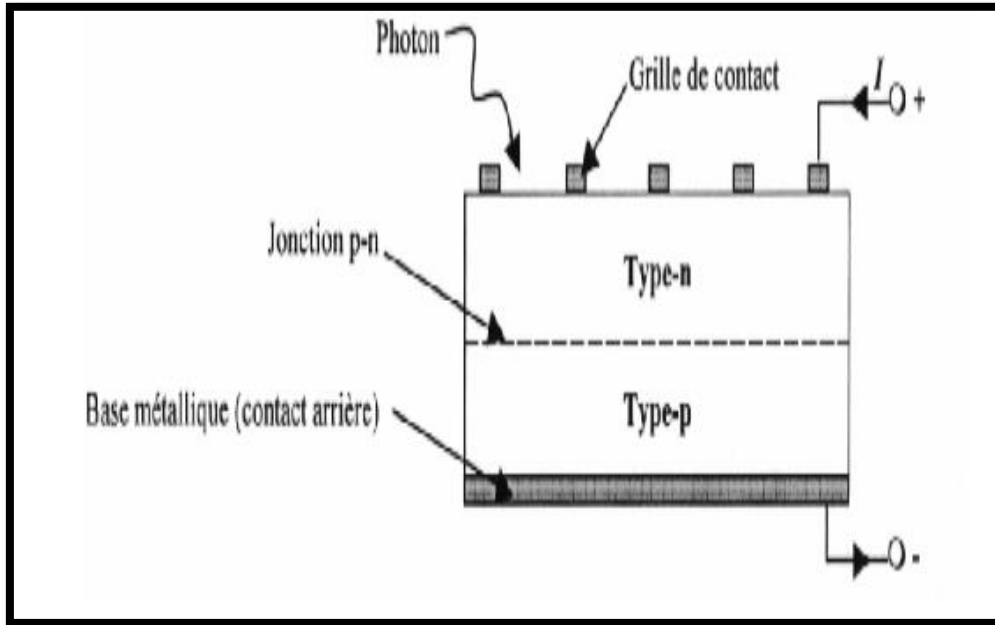


Figure (II.1): Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque. [4] [5]

La cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopé P (Dopé au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une Jonction PN avec une barrière de potentiel [6]. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charge N) et des trous (charge P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (U_{co}) [7]. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.

II.4.Type des systèmes photovoltaïques [8]

Les deux genres des systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les Systèmes hybrides et connectés à un réseau. Le premier est indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions Éloignées.

II.4.1. Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois.

Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer notre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

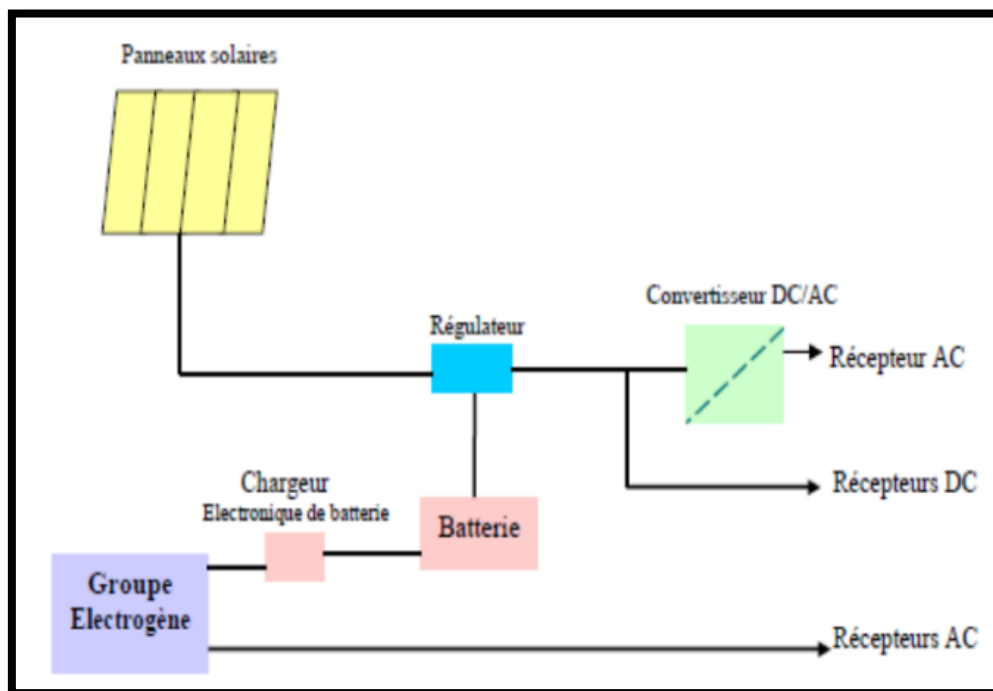


Figure (II.2) : Schéma descriptif du système hybride. [8]

II.4.2. Systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation sans demander de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter

La capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin ; ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une

batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau, mais ce n'est pas nécessaire.

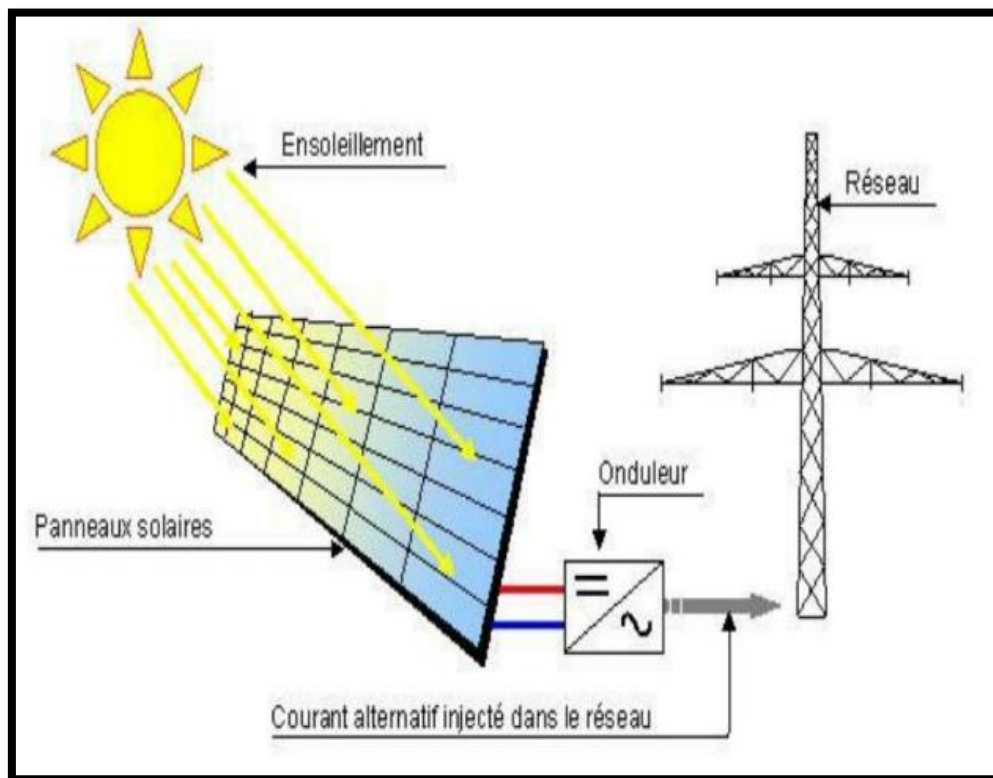


Figure (II.3) : Schéma descriptif du système connecté au réseau. [8]

II.4.3. Système photovoltaïque de pompage d'eau (Système autonome)

Le pompage solaire représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent (alimentation en eau pour un usage domestique, pour l'irrigation agricole, ...etc.). D'autre part, l'énergie photovoltaïque ne présente aucun risque de pollution de l'eau, contrairement aux générateurs diesel où des écoulements de combustible peuvent se produire. [9]

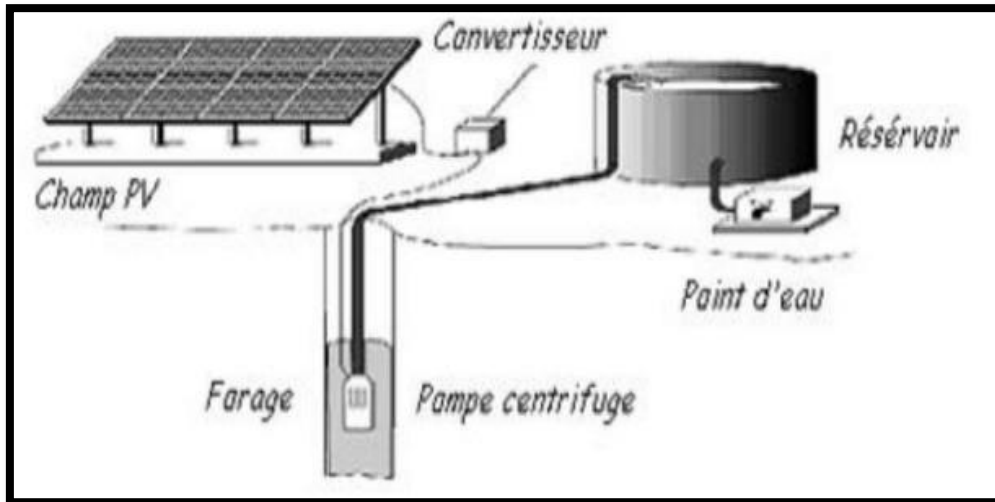


Figure (II.4) : Système de pompage solaire. [9]

II.5. Les technologies des cellules solaires

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur PV [10].

II.5. 1. Cellule au silicium monocristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher [11].

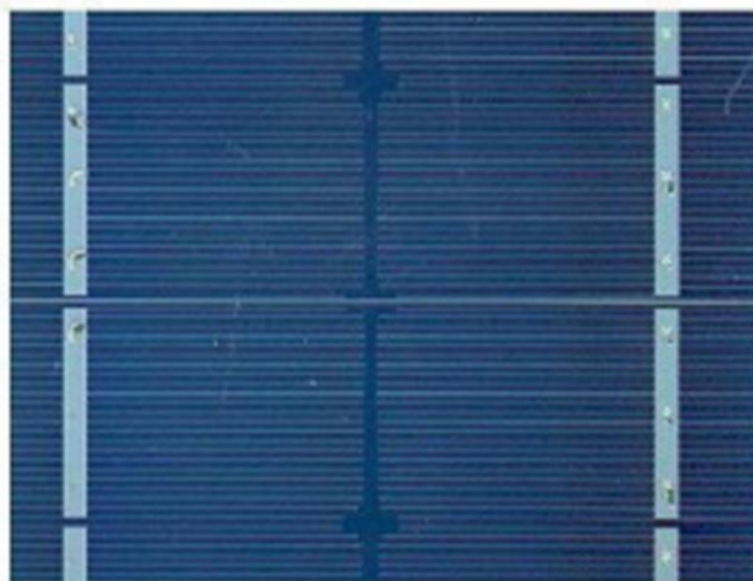


Figure (II-5): Cellule au Silicium Monocristallin [12].

II.5.2. Le module au silicium poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).

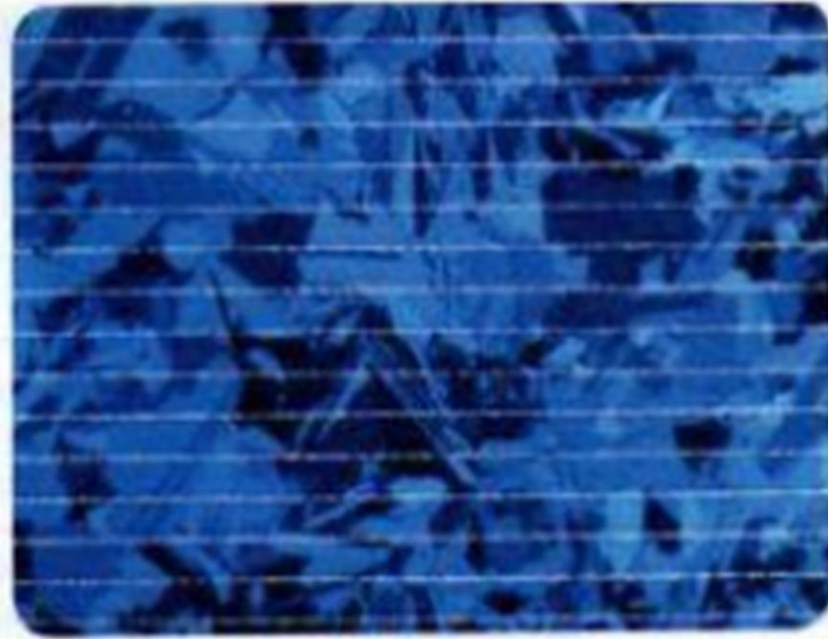


Figure (II.6) : cellule poly cristalline. [12]

II.5.3. Le module au silicium amorphe

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en Laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

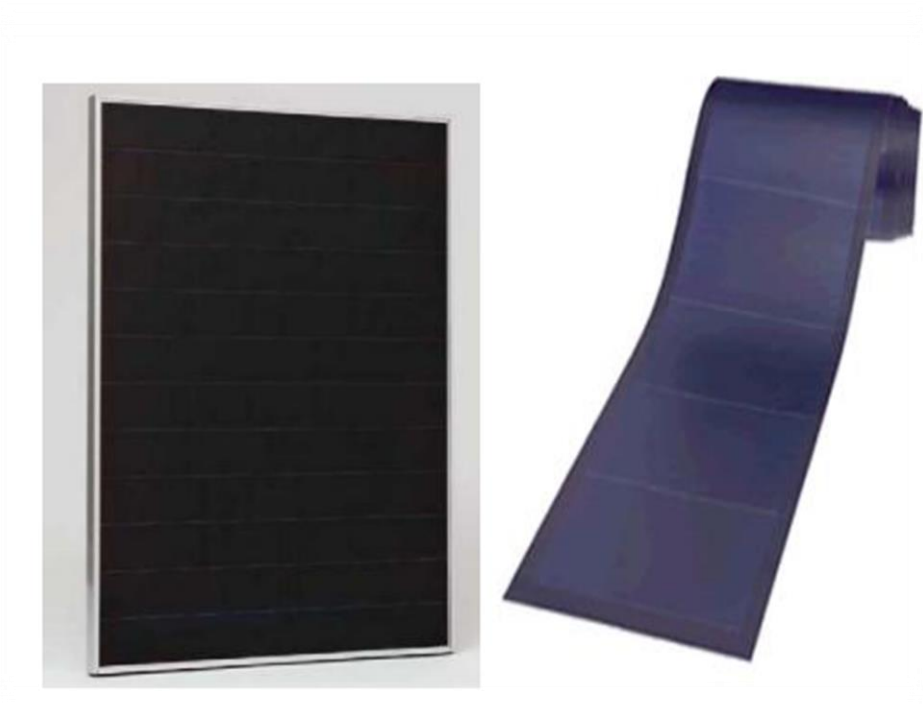


Figure (II.7): Cellule au silicium amorphe (couche mince) [12].

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment). Et actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel.

II.6. Association des cellules solaires [13]

II.6. 1.1. Association en série

Dans un groupement en série figure II -8, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. La figure II.9 montre la caractéristique I-V résultante obtenue par l'association en série de (ns) cellules identiques.

Avec :

$I_{ssc} = I_{sc}$: le courant de court-circuit.

$V_{soc} = ns \times V_{oc}$: la tension de circuit ouvert.

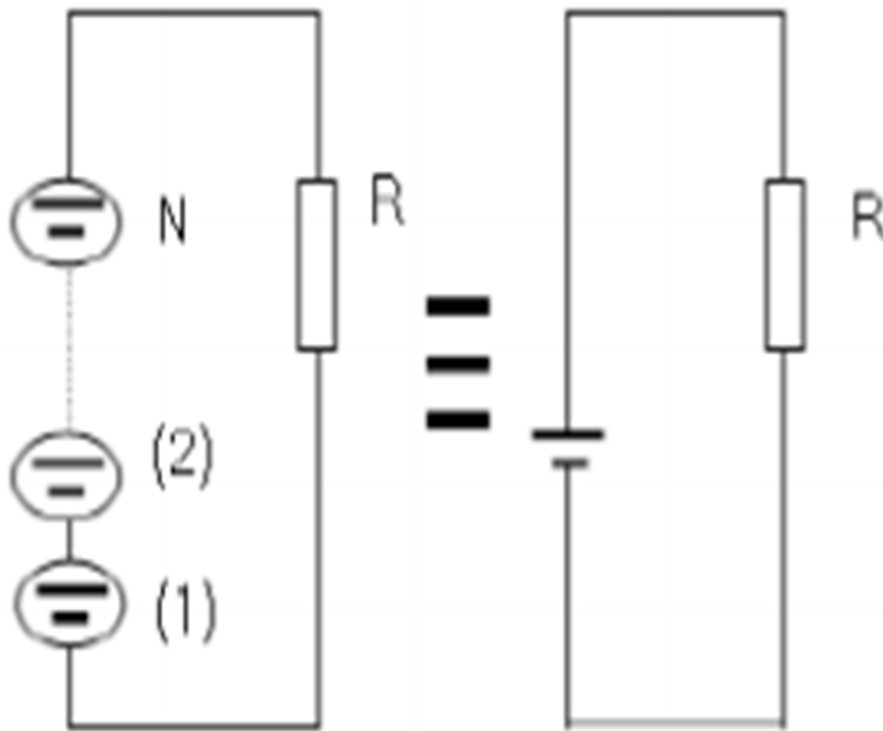
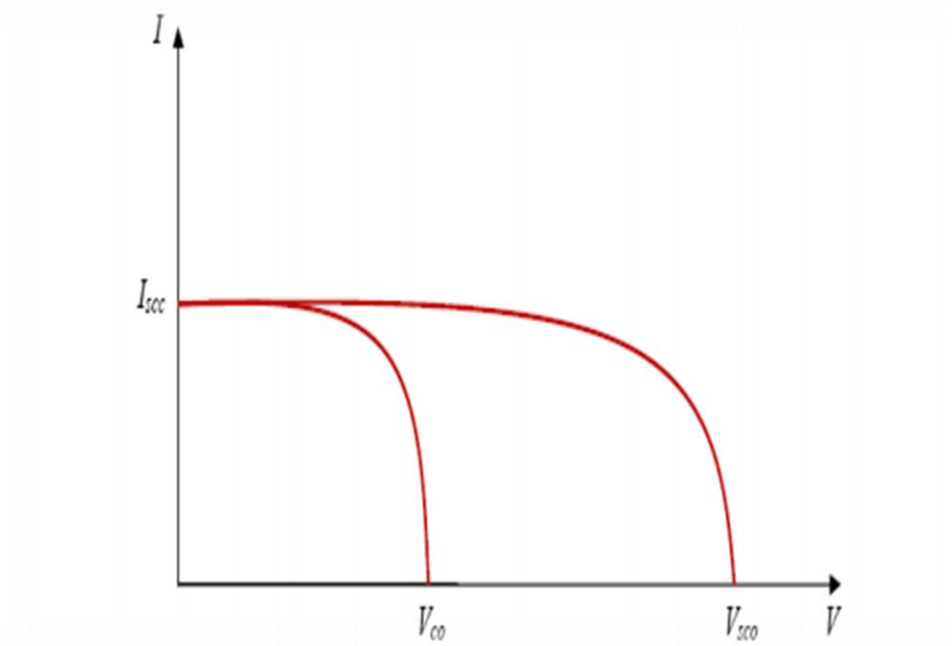


Figure (II -8): Association des modules en série.



Figure(II.9) : Caractéristique d'un groupement en série de ns cellules identiques.

II.6. 1.2. Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure II.10, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. La figure II.11 montre la caractéristique I-V résultante et obtenue en association en parallèle de (np) cellules identiques.

$I_{psc} = npI_{sc}$: Le courant de court-circuit.

$V_{poc} = Voc$: La tension de circuit ouvert.

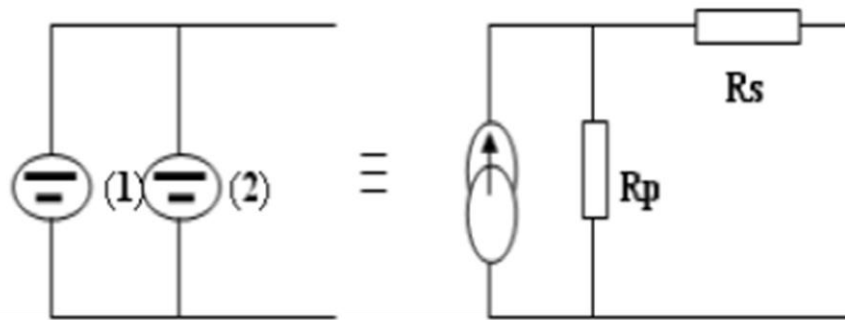


Figure (II -10): Association des modules en parallèle.

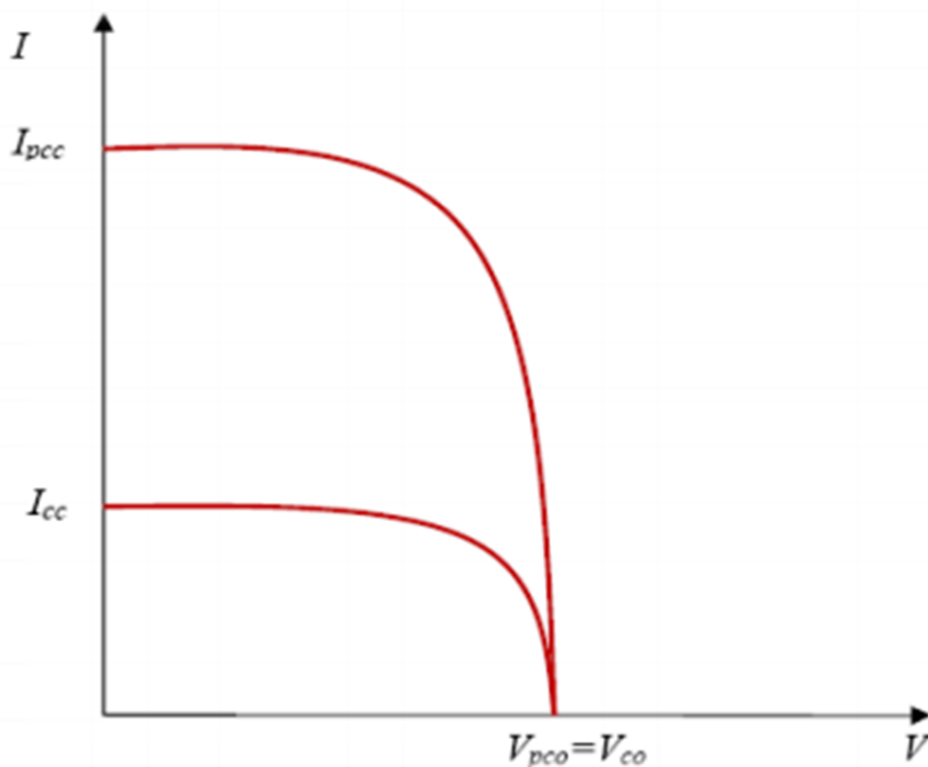


Figure (II -11): Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de (ns) cellules identiques.

II.6.1.3. Association mixte (en série et en parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (II -12). La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport (ns) parallèlement à l'axe des tensions et de rapport (np) parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure (II -13).

$I_{gsc} = np \times I_{sc}$: le courant de court-circuit du module résultant.

$V_{goc} = ns \times V_{oc}$: la tension du circuit ouvert du module résultant.

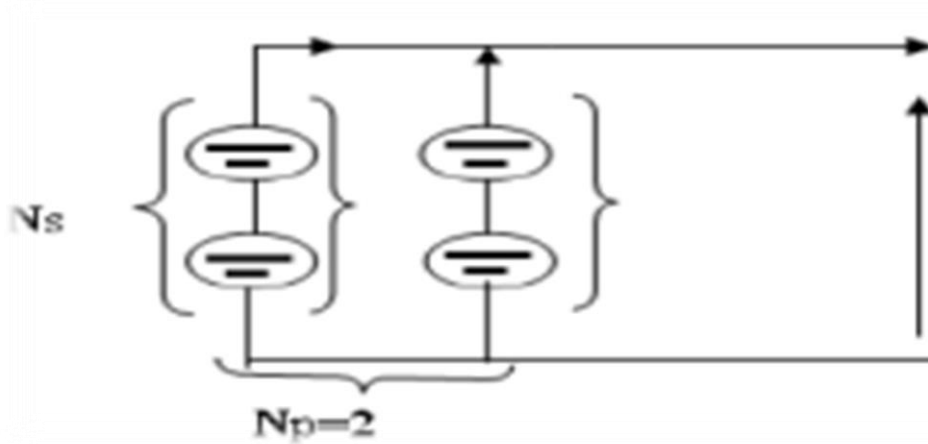


Figure (II -12) : Association mixte des modules.

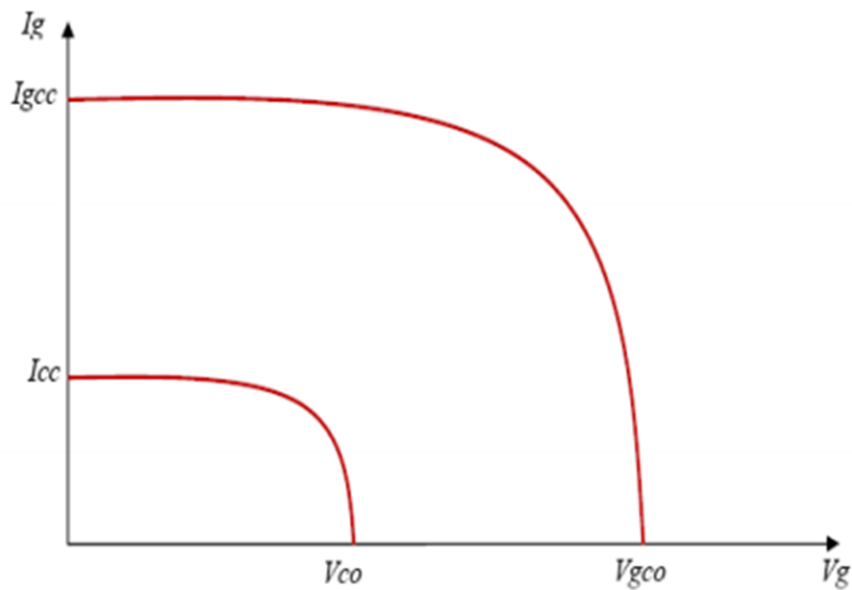


Figure (II-13): Caractéristique résultante d'un groupement mixte.

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (groupement en série) ou augmenter le courant (groupement en parallèle) par l'association d'un grand nombre de modules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants) [13].

II .7. Modélisation de la cellule photovoltaïque

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

II .7.1. Le modèle à deux diodes

Ce modèle nommé aussi le modèle à sept paramètres décrit les caractéristiques de diffusion et de recombinaison des porteurs de charges dans le matériau et dans la zone de charge d'espace comme représenté sur la figure (II-.14) :

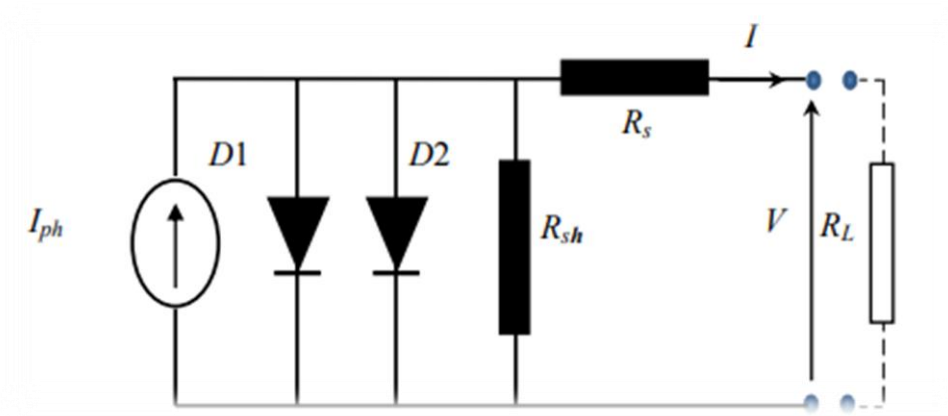


Figure (II-14) : Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à sept paramètres.

Le modèle contient sept paramètres inconnus, i.e., I_{ph} , I_{01} , I_{02} , γ_1 , γ_2 , R_s et R_{sh} . La caractéristique courant-tension (I-V) peut être décrit par l'équation (II-12):

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma_1 K T c} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma_2 K T c} \right) - 1 \right] - \frac{(V + IR_s)}{R_{sh}} \quad (\text{II} - 4)$$

Où I_{01} (A) et I_{02} (A) est le courant de saturation par diffusion et par recombinaison respectivement, k (J/K) la constante de Boltzmann, T_c (K) la température de la cellule, q (C) la charge de l'électron, γ_1 et γ_2 le facteur d'idéalité dans la diode (1) et dans la diode (2) respectivement, R_{sh} (Ω) la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction et R_s (Ω) la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions. Ce modèle est plus proche au comportement réel de la cellule photovoltaïque.

II .7.2. Le modèle à une diode (14)

Pour simplifier le modèle à deux diodes (sept paramètres), la recombinaison dans la zone de charge d'espace est supposée négligeable et le modèle à réduit à un modèle d'une diode. Ce modèle est partagé en deux types selon l'existence de la résistance shunt comme présenté dans les Figures (II-15) et (II-16):

II .7.2.a. Le modèle à cinq paramètres

Ce modèle contient cinq paramètres inconnus γ , I_{ph} , I_0 , R_s et R_{sh} , comme représenté sur la Figure II-15 :

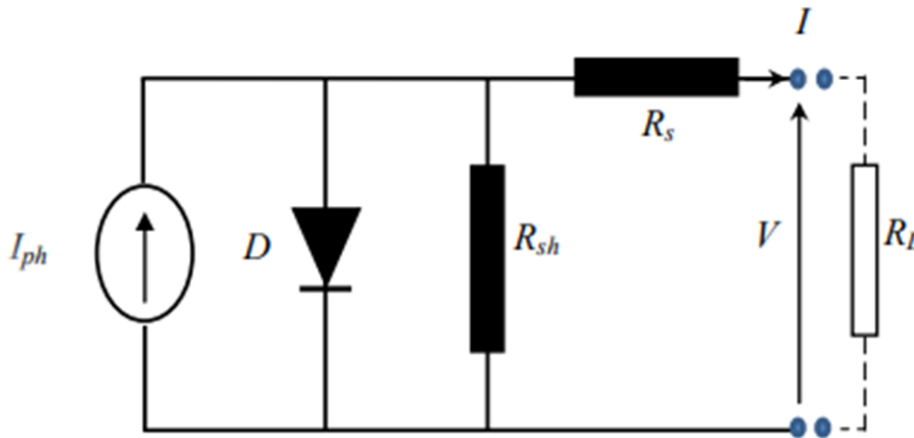


Figure (II-15): Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à cinq paramètres.

La caractéristique courant-tension est décrit par l'équation (II-5).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{\gamma K T c}\right) - 1 \right] - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \tag{II - 5}$$

II .7.2.b. Le modèle à quatre paramètres

Ce modèle contient quatre paramètres inconnus, γ , I_{ph} , I_0 , et R_s , comme représenté sur la Figure II-16.

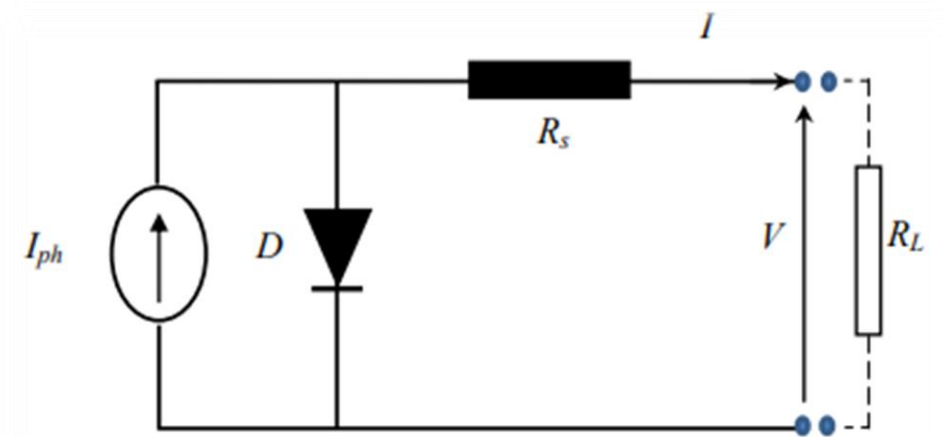


Figure (II-16): Le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque à quatre paramètres.

La caractéristique I-V est décrite par l'équation (II-16).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma K T c}\right) - 1 \right] \quad (\text{II} - 6)$$

II .8.Paramètres photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V). La figure (II.17) représente une caractéristique courant-tension I(V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant.

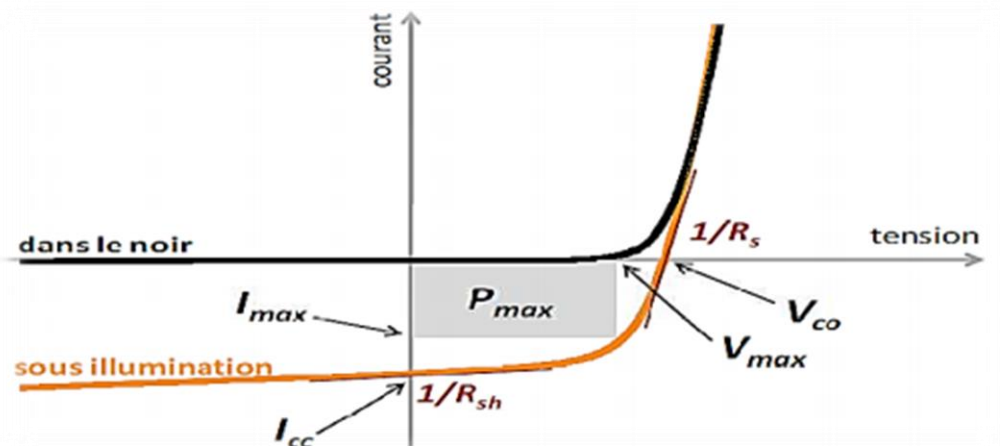


Figure (II.17) : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

II .8.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde

du rayonnement, de la surface active de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

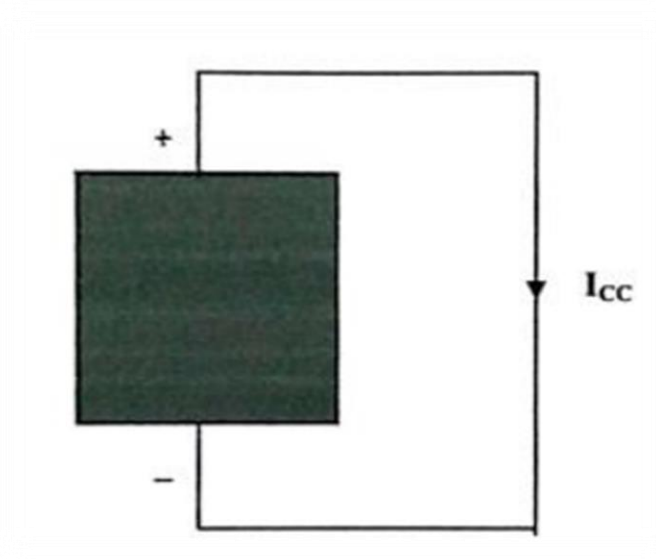


Figure (II.18) : Le courant de court-circuit I_{cc} .

II .8.2. Tension de circuit ouvert (V_{co})

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

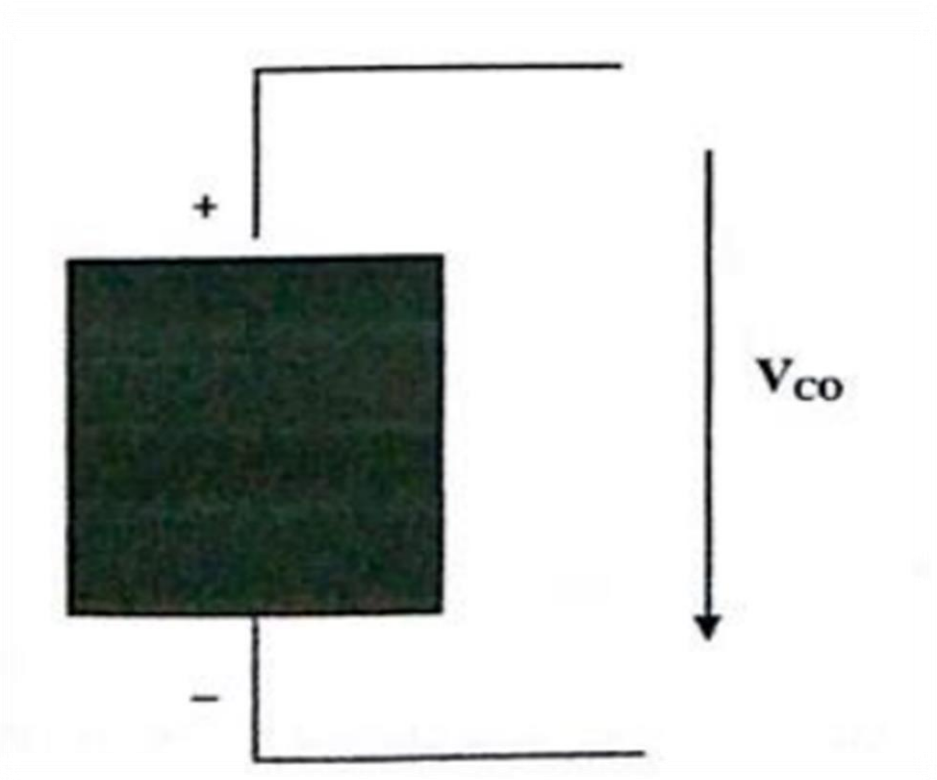


Figure (II.19) : La tension de circuit ouvert V_{co} .

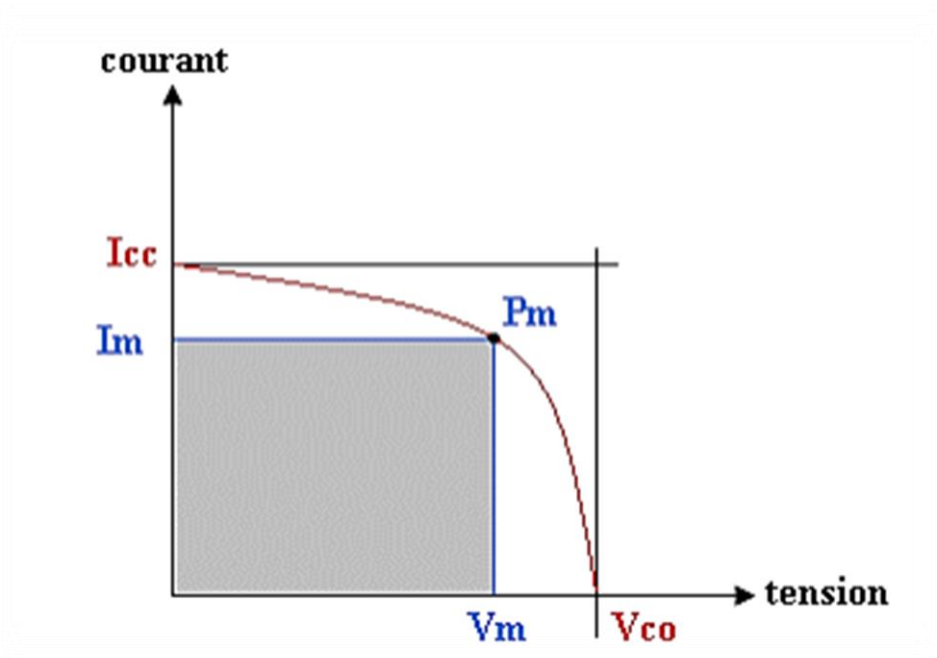
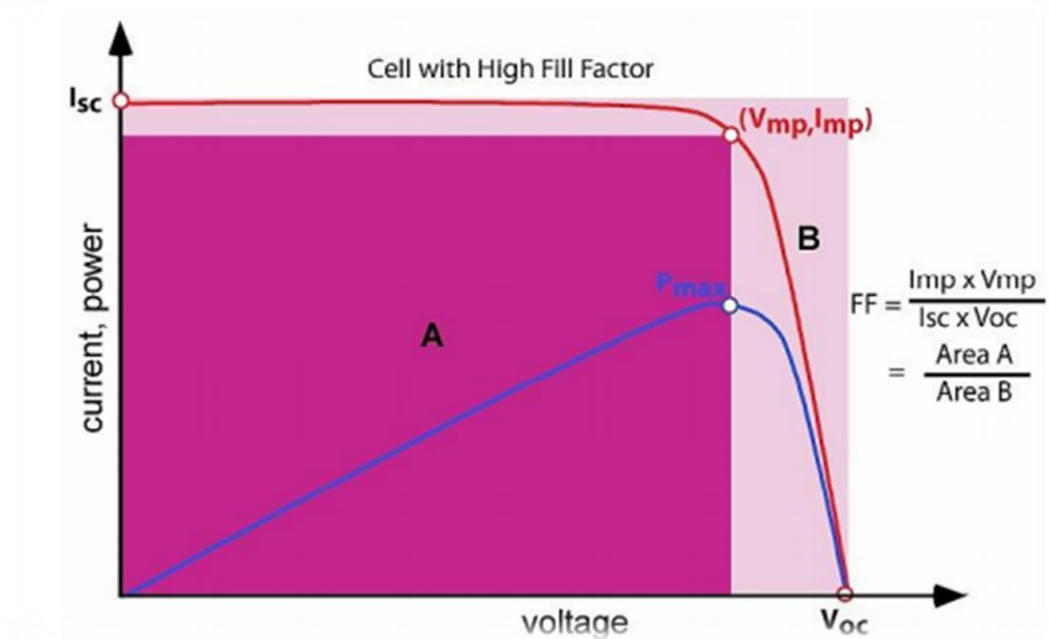


Figure (II.20) : puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.

II .8.3. . Facteur de forme, FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (\text{II} - 7)$$



Figure(II.21) : Représentation du facteur de forme. [14]

II .8.4. . Le rendement

Il est défini quant à lui comme le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule ou le module photovoltaïque et s'écrit

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times S} \quad (\text{II} - 8)$$

E : L'éclairement [w/m^2]

S : Surface de la cellule ou du module [m^2]

II .9. Les types de pose des panneaux photovoltaïques [15]

II .9.1. Panneaux photovoltaïques sur toit incliné

Ce type de montage est le plus courant, le plus simple et le meilleur marché (pas besoin de support, on utilise la toiture). Les panneaux sont fixés à une structure portante métallique solidement ancrée à la charpente. On peut y déduire que la position géographique influence l'orientation du module et avant tout l'inclinaison. Par exemple, si l'installation se trouve dans l'hémisphère du nord, à mesure que le module s'approche au pôle, l'inclinaison doit augmenter.



Figure (II.22) : Panneaux photovoltaïques sur toit incliné de maison. [15]

II .9.2. Panneaux photovoltaïques sur toit plat

La fixation des panneaux est généralement réalisée par lestage, dans certain cas (pour limiter la surcharge) il est cependant nécessaire d'ancrer les panneaux à la structure portante de la plateforme.



Figure (II.23) : Panneaux photovoltaïques sur toit plat de bâtiment résidentiel. [15]

II .9.3.Panneaux photovoltaïques sol sur structure

Ce type de montage permet d'optimiser l'orientation (plein sud) et l'inclinaison (32° par rapport à l'horizontal) des panneaux. Les panneaux sont fixés à une structure à 30° .



Figure (II.24) : Panneaux photovoltaïques au sol sur structure. [15]

II .9.4. Panneaux photovoltaïques sur suiveur solaire (ou tracker solaire)

Ce type de montage permet d'optimiser l'orientation et l'inclinaison des panneaux par rapport à la position réelle du soleil. Les panneaux sont fixés à une structure portante qui suit le cheminement du soleil afin de capter un maximum d'énergie. Ce type de montage nécessite l'obtention d'un permis d'urbanisme.



Figure (II.25) : Panneaux photovoltaïques sur suiveur solaire. [15]

II .9.5. Panneaux photovoltaïques sur façade

Ce type de montage permet d'utiliser les panneaux photovoltaïques en pare-soleil ou En intégration au bâti (BIPV pour Building Integrated Photovoltaïque). Les panneaux sont Fixés à une structure portante solidement ancrée à la structure du bâtiment. Ce type de Montage nécessite l'obtention d'un permis d'urbanisme.



Figure (II.26) : Panneaux photovoltaïques sur façade. [15]

II .9.6. Orientation et inclinaison des modules [16]

En générale La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influence directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les Utiliser au maximum de leur possibilité.

On appelle orientation, le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...). L'inclinaison indique l'angle que fait le panneau avec le plan Horizontal, elle se compte donc en degrés, figure(II.27).

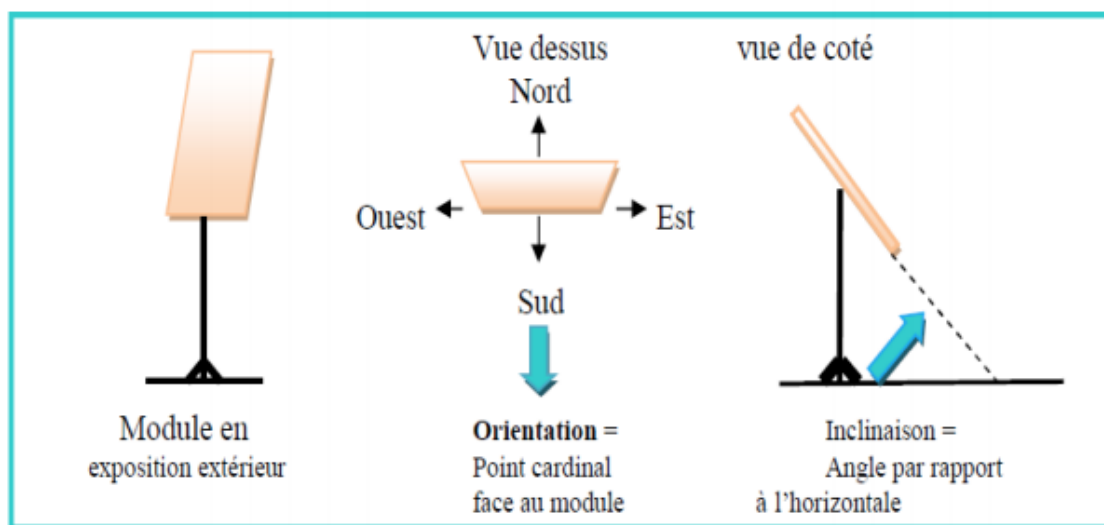


Figure (II.27) : Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau. [16]

L'orientation idéale d'un module photovoltaïque obéit à une règle vers l'équateur :

- Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord.
- Orientation vers le nord dans l'hémisphère Sud.

En ce qui concerne l'inclinaison, c'est un peu plus compliqué. Si on prend le cas d'une Application autonome qui consomme une énergie quasi constante tout au long de l'année. L'hiver étant la période la moins ensoleillée, c'est à cette période qu'il faut optimiser la Production. Les panneaux doivent donc pouvoir récupérer l'énergie d'un soleil dont la hauteur Est faible.

II .10.conclusion

Nous avons présenté dans ce présent chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque et la cellule PV plus largement. Aussi que les principes de fonctionnement de cellule et ces caractéristiques.et sur les panneaux PV.

Chapitre III : modélisation et simulation d'un module PV**III .1.Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule, module PV et le générateur Photovoltaïque (composé de 60 cellules) dans les conditions suivants.

($E=1000W/m^2$, $T=25^{\circ}c$), nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série Parallèle) sur l'énergie produite, et on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK et PVsystT pour faire la simulation de comportement de la cellule, module et du générateur PV.

III.2.Présentation de la structure du système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est composé particulièrement par :

III.2.1. La 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 inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs [31][32].

La figure (III.1) illustre une cellule PV typique. Elle montre clairement sa constitution détaillée. Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable (varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé) entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

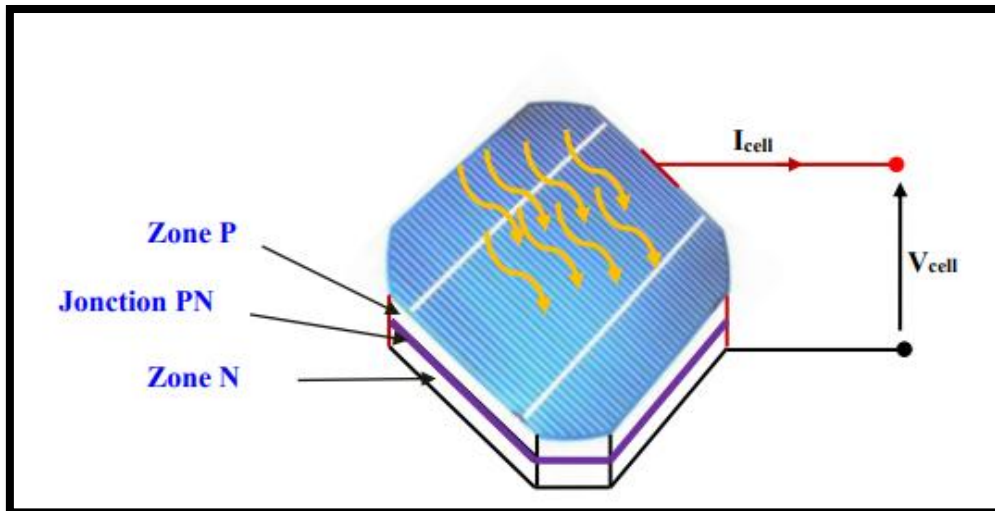


Figure (III.1) : Coupe transversale d'une cellule PV.

III.2.2. Le module (panneau)

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72) pour atteindre la tension de sortie désirée.

La puissance crête obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité.

La courbe de la figure III.2, montre les caractéristiques non linéaires du panneau solaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température.

Cependant, plusieurs grandeurs électriques importantes décrivent le fonctionnement du module photovoltaïque sont :

- Le courant maximal (I_{sc}). Il se produit lorsque les bornes du module sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{sc}) et dépend fortement du niveau d'éclairement.
- la tension à vide (V_{oc}) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale du module).

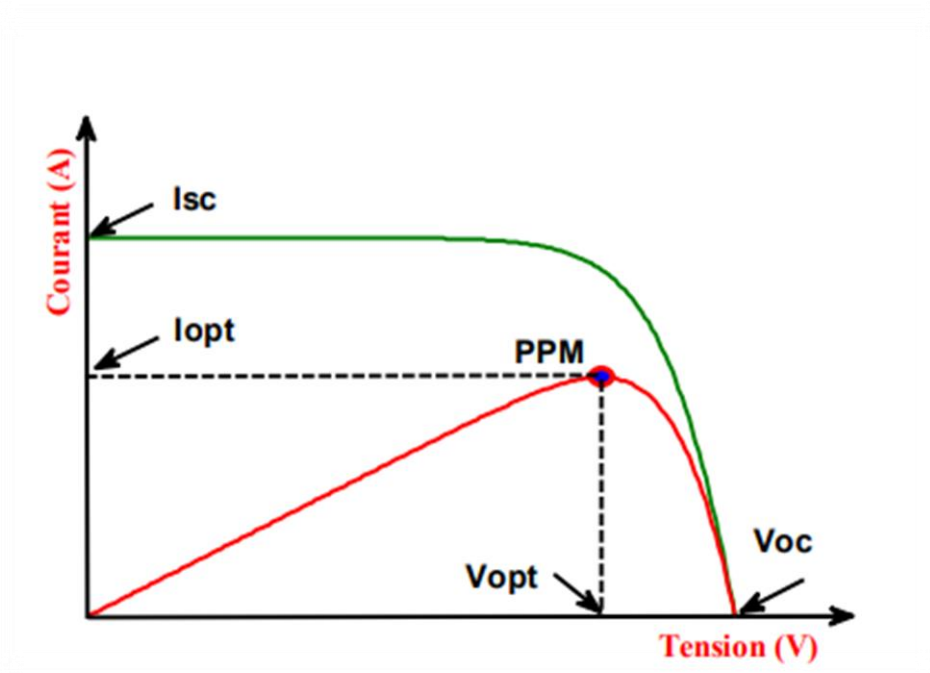
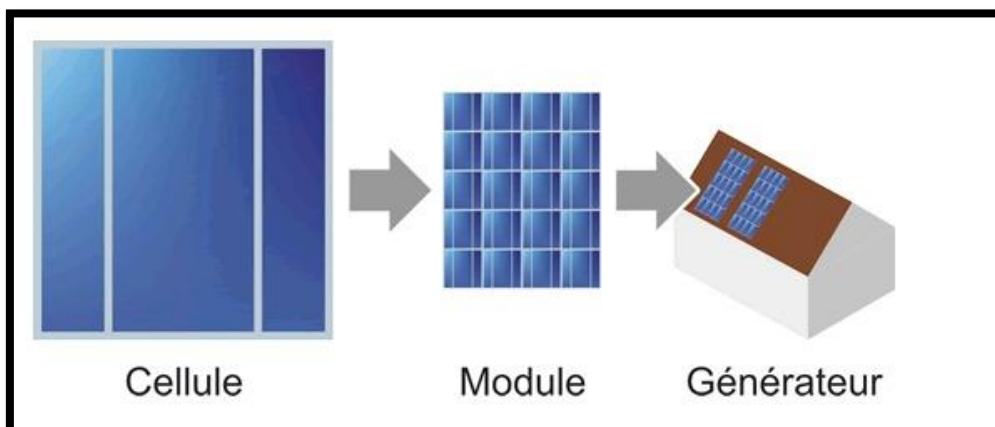


Figure (III.2) : Caractéristique électrique d'un module photovoltaïque.

III.2.3. Le générateur photovoltaïque

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charges).



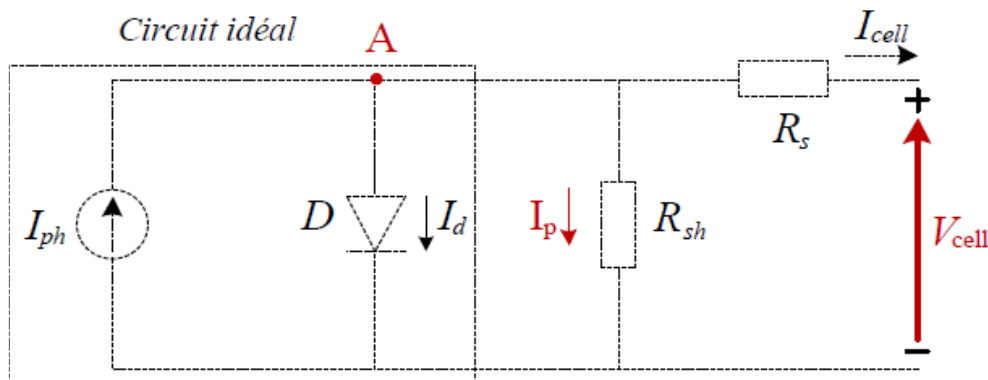
Figure(III.3) : composition du système photovoltaïque.

III.3. Modélisation et simulation d'une cellule PV

III.3.1. Modélisation d'une cellule PV

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série (R_s). Et une résistance Shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$:

- ❖ **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. [32]
- ❖ **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 [32][33].



Figure(III.4) : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

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.

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont :

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}).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on Retrouvera alors le modèle à 3 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. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en

Donnant les expressions des différents courants

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

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{PH}} - I_{\text{d}} - I_{\text{rsh}} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

I_{cell} : Courant délivré par la photopile.

I_{PH} : Photo courant.

I_{d} : Courant de la diode.

I_{rsh} : Courant shunt.

On a la résistance (R_{sh}) plus élevée donc on peut négliger le courant I_{Rsh} donc l'équation

S'écrit :

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{PH}} - I_{\text{d}} \quad (\text{III.2})$$

a. 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 :

Avec :

$$I_{\text{PH}} = [I_{\text{cc}} + K_i(T - T_{\text{ref}})] * \frac{G}{G_{\text{ref}}} \quad (\text{III.3})$$

I_{cc} [A] : Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).

K_i [A/K] : Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

T [K] : Température ambiante.

G [W/m²] : Irradiation sur la surface de la cellule.

T_{ref} [K] : Température de référence (298 K).

G_{ref} [W/m²] : Irradiation de référence (1000 W/m²).

b. Le courant de saturation I_0

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{\text{rs}} \frac{(T)}{T_{\text{ref}}} \exp \left[\frac{qE_g}{AK} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (\text{III.4})$$

Avec :

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

c. Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

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

Où :

V_{oc} [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

q [°C] : Charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ °c).

N_s : Nombre de cellules connectées en série.

A : Constante d'idéalité de la jonction ($1 < A < 2$).

K [J/K] : Constante de Boltzmann ($1.3805 \cdot 10^{-23}$ J/K).

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

$$I_{cell} = I_{PH} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s AKT} - 1\right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \right] \quad (\text{III. 6})$$

d. 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, on introduit donc l'équation spécifique à un module :

$$I_{PV=N_p} I_{PH} - N_p I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{N_s AKT} - 1\right) - N_p \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \right] \quad (\text{III. 7})$$

Avec :

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

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

III.3.2.Simulation d'une cellule PV

Voir l'annexe 2 : Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.

III.4. Modélisation et simulation de module PV

III.4.1.Modélisation de module PV

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique, sous forme de courant continu directement utilisable.

Le générateur photovoltaïque est un ensemble de modules connectés série/parallèle afin d'obtenir une puissance et une tension désirées. L'élément de base est la cellule solaire (rappelons que le modèle en une seule exponentielle est non linéaire et implicite), donc une solution itérative sera déterminée par la méthode de Newton-Raphson., ainsi la connaissance des données fournies par le constructeur sont nécessaire. [33][34]

Le circuit est composé d'une courante photodiode, une résistance série Rs plus faible et une diode (Fig. III - 4). Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont données par les relations suivantes : La relation entre la tension V et le courant I est donnée par la relation suivante : Appliquons la première loi de Kirschhoff :

$$I = I_{ph} - I_d \tag{III . 8}$$

Avec I_{ph}, I_d, I le courant photonique, le courant de la diode et le courant de fonctionnement, qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules.

$$I_D = I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{III . 9}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \tag{III . 10}$$

Avec :

q : charge de l'électron e=1.6*10⁻¹⁹ coulomb.

T : température de la cellule (Kelvin).

Rs : résistance série de la cellule (Ω).

K : constante de Boltzmann (K=1.3854 * 10⁻²³ J/K).

A : facteur de qualité de la diode.

I_{ph} : courant photonique de la diode qui est donnée par la relation suivante :

$$I_{PH} = I_{Ph (T_1)} [1 + K_0 \times (T - T_1)] \tag{III . 11}$$

Avec :

$$I_{Ph (T_1)} = \frac{E}{E_{ref}} \times I_{SC}(T_1) \tag{III . 12}$$

ET :

$$K_0 = \frac{I_{SC}(T_2) - I_{SC}(T_1)}{T_2 - T_1} \tag{III . 13}$$

I_0 = courant de saturation de la diode (A), donné par la relation suivante:

$$I_0 = I_{0(T_1)} \times \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\frac{3}{n}} \times e^{\frac{-qV_g}{\left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\frac{1}{T_1}}} \quad \text{(III . 14)}$$

$$I_{0(T_1)} = \frac{I_{cc}(T_1)}{e^{\frac{q \times Voc(\eta)}{AKT_1}}} \quad \text{(III . 15)}$$

Voc est la tension du circuit ouvert de la cellule et V_g et la tension de seuil de la diode (1.12 eV).

La résistance série se calcule de la façon suivante :

$$I = I_{Ph} - I_0 \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad \text{(III . 16)}$$

$$dI = 0 - I_0 \cdot q \left(\frac{dV + R_s \cdot dI}{A.K.T} \right) \cdot e^{q \left(\frac{V + R_s I}{A.K.T} \right)} \quad \text{(III . 17)}$$

$$R_s = - \frac{dI}{dI} - \frac{A.K.T/q}{I_0 \cdot e^{q \left(\frac{V + R_s I}{A.K.T} \right)}} \quad \text{(III . 18)}$$

$$R_s = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V_{OC}} - \frac{A.K.T/q}{I_0 \cdot e^{\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{A.K.T} \right)}} \quad \text{(III . 19)}$$

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus sont données par le fabricant de panneaux photovoltaïques utilise REC 250PE.

III.4.2.Simulation du Module Photovoltaïque

Pour réaliser cette simulation nous avons choisi le module photovoltaïque «REC250PE ».le module est composé de 60 cellules, Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant [35]:

Puissance nominale (P_{max})	250 w
Tension à P_{max} (V_{mP})	30.2V
Nombre Cellule	60
Courant à P_{max} (I_{mP})	8.28A
Courant de court-circuit (I_{sc})	8.86A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	37.4V
Rendement du module	15.1%
Coefficient de température(P_{max})	-0.40%/C
Tolérance de Puissance	(+/-) 0/+5W

Tableau (III.1) : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque REC 250PE.

III.4.2.1.Simulation avec logiciel PVSYST 7.2

❖ Présentation de logiciel

PVSYST est un logiciel conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les Chercheurs, mais c'est aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle Approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche Ergonomique avec guide dans le développement d'un projet. PVsyst permet d'importer des Données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.

❖ Caractéristiques d'un module PV REC 25 PE

1. Caractéristique (I-V)

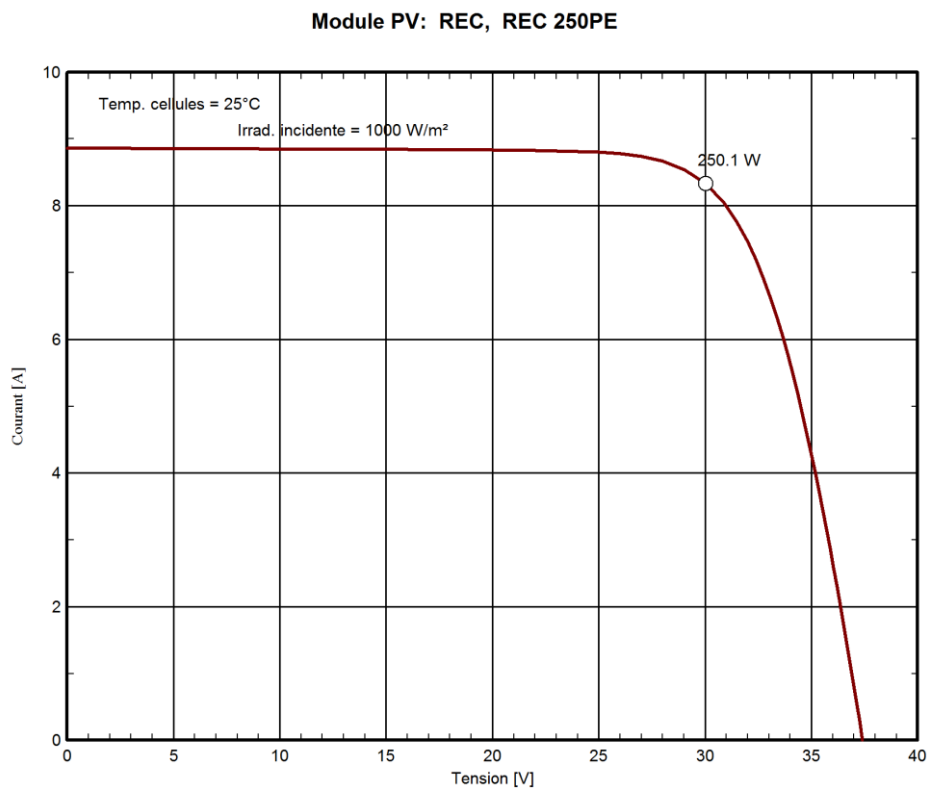


Figure (III.5) : Caractéristique I(V) d'un module REC250PE a ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

2. Caractéristique (P-V)

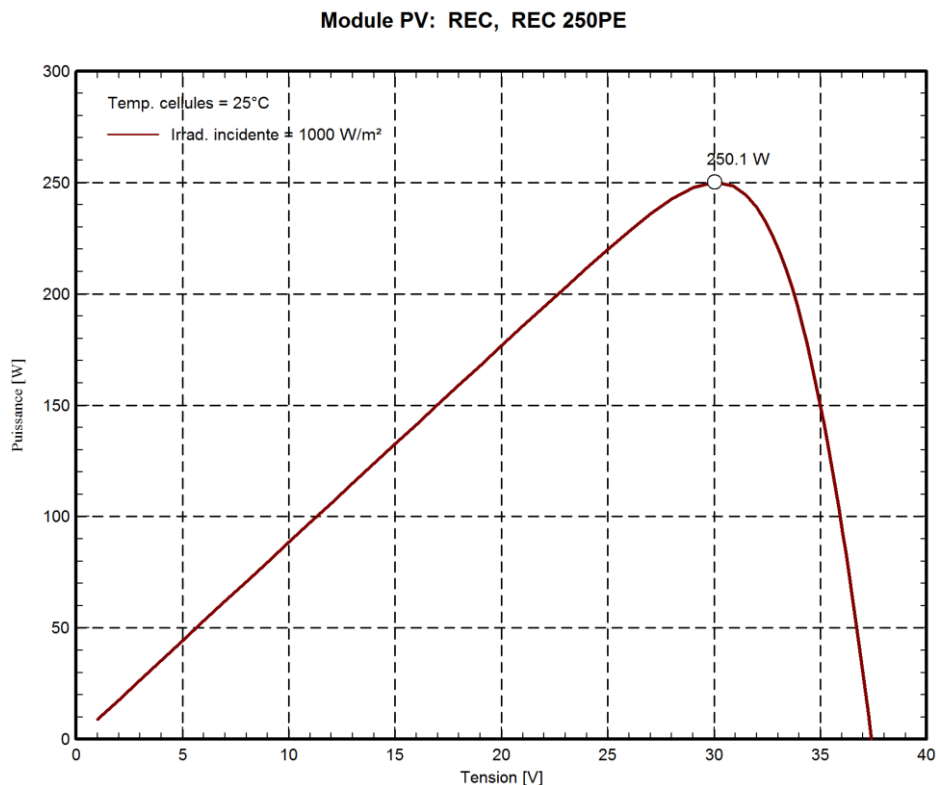


Figure (III.6) : Caractéristique P(V) d'une module ($T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$).

III.4.3. Effets climatiques sur un module PV

III.4.3.1. Influence de l'éclairement sur un module

La base des cellules photovoltaïques est une jonction PN, cette dernière réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue, mais toujours avec un coefficient de rendement très faible de l'ordre de 15%. La variation des caractéristiques est représentée sur les courbes de la figure 3.4.

Les figures (II.9) et (II.8) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de

La variation de l'éclairement ($E=200.400.600.800.1000\text{ W}/\text{m}^2$) à température constants ($T=25^{\circ}\text{C}$) :

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, La tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis Lentement pour des niveaux plus élevés (... figure (II.9)).

La figure (II.8 (31)) illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la

Tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de L'éclairement sur la caractéristique P(V).

❖ **Caractéristique (P-V)**

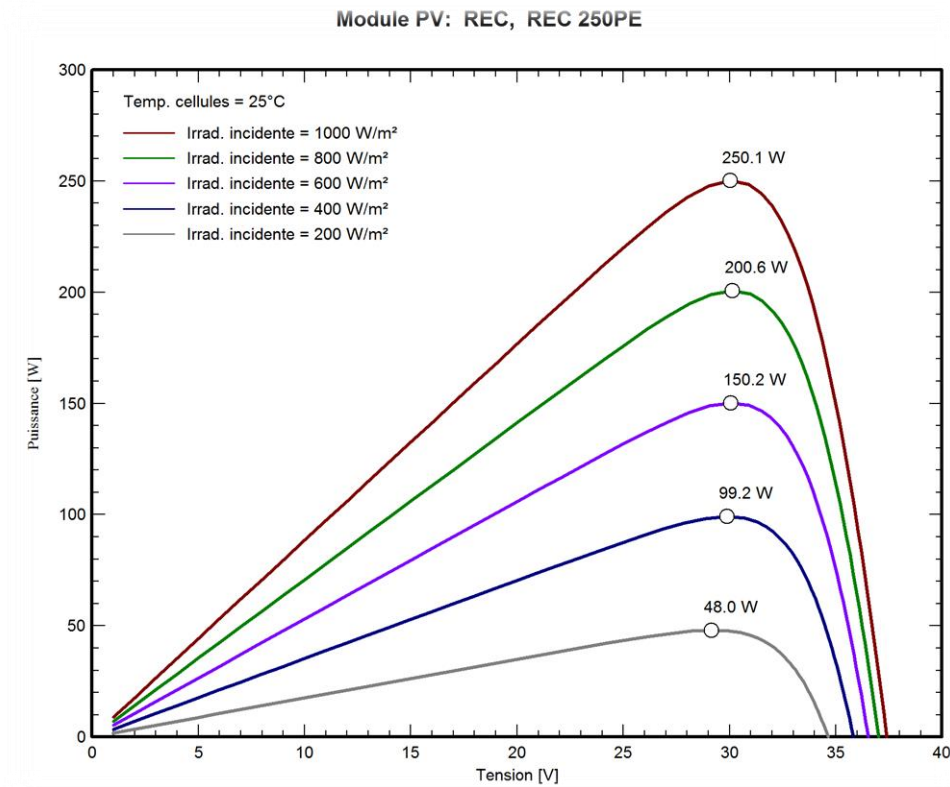


Figure (III.7) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

Pour plus différent valeur de l'irradiation de (200 à1000) on constate une augmentation de la puissance de module PV.

❖ Caractéristique (I-V)

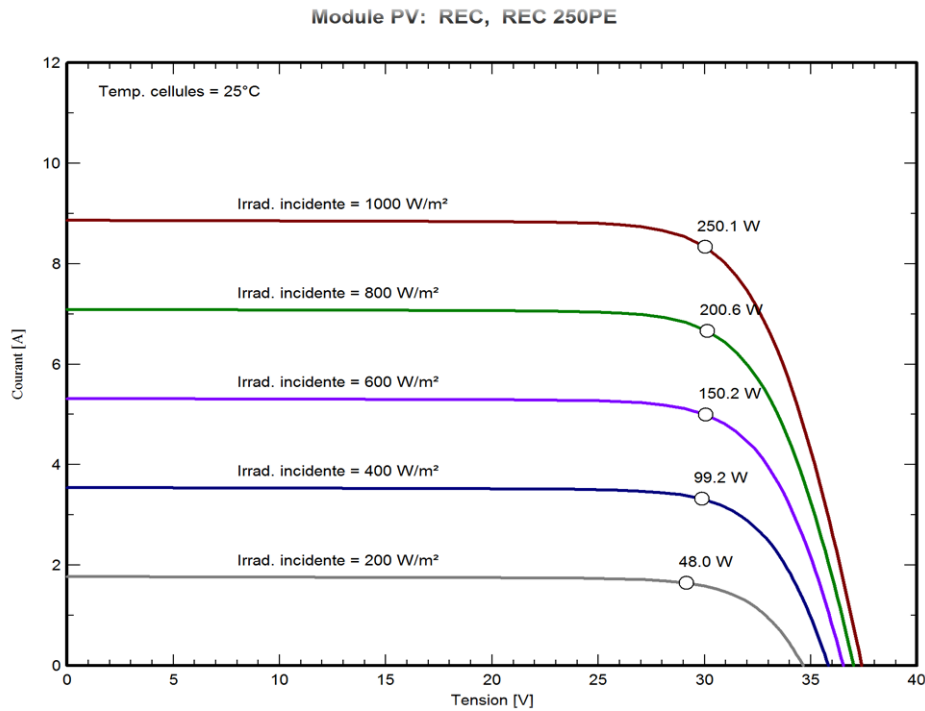


Figure (III.8) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

III.4.3.2. Influence de la température sur un module PV

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la base des cellules photovoltaïques est une jonction PN. Ceci nous laisse envisager que son rendement variera selon la température de la jonction. En effet, l'équation de Boltzmann donne :

$$I_{sc} = I_0 \cdot \exp\left(\frac{eV_0c}{KT}\right) \tag{III.20}$$

Les figures (II.10) et (II.11) représentent la caractéristique courant – tension I(V) et puissance – Tension P(V) dans la même condition de l'éclairement (E=1000 W/m²) et pour différents Température (T=10, 25,40, 55,70) :

La tension de circuit ouvert est diminué avec l'augmentation de la température, par Contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température

Et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la Tension de circuit ouvert.

Caractéristique (I-V)

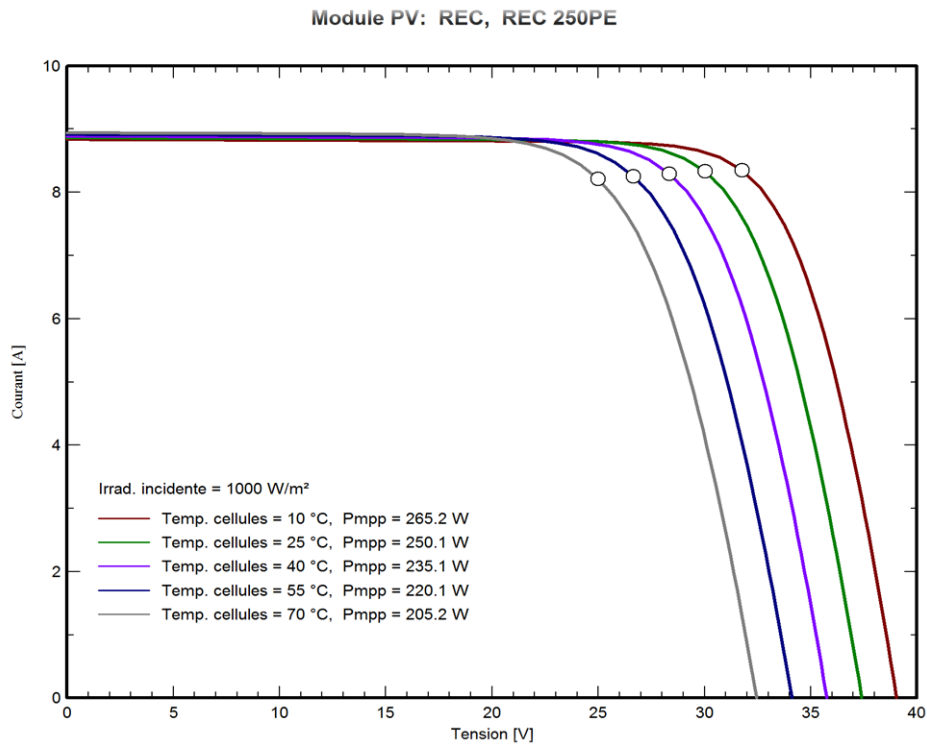


Figure (III.9) : Caractéristique I(V) pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$)

Caractéristique (P-V)

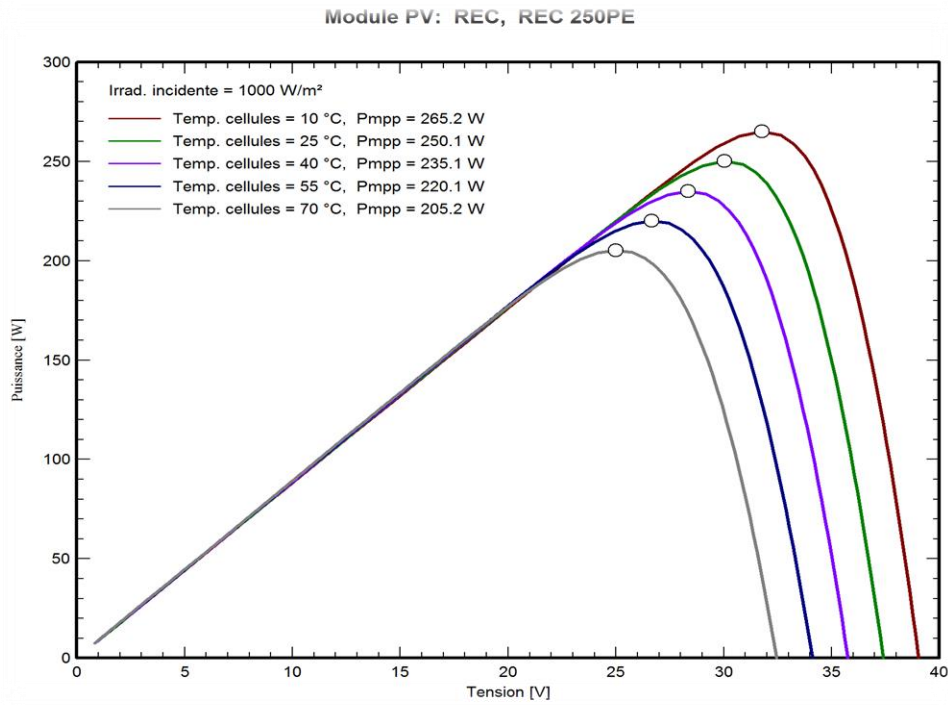


Figure (III.10) : Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m²).

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

III.4.3.3. Influence de la résistance série

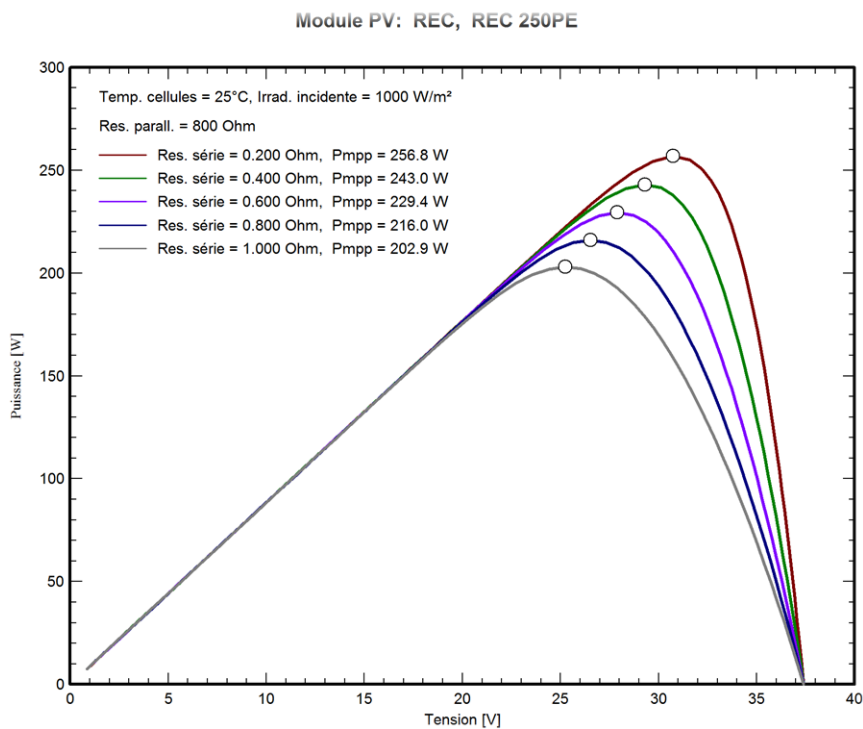


Figure (III.11) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux résistances en série(T=25°C).

On constate que l'association de ns de cellule photovoltaïque produira une augmentation de tension, donc les cellules sont traversées par le même courant.

II.4.3.4. Influence de la résistance parallèle

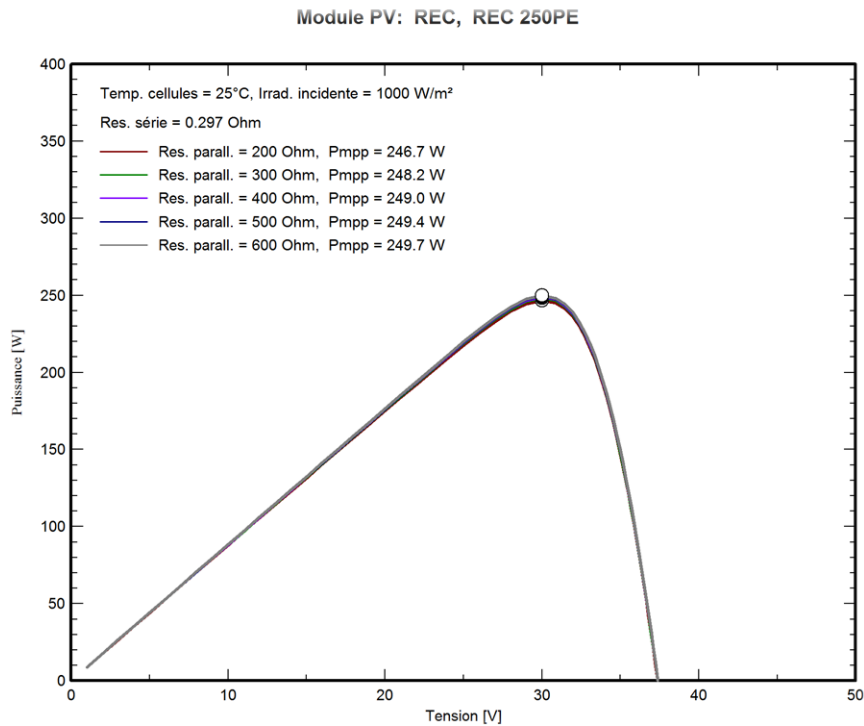


Figure (III.12) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux de résistance, en parallèle (T=25°C).

Une association de np de cellules accroître le courant produit, les cellules sont soumises à une seule tension.

III.3.1.2. Simulation du Module Photovoltaïque par Matlab-Simulink

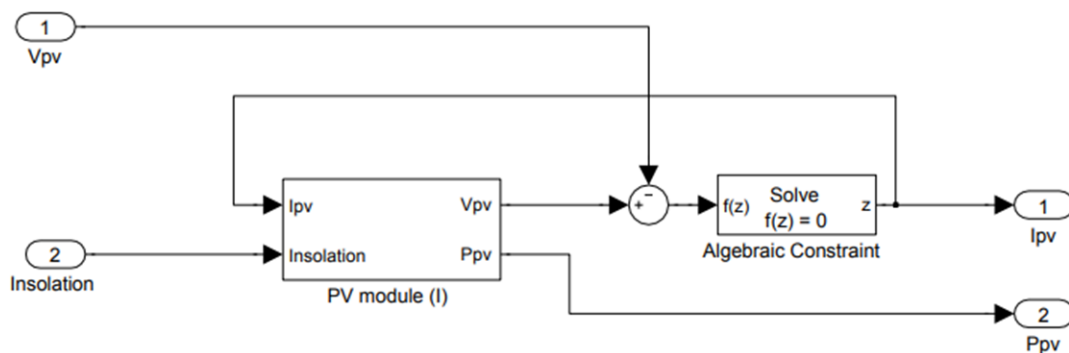
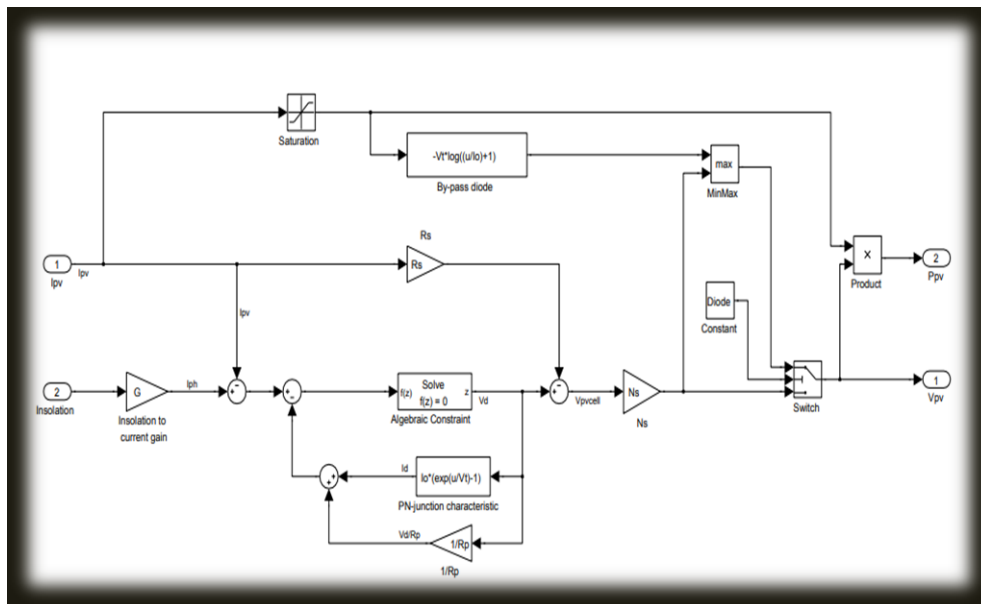
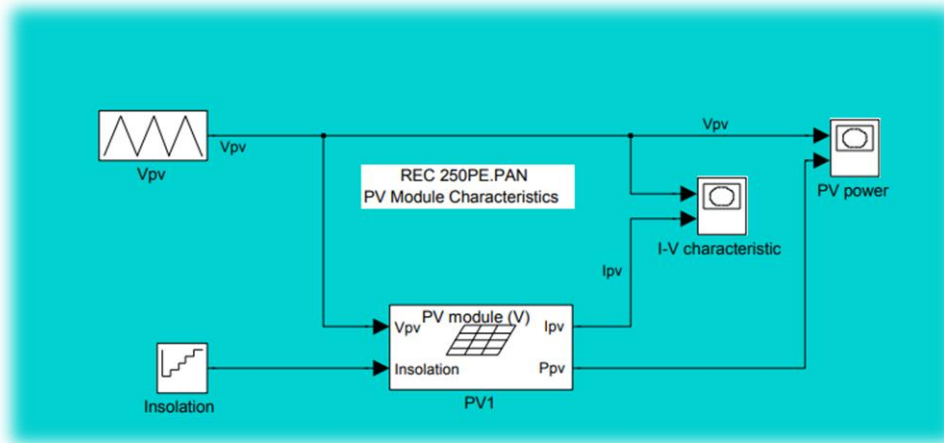


Figure (III.13) : Schéma bloc du module PV en MATLAB-SIMULINK.

Les figures suivantes (III.15, III.16) représentent les résultats de la simulation d'un module PV en MATLAB –SIMULINK.

❖ Caractéristique (P-V)

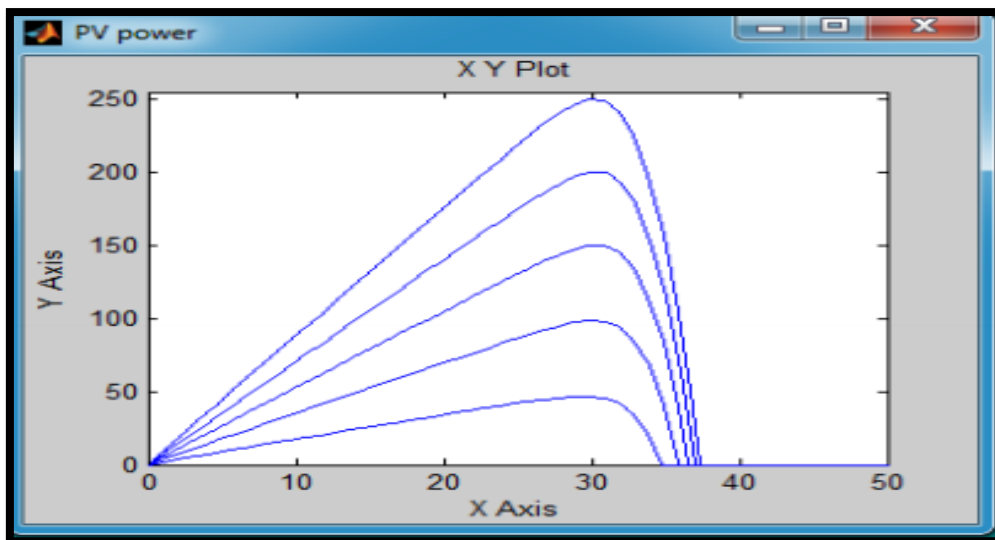


Figure (III.14) : Caractéristique P(V) d'un module ($T=25^{\circ}\text{C}$)

❖ Caractéristique (I-V)

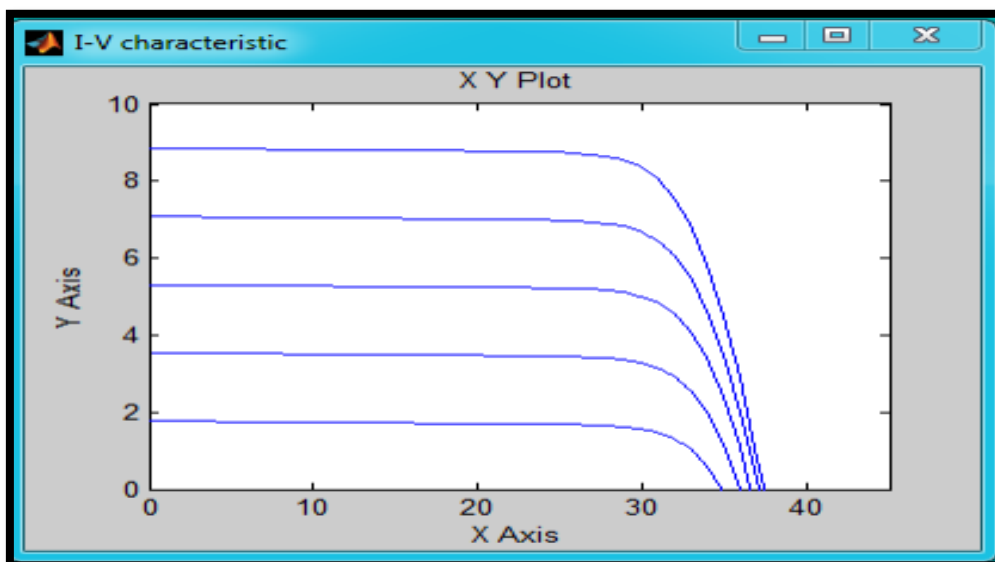


Figure (III.15) : Caractéristique I(V) d'un module ($T=25^{\circ}\text{C}$).

III.5.Simulation d'un générateur PV de 8 modules PV

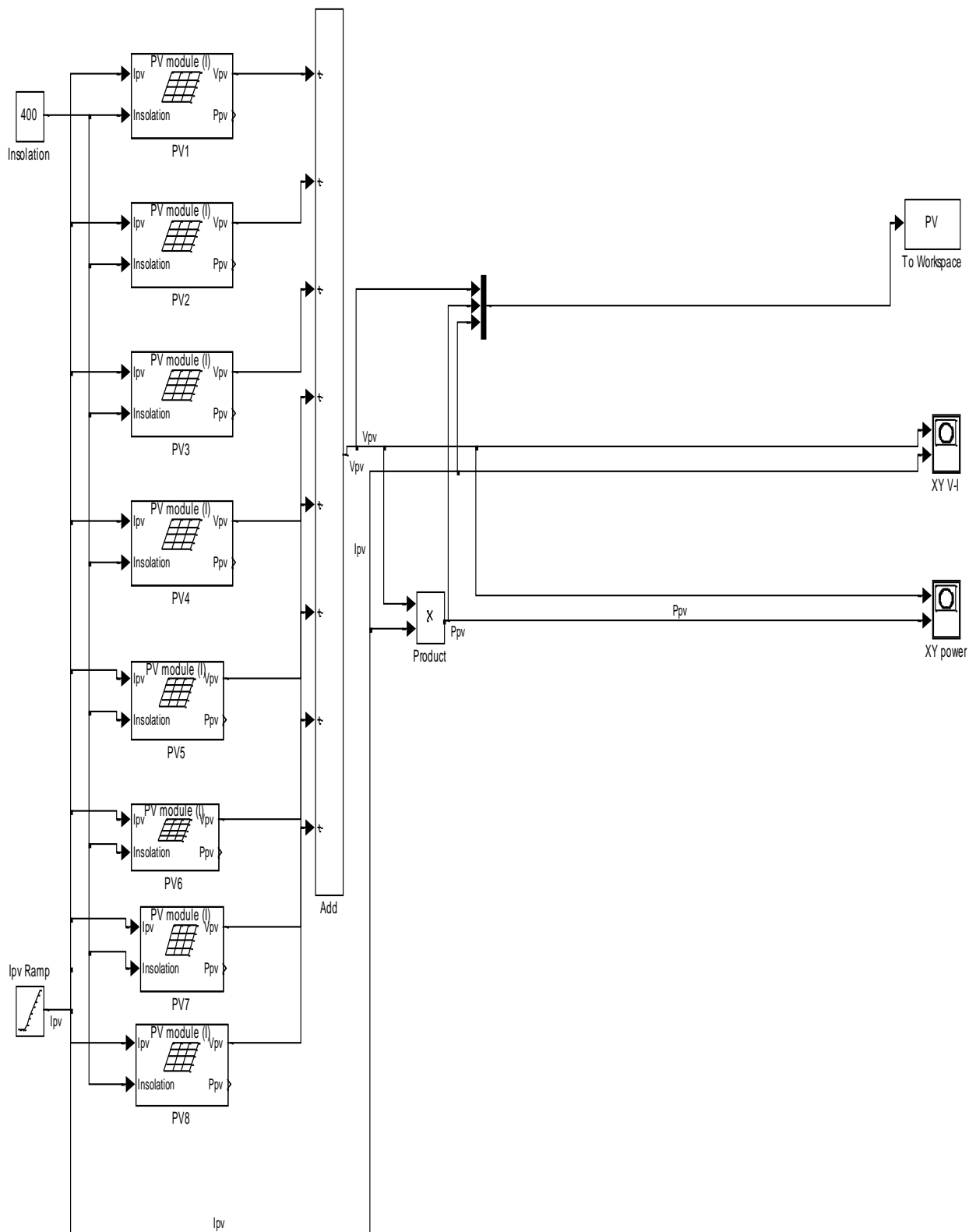


Figure (III.16) : Schéma bloc de la générateur PV en MATLAB-SIMULINK.

Les figures suivantes (III.18, III.19) représentent les résultats de la simulation d'un générateur à 8 modules PV en MATLAB –SIMULINK.

❖ Caractéristique (P-V)

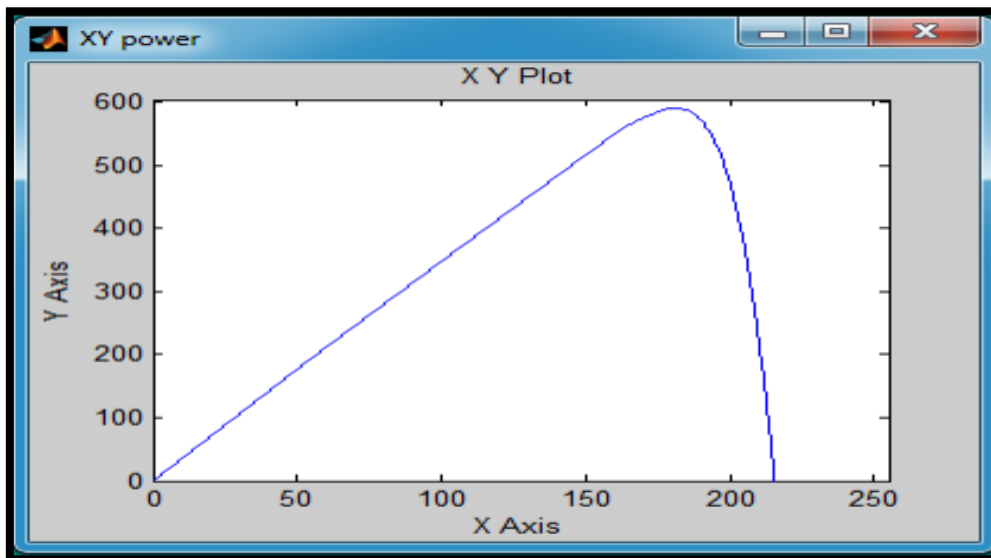


Figure (III.17) : Caractéristique P(V) d'une générateur (T=25°C).

❖ Caractéristique (I-V)

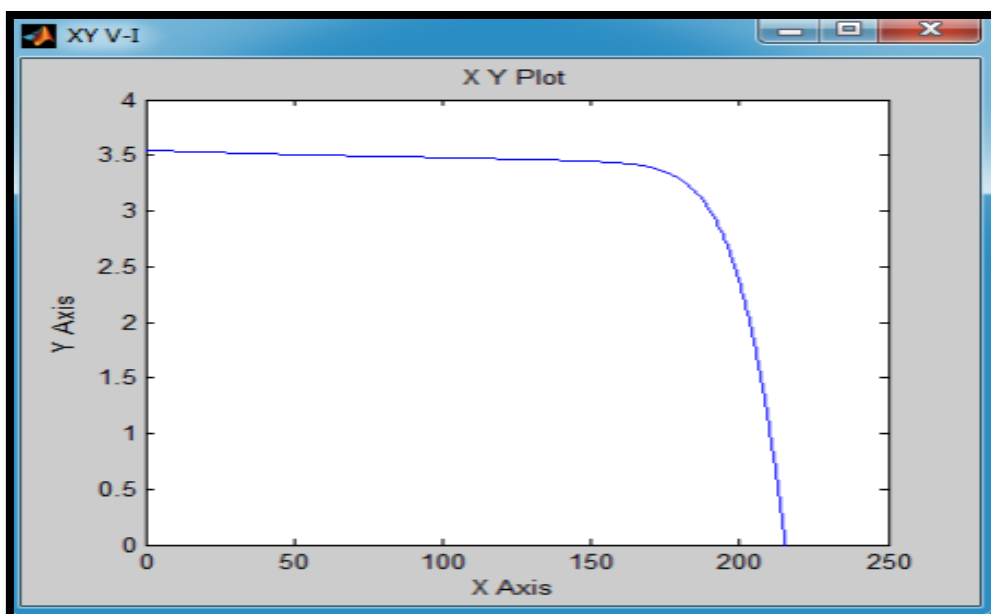


Figure (III.18) : Caractéristique I(V) d'un générateur (T=25°C).

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation de l'ensemble de cellule Ainsi que le module PV en fin une GPV.

Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB et PVsyst pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un module PV suite un générateur Photovoltaïque (composé de 60 cellules) dans les conditions standard ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par le module, PV, ainsi l'influence de l'association des cellules (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Enfin, nous avons utilisé l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement De module et du générateur PV.

Chapitre IV : étude énergétique et exérgétiques d'un panneau PV

IV.1.Introduction

Dans le présent chapitre nous allons faire une étude des performances énergétiques et exérgétique d'un module photovoltaïque Rec.250pe

Après on a comparé les résultats obtenue de deux paramètres différents utilise pour faire cette calcule (T=25, T=45), et ainsi pour avoir une idée sur les bonnes conditions d'utilisation de cette technologie.

IV.2.Etude énergétique et exérgétiques d'un panneau PV

Pour faire cette étude nous avons choisi le module photovoltaïque «REC250PE ».

IV.2.1.Etude énergétique

Les études sont effectuées pour plusieurs valeurs de l'éclairement solaire ensuite on a fait une étude comparative entre deux valeur de température (T=25C°, T=45C°). Les résultats ce sont présentés sur les figures (IV.1) jusqu'à (IV.20).

IV.2.1.1.le rendement de conversion (power conversion)

a).Définition [37]

Rendement de conversion est une définition du dictionnaire environnement et développement durable. Pour une cellule photovoltaïque (PV) : rapport de la puissance électrique maximale de sortie sur le produit de la surface du générateur et de l'éclairement incident mesuré.

B).Calcul du rendement de conversion

$$\eta_{pc} = \frac{Voc \times Isc \times FF}{G \times S} = \frac{P_{max}}{G \times S} \quad (IV.1)$$

Et :

$$FF = \frac{P_{max}}{Voc \times Isc} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{Voc \times Isc} \quad (IV.2)$$

Avec :

η_{pc} : Rendement de conversion

Voc : Courant open voltage.

Isc : le courant de court – circuit.

FF : Facteur de forme.

G : Irradiation sur la surface du module.

S : Surface de module.

Pmax : Puissance maximale (la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$).

Vmax : Tension maximale.

I_{max}: Courant maximale.

➤ **pour T=25 C°**

On détermine Pmax la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiante de $1000W/m^2$.

On trouve, Pmax= 250W.

Sur la courbe $P=f(U)$, pour une irradiation de $1000W/m^2$, l'abscisse du point Pmax correspond à Umax. On obtient ainsi Umax=30V.

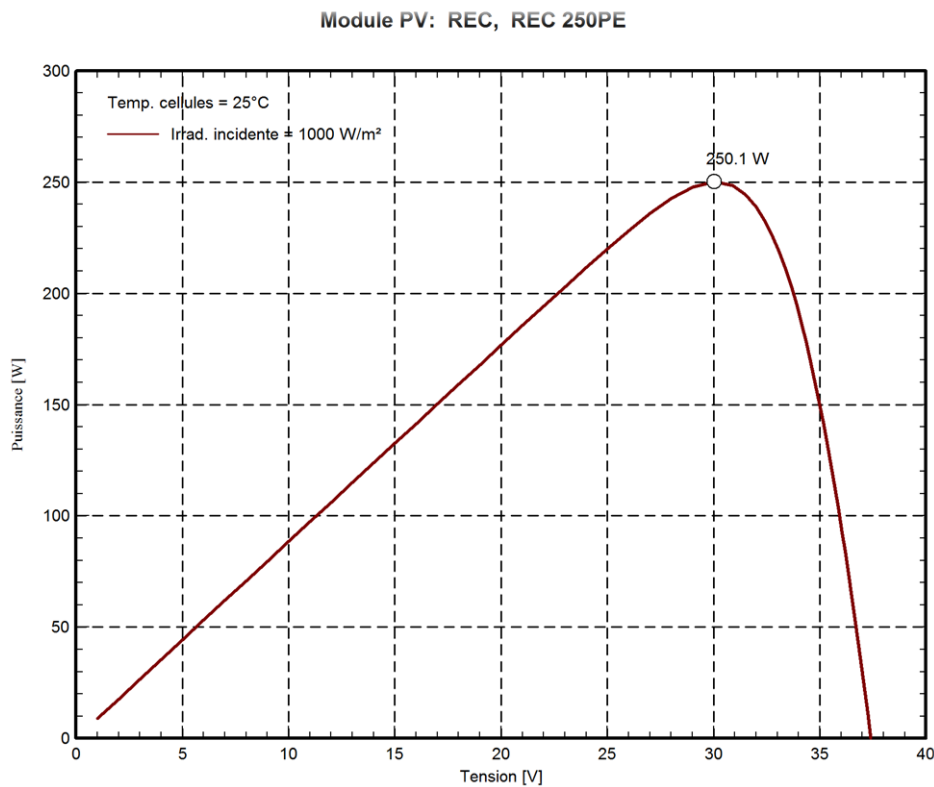


Figure (IV.1) : Caractéristique P(V) pour ($G=1000W/m^2$ T=25°C).

- On Utilise la courbe $I=f(U)$ Pour la détermination de la valeur de I_{max}=8.4 A

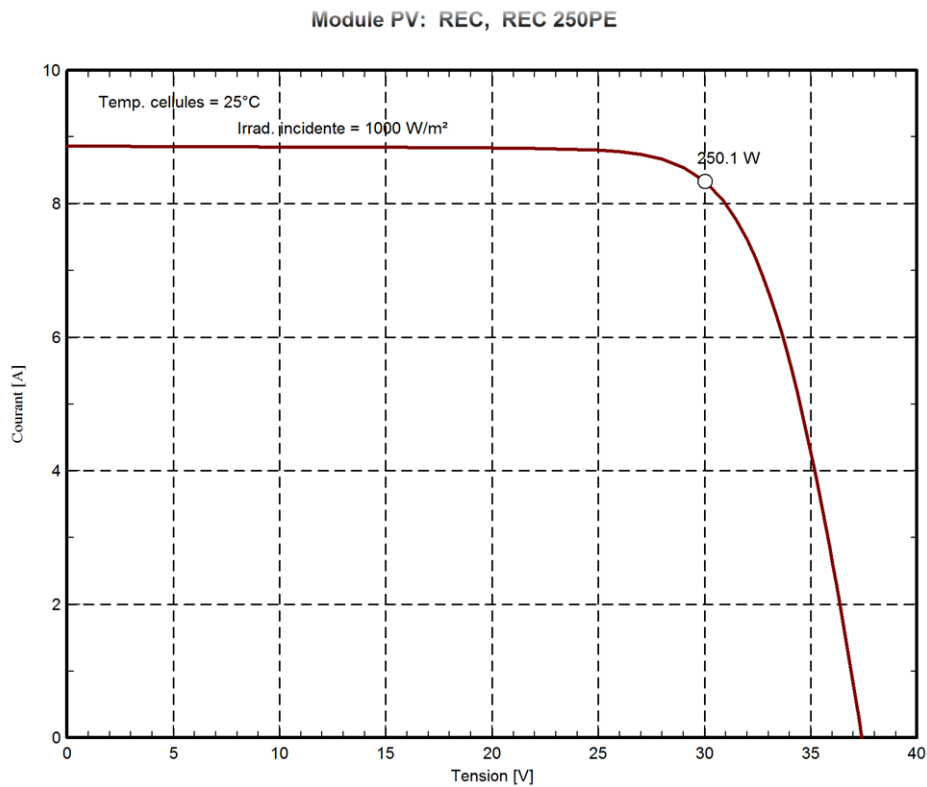


Figure (IV.2) : Caractéristique I(V) pour (G=1000W/m²T=25°C).

- La puissance lumineuse absorbée par le panneau est :

$$P_{abs} = \varphi \times S = G \times S \tag{IV.3}$$

- Le rendement énergétique :

$$\eta_{pc} = \frac{P_{max}}{G \times S} = \frac{P_{max}}{P_{lum}} \tag{IV.4}$$

Application numérique pour une surface $S = 1.650m^2$ du ce module on obtient :

$$P_{abs} = 1000 \times 1.650 = 1650 \text{ W} \tag{IV.5}$$

$$\eta_{pc} = \frac{250}{1650} = 0.1515 = 15.15\% \tag{IV.6}$$

- pour une irradiation de $200\text{W}/\text{m}^2$

On détermine P_{max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiation de $200\text{W}/\text{m}^2$. On trouve $P_{\text{max}}= 48\text{W}$.

Sur la courbe $P=f(U)$, l'abscisse du point P_{max} correspond à U_{max} . On obtient ainsi $U_{\text{max}}=29\text{V}$.

Utiliser la courbe $I=f(U)$. Pour obtenir. $I_{\text{max}}=1.65\text{A}$

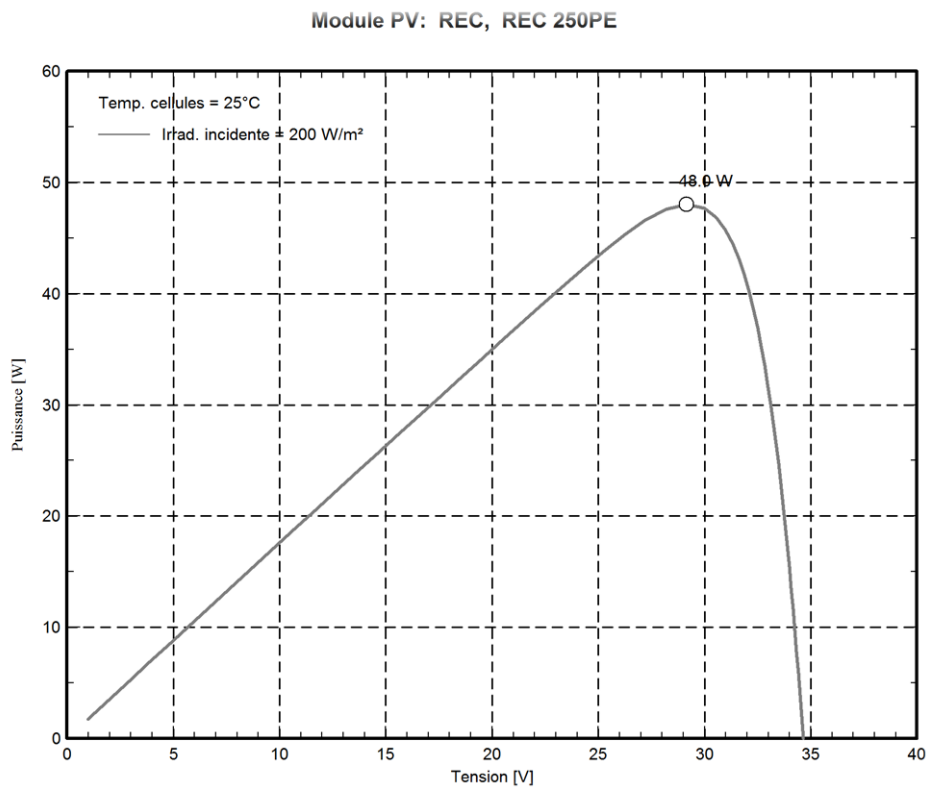


Figure (IV.3) : Caractéristique P(V) pour ($G=200\text{W}/\text{m}^2$ $T=25^\circ\text{C}$).

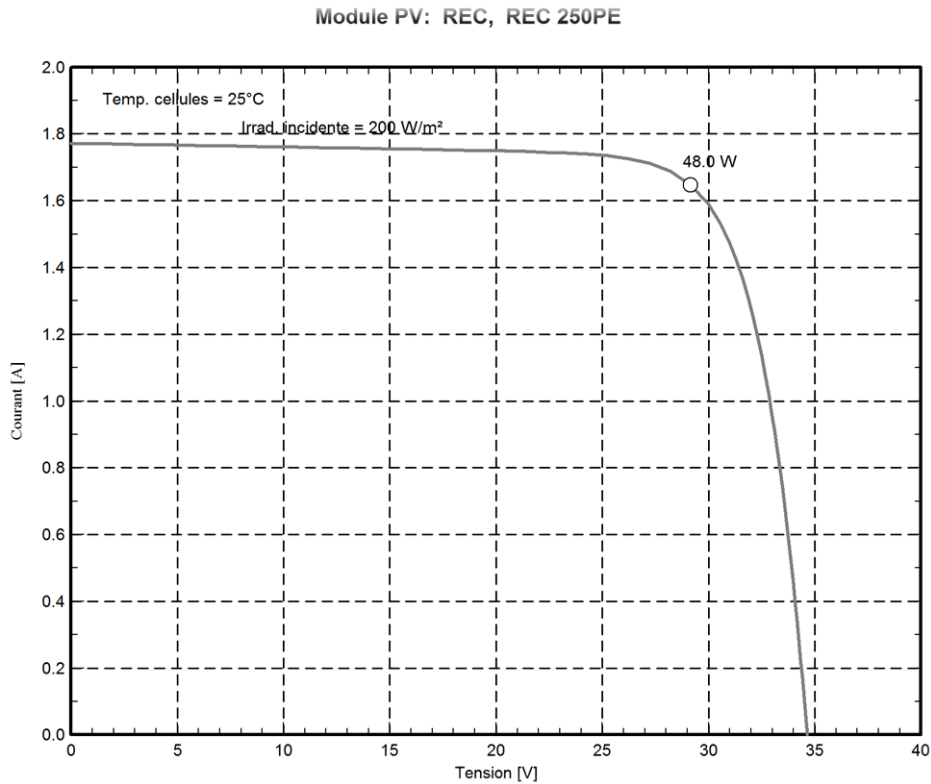


Figure (IV.4) : Caractéristique I(V) pour (G=200W/m² T=25°C).

$$P_{\text{abs}} = 200 \times 1.650 = 330 \text{ W} \quad (\text{IV.7})$$

$$\eta_{\text{pc}} = \frac{48}{330} = 0.1454 = 14.54\% \quad (\text{IV.8})$$

- pour une irradiation de 400W/m²

On détermine Pmax la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe P=f(U) pour une irradiante de 400W/m² .

On trouve Pmax= 99.2W.

La courbe P=f(U), pour une irradiation de 400W/m², l'abscisse Du Point Pmax correspond à Umax. On obtient ainsi Umax=29.5V, Imax=3.35A.

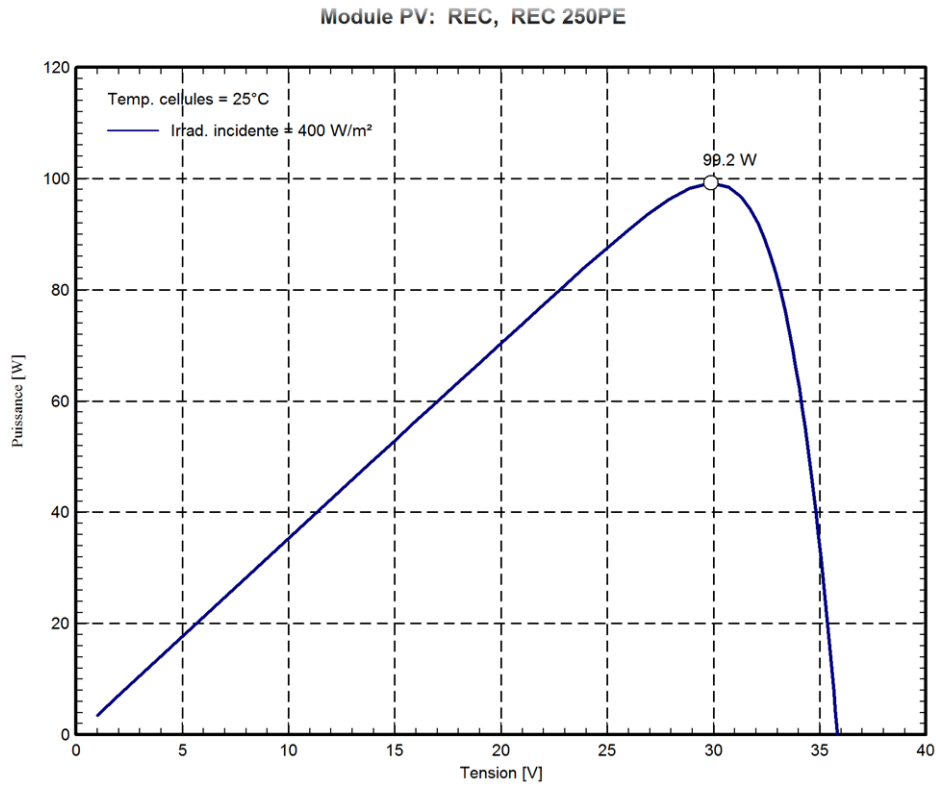


Figure (IV.5) : Caractéristique P(V) pour (G=400W/m² T=25°C).

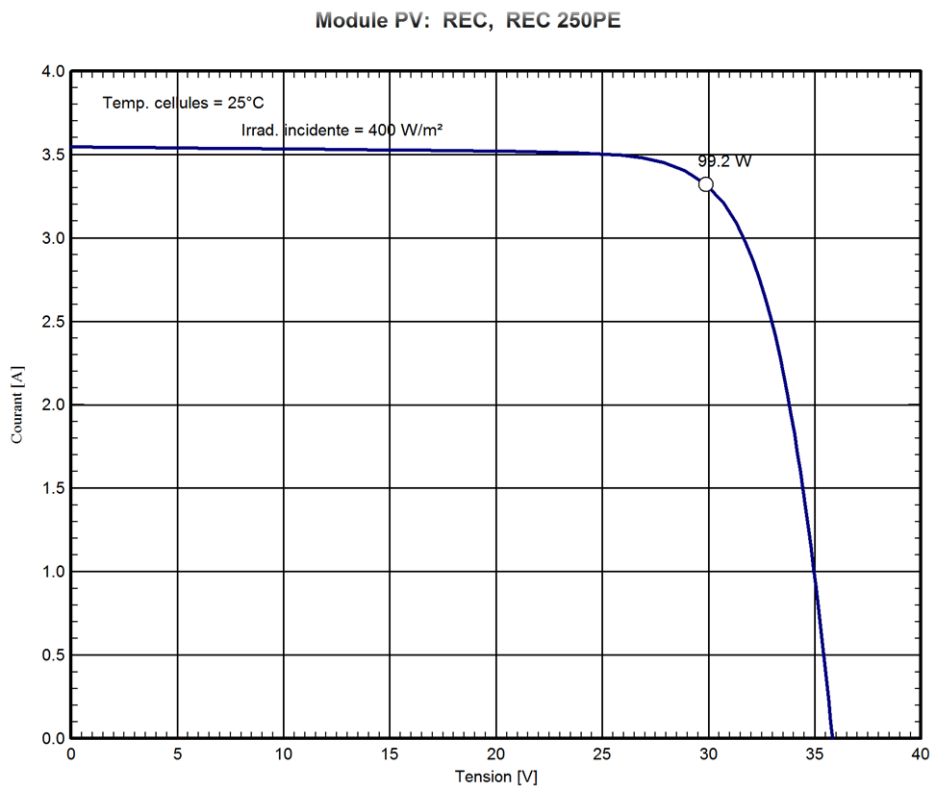


Figure (IV.6) : Caractéristique I(V) pour (G=400W/m² T=25°C).

$$P_{\text{abs}} = 400 \times 1.650 = 660 \text{ W} \quad (\text{IV.9})$$

$$\eta_{\text{pc}} = \frac{99.2}{660} = 0.1503 = 15.03\% \quad (\text{IV.10})$$

- pour une irradiation de $600\text{W}/\text{m}^2$

On détermine P_{max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiation de $600\text{W}/\text{m}^2$. On trouve

$P_{\text{max}} = 150.2\text{W}$. Sur la courbe $P=f(U)$, pour une irradiation de $600\text{W}/\text{m}^2$, l'abscisse du point P_{max} correspond à U_{max} . On obtient ainsi $U_{\text{max}} = 30\text{V}$, $I_{\text{max}} = 5.26\text{A}$

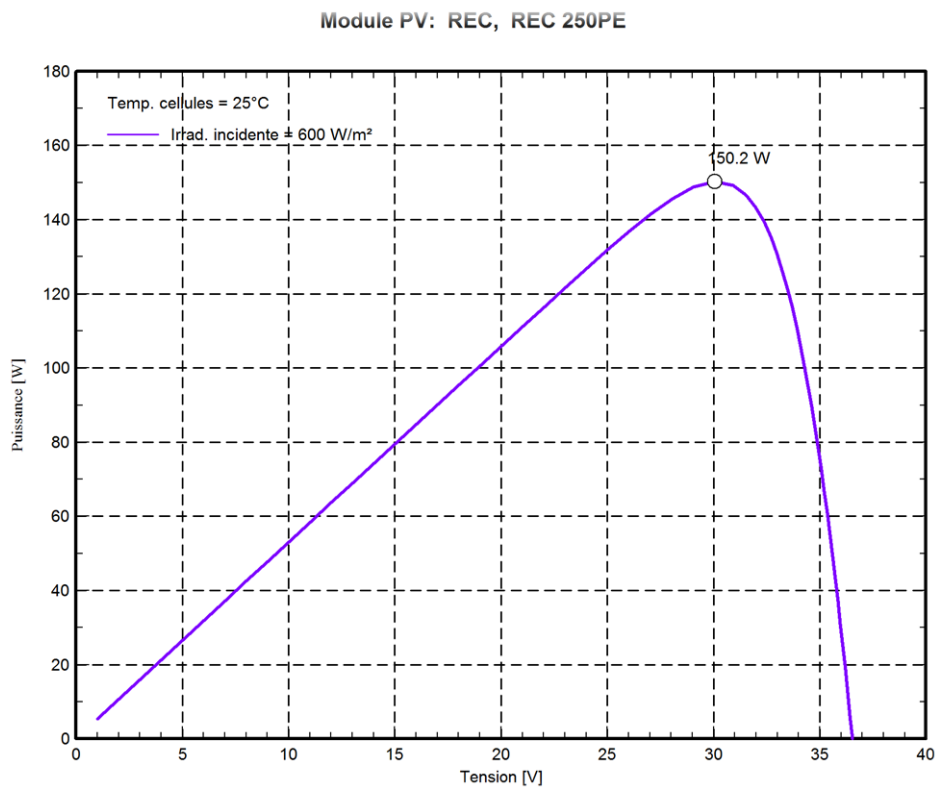


Figure (IV.7) : Caractéristique $P(V)$ pour ($G=600\text{W}/\text{m}^2 \cdot T=25^\circ\text{C}$).

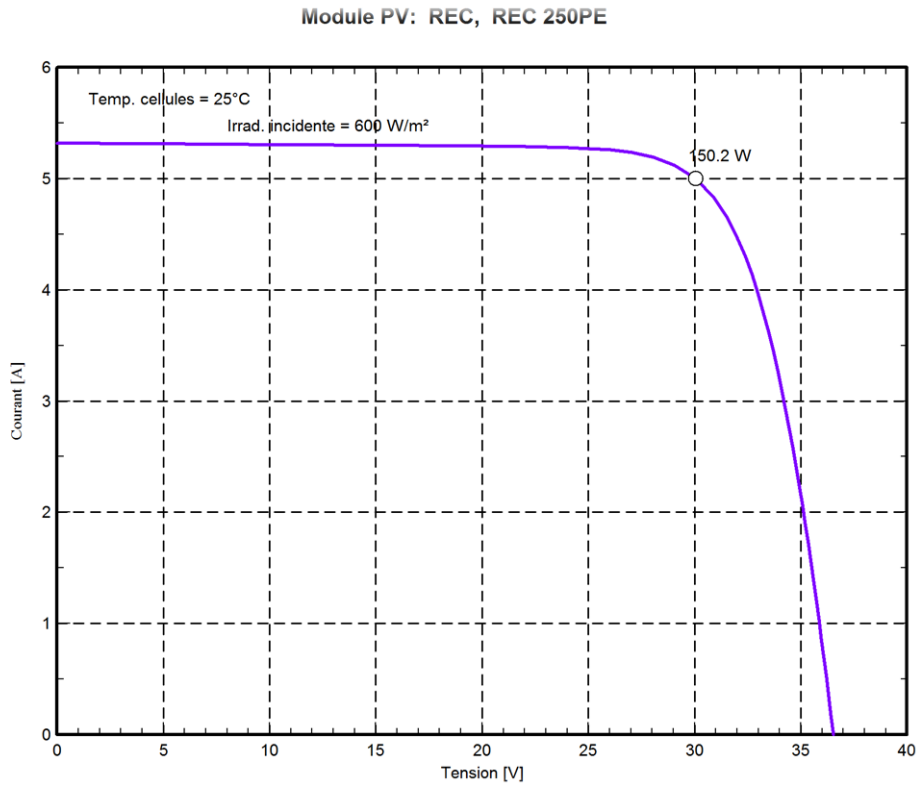


Figure (IV.8) : Caractéristique I(V) pour ($G=600W/m^2T=25^\circ C$).

$$P_{abs} = 600 \times 1.650 = 990 \text{ W} \tag{IV.11}$$

$$\eta_{pc} = \frac{150.2}{990} = 0.1517 = 15.17\% \tag{IV.12}$$

- pour une irradiation de 800W/m^2

On détermine P_{\max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiation de 800W/m^2 . On trouve $P_{\max}=200.6\text{W}$.

Sur la courbe $P=f(U)$, pour une irradiation de 800W/m^2 , l'abscisse du point P_{\max} correspond à U_{\max} . On obtient ainsi $U_{\max}=30\text{V}$, $I_{\max}=6.68\text{A}$.

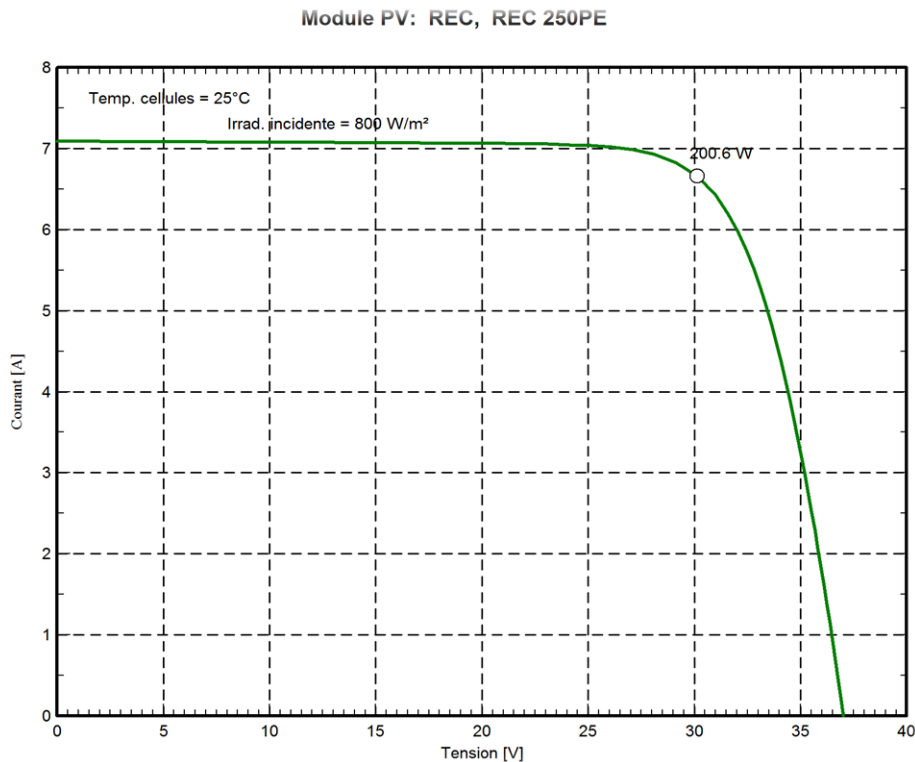


Figure (IV.9) : Caractéristique I(V) pour (800W/m^2 , $T=25^{\circ}\text{C}$).

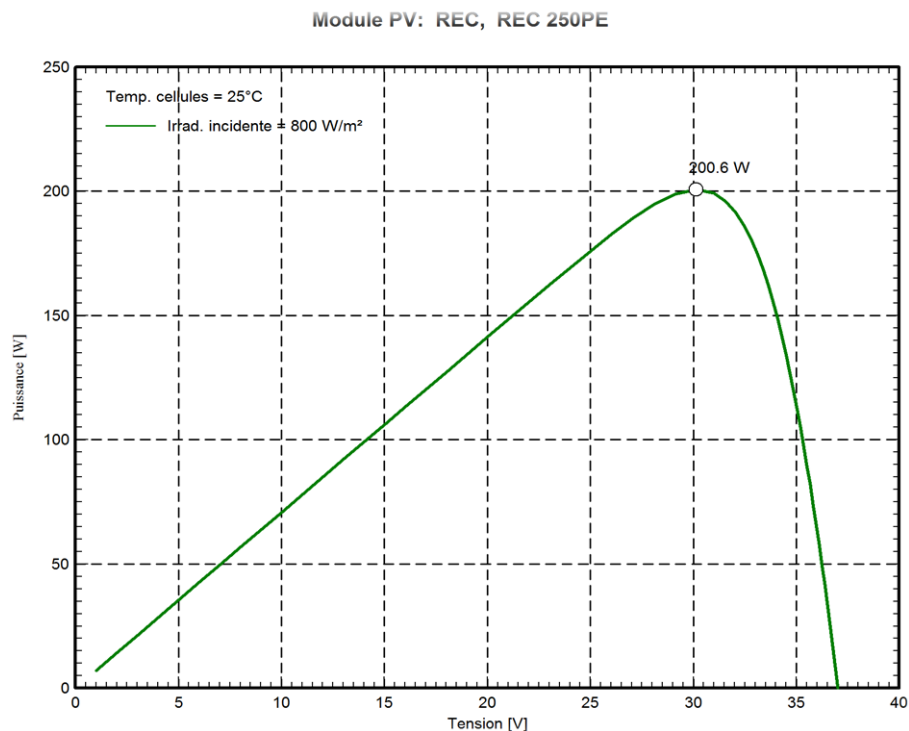


Figure (IV.10) : Caractéristique P(V) pour ($G=800\text{W}/\text{m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$).

$$P_{\text{abs}} = 800 \times 1.650 = 1320 \text{ W} \quad (\text{IV.13})$$

$$\eta_{\text{pc}} = \frac{200.6}{1320} = 0.1519 = 15.19\% \quad (\text{IV.14})$$

➤ **pour $T=45^\circ\text{C}$**

On détermine P_{max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiation de $1000\text{W}/\text{m}^2$. On trouve $P_{\text{max}}= 230.1\text{W}$.

Sur la courbe $P=f(U)$, pour une irradiation de $1000\text{W}/\text{m}^2$, l'abscisse du point P_{max} correspond à U_{max} . On obtient ainsi $U_{\text{max}}=28\text{V}$, $I_{\text{max}}=8.21\text{A}$.

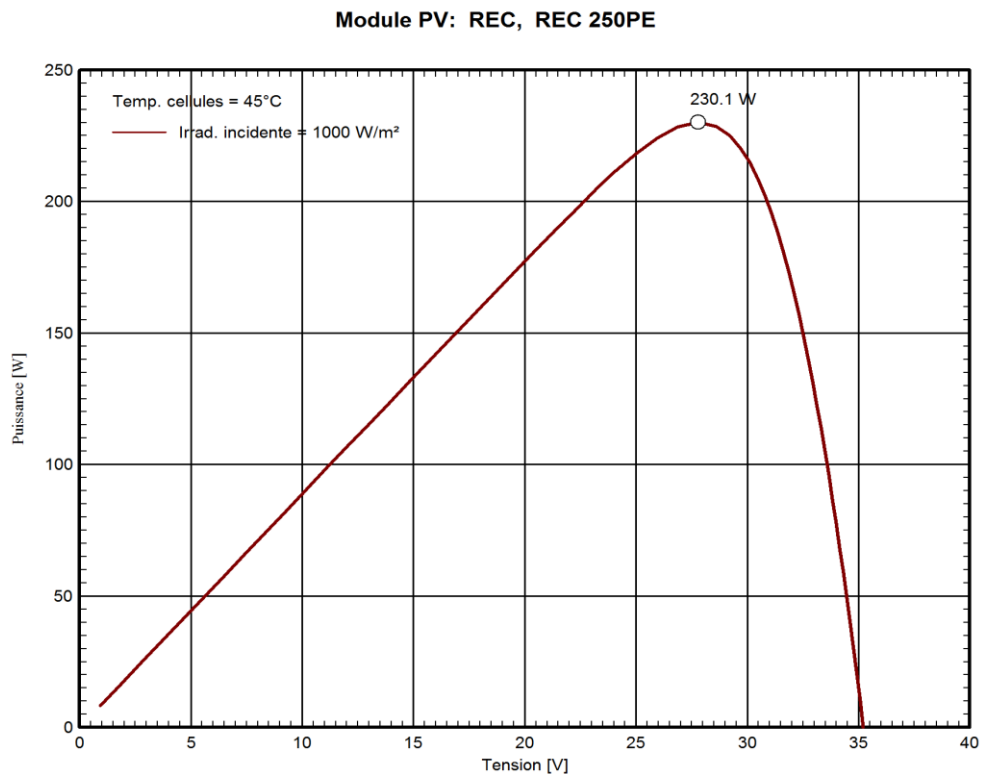


Figure (IV.11) : Caractéristique P(V) pour ($G=1000W/m^2$, $T=45^\circ C$).

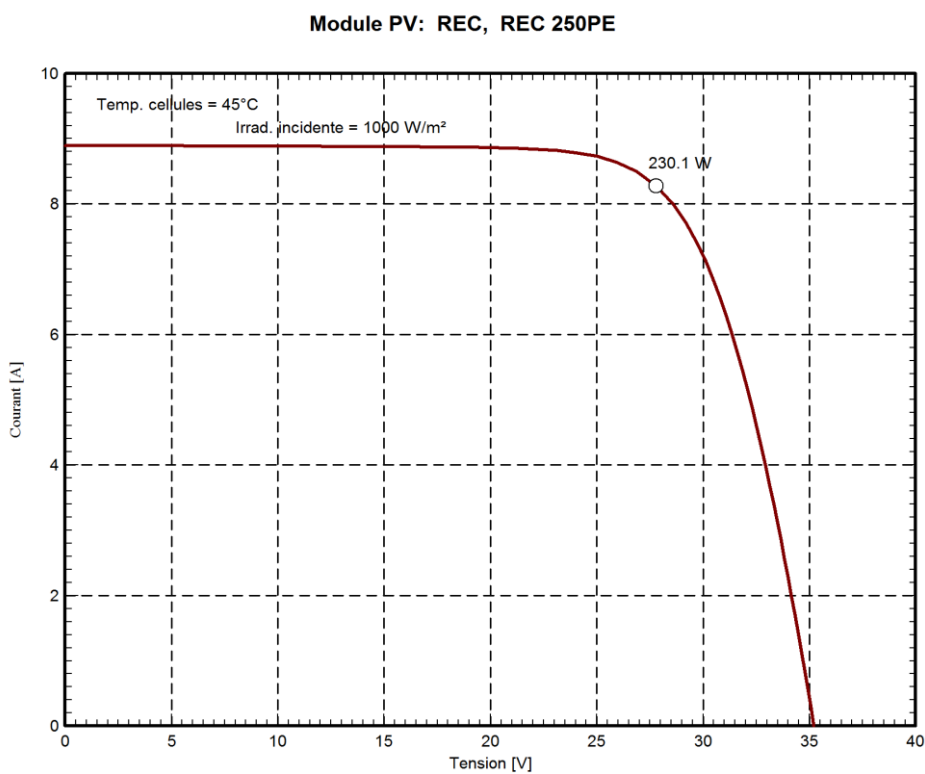


Figure (IV.12) : Caractéristique P(V) pour ($G=1000W/m^2$, $T=45^\circ C$).

$$P_{abs} = 1000 \times 1.650 = 1650 \text{ W} \tag{IV.15}$$

$$\eta_{pc} = \frac{230.1}{1650} = 0.139 = 13.9\% \tag{IV.16}$$

- pour une $G= 800\text{W}/\text{m}^2$

On détermine P_{max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiation de $800\text{W}/\text{m}^2$. On trouve $P_{max}= 184.4\text{W}$.

Sur la courbe $P=f(U)$, l'abscisse du point P_{max} correspond à U_{max} . On obtient ainsi $U_{max}=27.5\text{V}$.

Utiliser la courbe $I=f(U)$. Pour obtenir $I_{max}=6.58\text{A}$

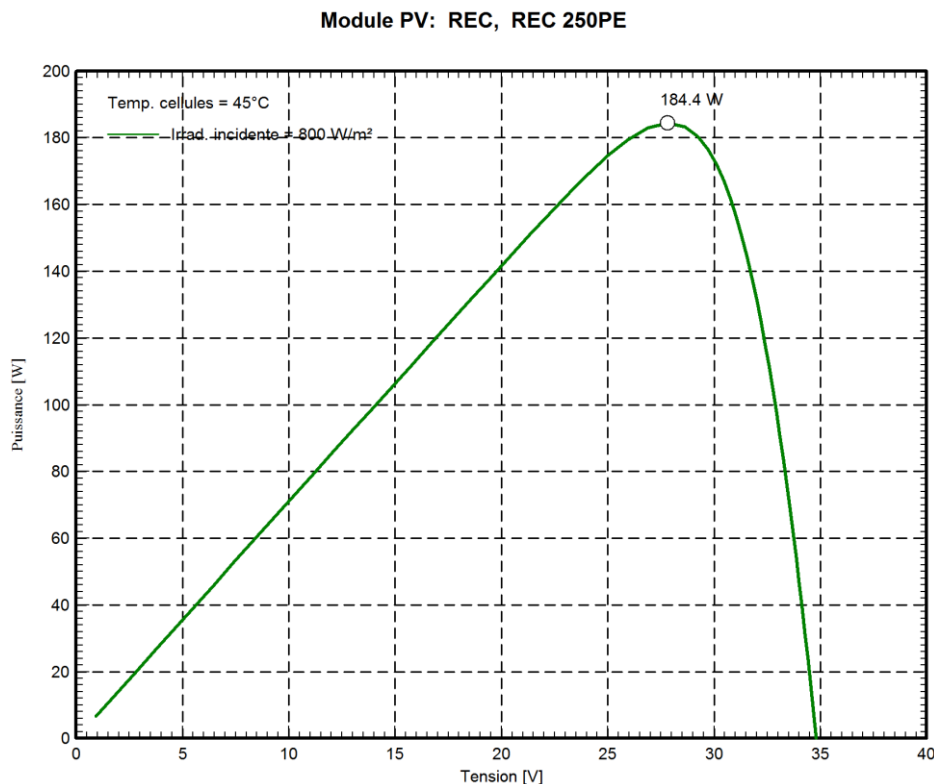


Figure (IV.13) : Caractéristique $P(V)$ pour ($G=800\text{W}/\text{m}^2$, $T=45^\circ\text{C}$).

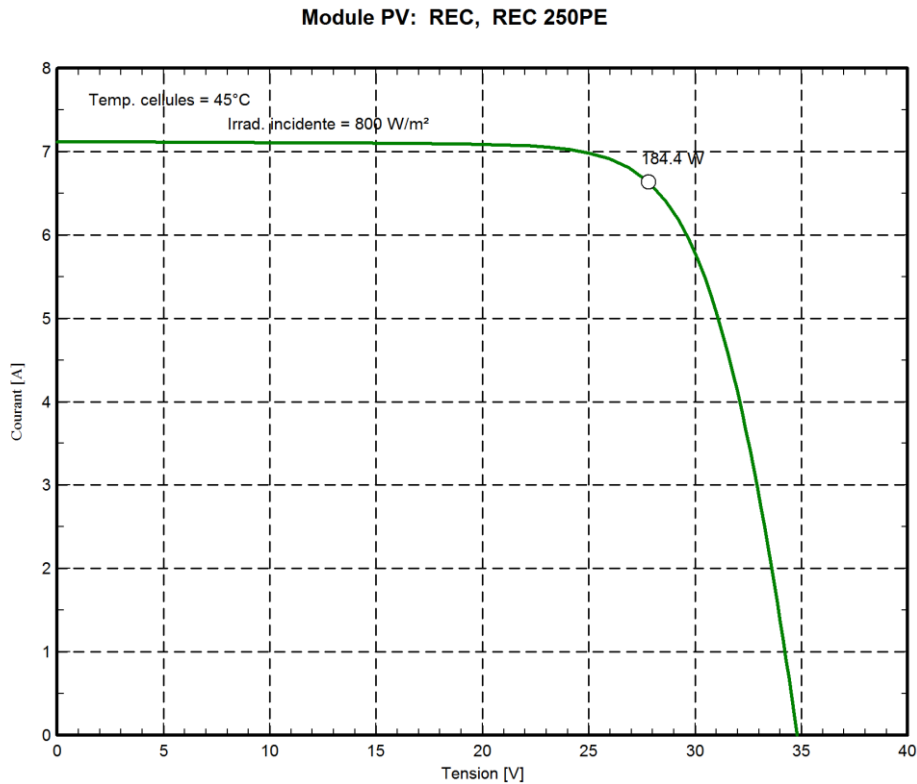


Figure (IV.14) : Caractéristique I(V) pour ($G=800W/m^2$, $T=45^\circ C$).

$$P_{abs} = 800 \times 1.650 = 1320W \tag{IV.17}$$

$$\eta_{pc} = \frac{184.4}{1320} = 0.1396 = 13.96\% \tag{IV.18}$$

- pour un $G=600W/m^2$

On détermine P_{max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiance de $600W/m^2$. On trouve $P_{max}= 138W$. Sur la courbe $P=f(U)$, pour une irradiation de $600W/m^2$, l'abscisse du point P_{max} correspond à U_{max} . On obtient ainsi $U_{max}=27.7V, I_{max}=5A$.

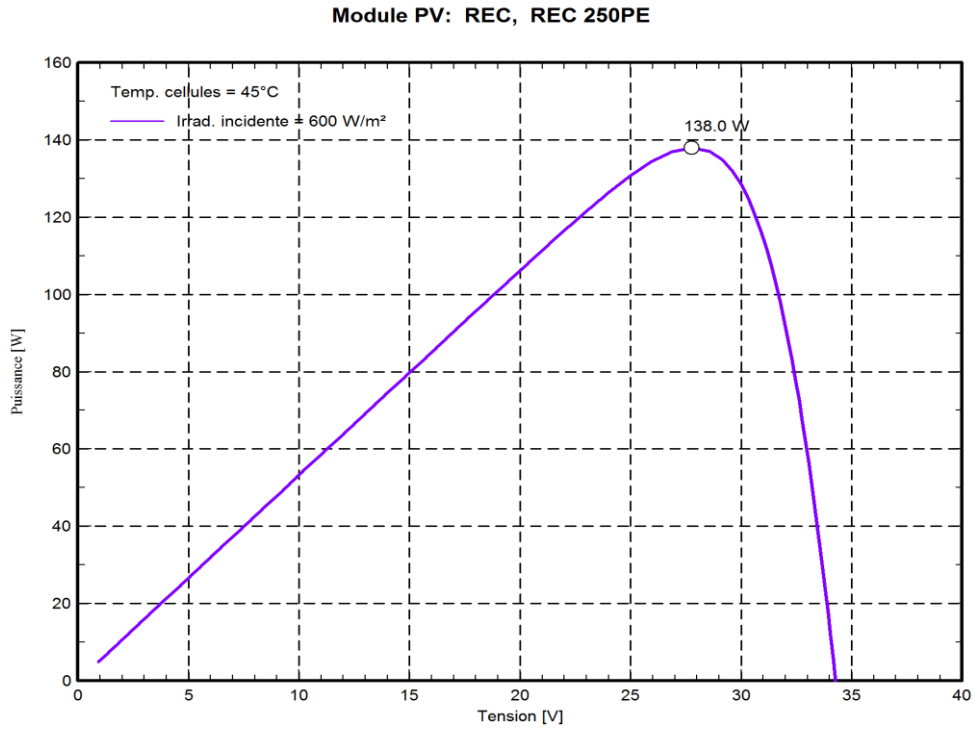


Figure (IV.15) : Caractéristique P(V) pour ($G=600W/m^2$, $T=45^\circ C$).

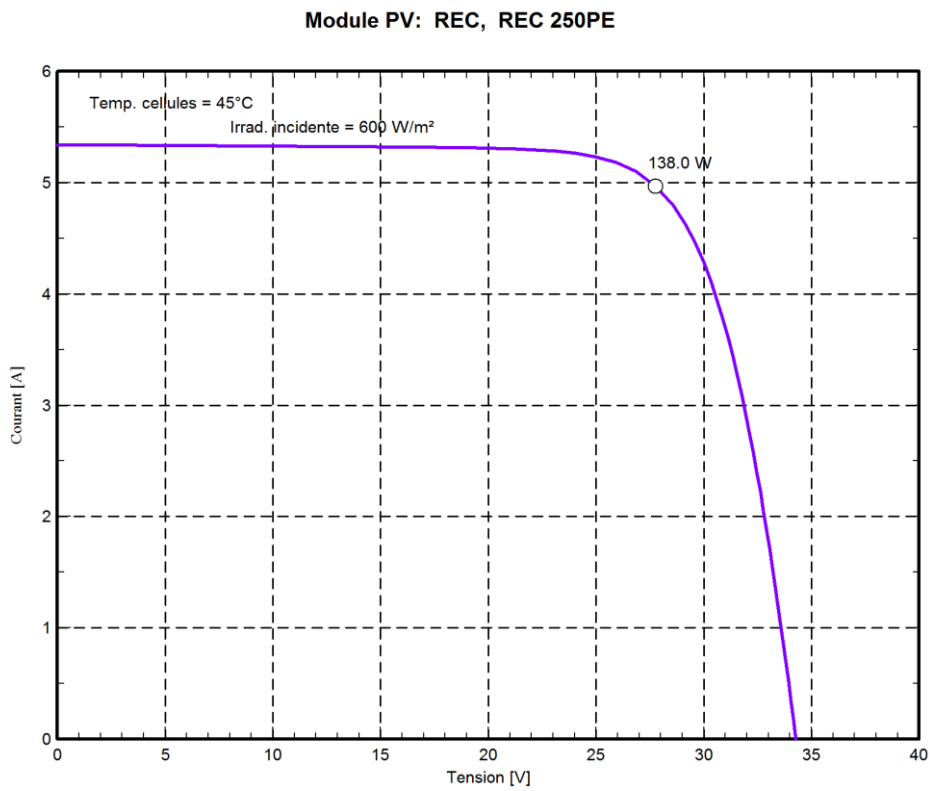


Figure (IV.16) : Caractéristique I(V) pour ($G=600W/m^2$, $T=45^\circ C$).

$$P_{\text{abs}} = 600 \times 1.650 = 990 \text{ W} \quad (\text{IV.19})$$

$$\eta_{\text{pc}} = \frac{138}{990} = 0.1393 = 13.93\% \quad (\text{IV.20})$$

- pour un $G = 400 \text{ W/m}^2$

On détermine P_{max} la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe $P=f(U)$ pour une irradiation de 400 W/m^2 . On trouve $P_{\text{max}} = 90.9 \text{ W}$.

Sur la courbe $P=f(U)$, pour une irradiation de 400 W/m^2 , l'abscisse du point P_{max} correspond à U_{max} . On obtient ainsi $U_{\text{max}} = 27.5 \text{ V}$. $I_{\text{max}} = 3.3 \text{ A}$

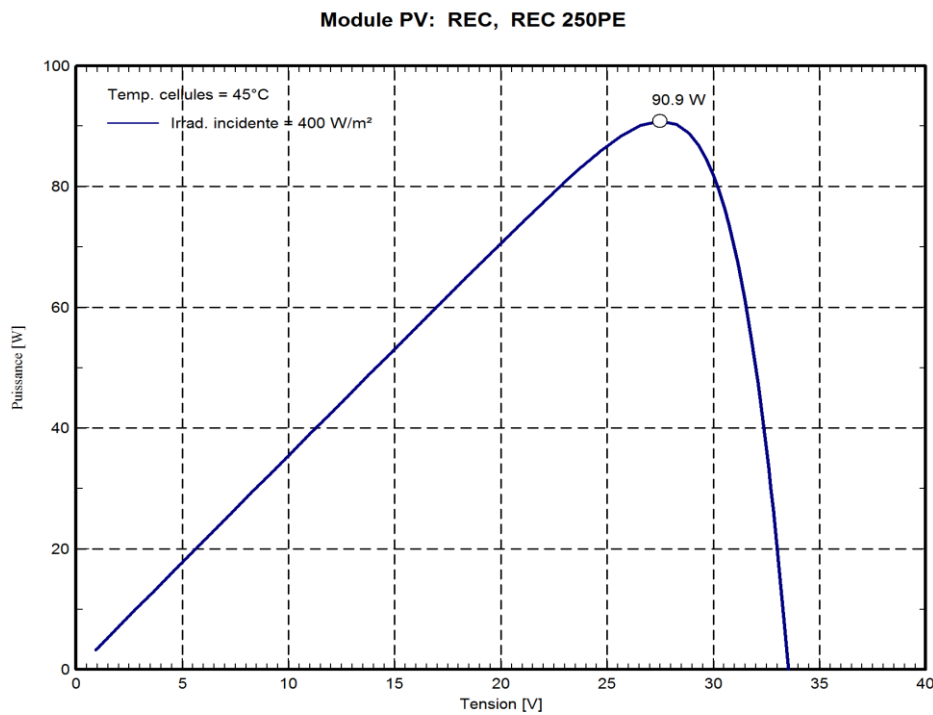


Figure (IV.17) : Caractéristique $P(V)$ pour ($G=400 \text{ W/m}^2$, $T=45^\circ\text{C}$).

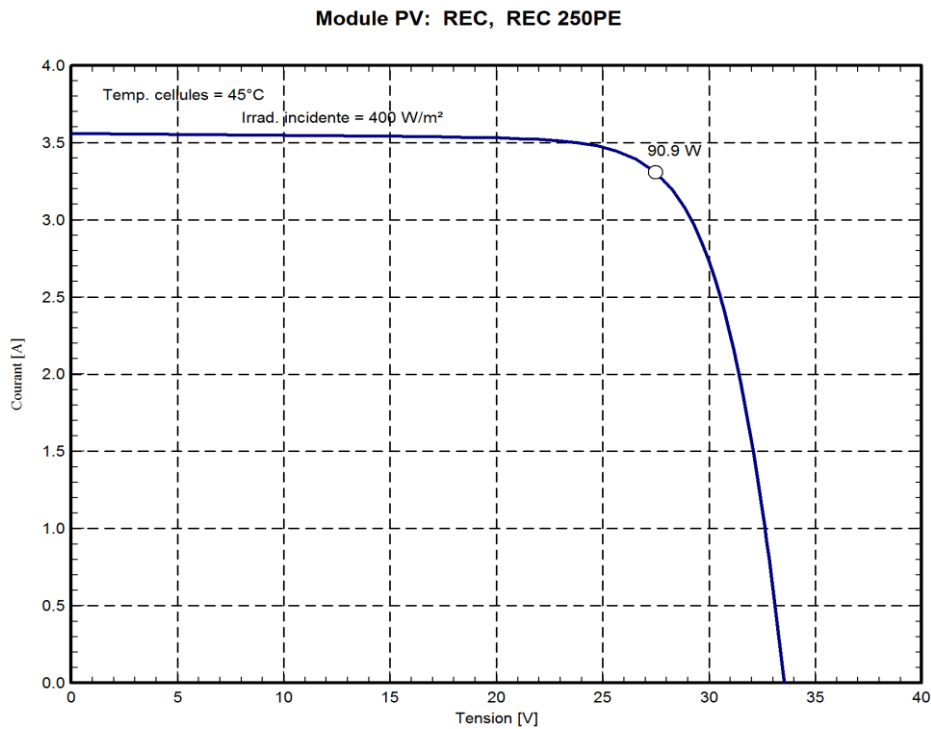


Figure (IV.18) : Caractéristique I(V) pour (G=400W/m² ,T=45°C).

$$P_{abs} = 400 \times 1.650 = 660W \tag{IV.21}$$

$$\eta_{pc} = \frac{90.9}{660} = 0.13772 = 13.77\% \tag{IV.22}$$

- pour un G=200W/m²

On détermine Pmax la puissance maximale délivrée par le panneau en lisant l'ordonnée du maximum de la courbe P=f(U) pour une irradiation de 200W/m² . On trouve Pmax= 43.6W.

Sur la courbe P=f(U), pour une irradiation de 200W/m², l'abscisse du point Pmax correspond à Umax. On obtient ainsi Umax=26.7V. Imax=1.63A.

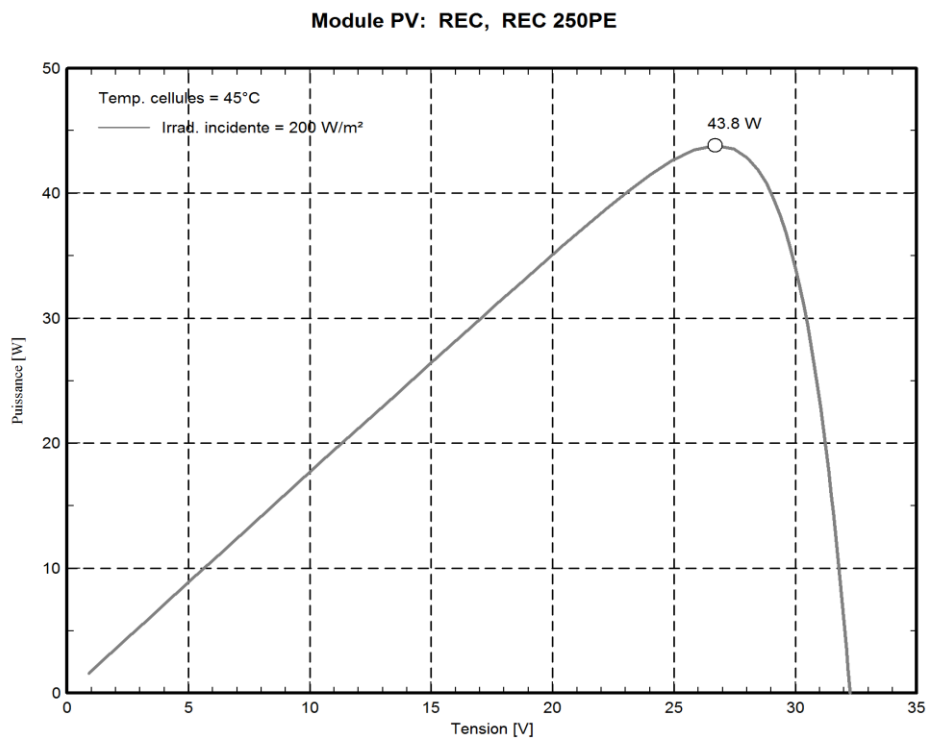


Figure (IV.19) : Caractéristique P(V) pour ($G=200W/m^2$, $T=45^\circ C$).

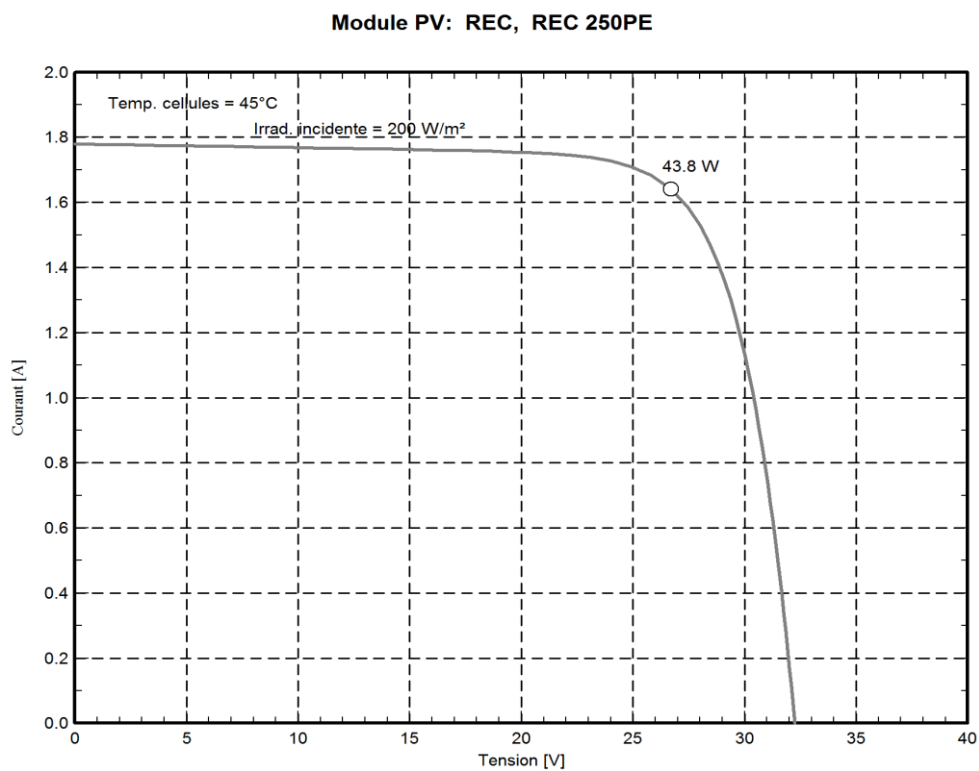


Figure (IV.20) : Caractéristique I(V) pour ($G=200W/m^2$, $T=45^\circ C$).

$$P_{\text{abs}} = 200 \times 1.650 = 330 \text{ W} \quad (\text{IV.23})$$

$$\eta_{\text{pc}} = \frac{43.6}{330} = 0.1321 = 13.2\% \quad (\text{IV.24})$$

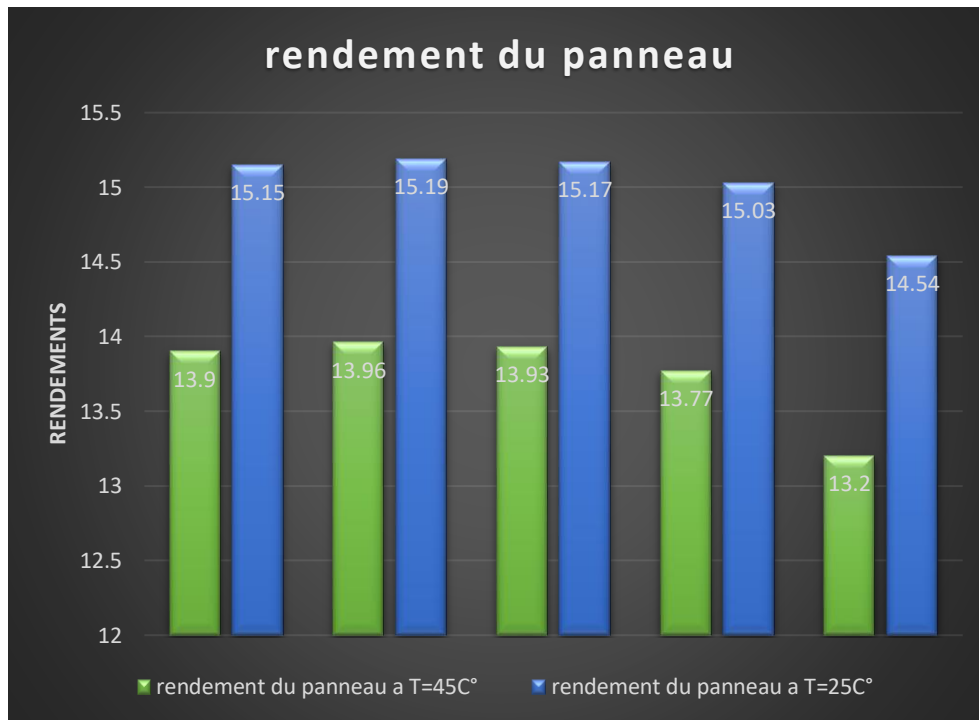


Figure (IV.21) : Le rendement de conversion a $T=25\text{C}^\circ$ et $T=45\text{C}^\circ$

D'après les calculs de rendement dans les différents cas les résultats sont présents dans la figure (IV.21).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les modules PV ont de meilleurs rendements dans un environnement froid avec ciel dégagé

IV.2.1.2. rendement énergétique

$$\eta_{\text{eng}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{G \times S} = \frac{\eta_{PC}}{FF} \quad (\text{IV. 25})$$

Avec :

FF=0.7

- **pour une température de T=25C°**

Les résultats sont présentés dans le tableau.

Irradiations(w/m ²)	Rendement de conversion	Rendement énergétique
	η_{PC}	η_{eng}
1000	15.15%	21.64%
800	15.19%	21.7%
600	15.17%	21.67%
400	15.03%	21.47%
200	14.54%	20.77%

Tableau(IV.1) : les valeurs de rendement énergétique et de conversion a T=25C° et G varié.

- **Pour une température de T=45C°**

Les résultats sont présents dans le tableau.

Irradiations(w/m ²)	Rendement de conversion	Rendement énergétique
	η_{PC}	η_{eng}
1000	13.9	19.85
800	13.96	19.94
600	13.93	19.9
400	13.77	19.67
200	13.20	18.85

Tableau(IV.2) : les valeurs de rendement énergétique et de conversion a T=45C° et G varié.

IV.2.1.3.étude énergétique sur le site d'Adrar

On utilise les données de l'annexe 1 pour obtenir les deux rendements énergétiques et de conversion.

Heure	Irradiations(w/m^2)	température de module	P max	Rendement de conversion η_{PC}	Rendement énergétique η_{eng}
7:00	70	29.60	15.1	13.07%	18.67%
8:00	235	36.84	54	13.92%	19.88%
9:00	446	46.1	101.3	13.76%	19.65%
10:00	584	52.75	129.4	13.42%	19.17%
11:00	684	57.87	148.6	13.16%	18.8%
12:00	787	63	167.2	12.87%	18.38%
13:00	804	65	169.2	12.75%	18.21%
14:00	796	65.775	166.7	12.69%	18.12%
15:00	710	63.68	150	12.80%	18.28%
16:00	575	59.76	123.3	12.99%	18.55%
17:00	395	53.74	86	13.19%	18.84%
18:00	136	44.45	29	12.92%	18.45%
19:00	20	39.125	3.4	10.30%	14.71%

Tableau(IV.3) : les valeurs des rendements η_{PC} et η_{eng} pendent en journée

IV.2.2.étude exérgétiques

IV.2.2.1.définition de l'exergie

L'exergie d'un système dans des conditions (T, S, U...) données correspond au travail utile maximal que ce système pourrait fournir en rejetant l'énergie thermique inutilisée dans un réservoir d'énergie thermique (RET) de référence à T_0 et p_0 et ceci jusqu'à ce que ce système soit parfaitement relâché et en équilibre avec ce RET. L'exergie dépend du choix du RET de référence : on dit que c'est une fonction d'état extrinsèque du système. • Le système est dit «

parfaitement relâché » quand il ne possède plus d'énergie de tension interne, quand sa température et sa pression sont égales à celles du RET et si l'effet des champs extérieurs n'est pas négligeable quand son énergie potentielle due à ces champs est nulle.

❖ Bilan exérgétique sur le module

Le bilan exérgétique appliqué sur le capteur PV (rec250) est le suivant :

$$Ex_{in} = Ex_{out} - Ex_{loss} + \text{irréversibilité} \quad (\text{IV. 26})$$

Ex_{in} : Exérgie entrée

Ex_{out} : Exérgie sortie

Avec :

$$Ex_{in} = A \times G \times \left[1 - \frac{T_a}{T_s} \right] \quad (\text{IV. 27})$$

A : surface de module PV en m^2

G : irradiation en w/m^2

T_a : Température ambiante

T_s : Température du soleil

$$\begin{aligned} Ex_{out} &= Ex_{thermique} + Ex_{electrique} \\ &= UA(T_m - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_m} \right) + P_{max} \end{aligned} \quad (\text{IV. 28})$$

Avec ;

$$U = h_{convection} + h_{radiation} \quad (\text{IV. 29})$$

On note que :

$h_{radiation} < 0$, Donc elle est négligeable.

$$h_{convection} = 2.8 + 3 v_v \quad (\text{IV. 30})$$

T_m : Température du module

T_a : Température ambiante

v_v : vitesse du vent

Les résultats des mesures de l'annexe 1 sont présentées dans les Figures (IV.22)et (IV.23).

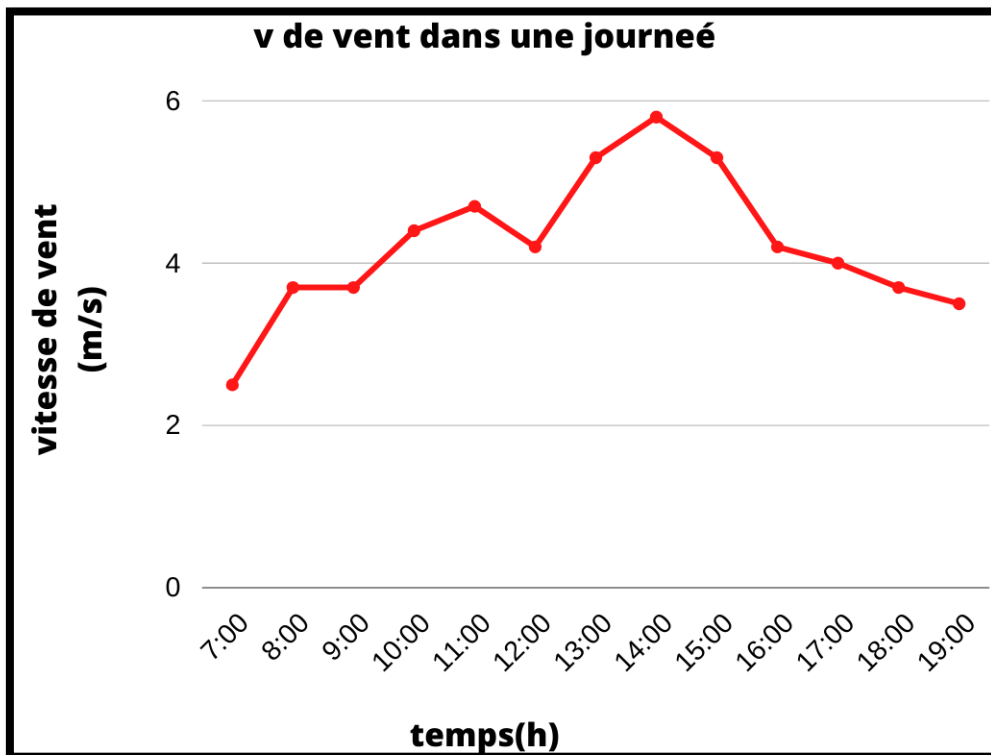


Figure (IV.22) : variation de vitesse de vent en fonction de temps $V=F(t)$

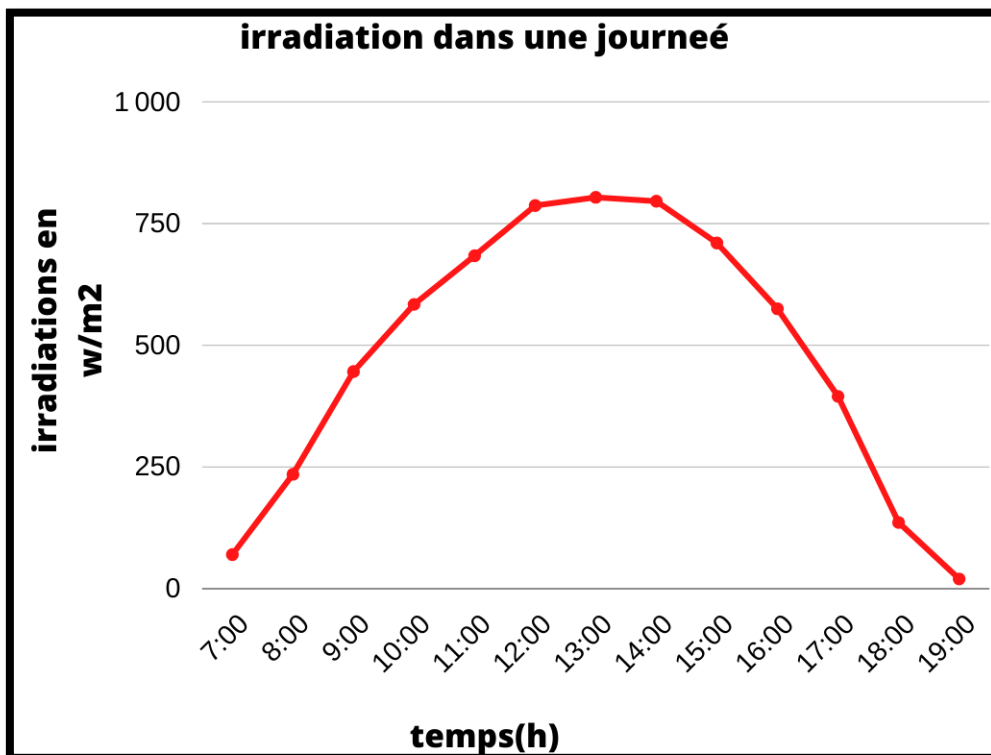


Figure (IV.23) : variation des irradiations en fonction de temps.

Calcul de Ex_{sortie} : Pour cela il faut chercher les deux paramètres électrique de ce panneaux I_{mp} et v_{mp} pour calculé $Ex_{electrique}$.

Irradiation	I_{mp}	v_{mp}	P max
70	0.55	27.2	15.1
235	1.806	29.9	54
446	3.37	30	101.3
584	4.31	30	129.4
684	4.95	30	148.6
787	5.57	30	167.2
804	5.64	30	169.2
796	5.55	30	166.7
710	5	30	150
575	4.11	30	123.3
395	2.89	29.7	86
136	1.017	28.5	29
20	0.136	25	3.4

Tableau (IV. 4):les valeur de (G.Imp.Vmp.Pmax)de 7:00 a19:00

-Calcul et analyse :

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{out}}{Ex_{in}} \tag{IV. 31}$$

Avec :

$$Ex_{out} = UA(T_m - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_m}\right) + P_{max} \tag{IV. 32}$$

Et :

$$Ex_{in} = A \times G \times \left[1 - \frac{T_a}{T_s}\right] \tag{IV. 33}$$

Calcule la température de module :

$$T_m = T_c = T_a + \frac{G}{800} (T_{noct} - 20) \tag{IV.34}$$

T_{noct} : température nominale de fonctionnement ($45 \pm 2c^\circ$)

Dans notre cas on considère $T_{noct} = 45 c^\circ$

Heure	irradiations(w/m ²)	Température ambiante (c)	température de module
7 :00	70	27.4	29.60
8 :00	235	29.5	36.84
9 :00	446	32.2	46.1
10 :00	584	34.5	52.75
11 :00	684	36.5	57.87
12 :00	787	38.4	63
13 :00	804	39.8	65
14 :00	796	40.9	65.775
15 :00	710	41.5	63.68
16 :00	575	41.8	59.76
17 :00	395	41.4	53.74
18 :00	136	40.2	44.45

Tableau (IV. 5):les valeurs résultant de calcul de T de module .

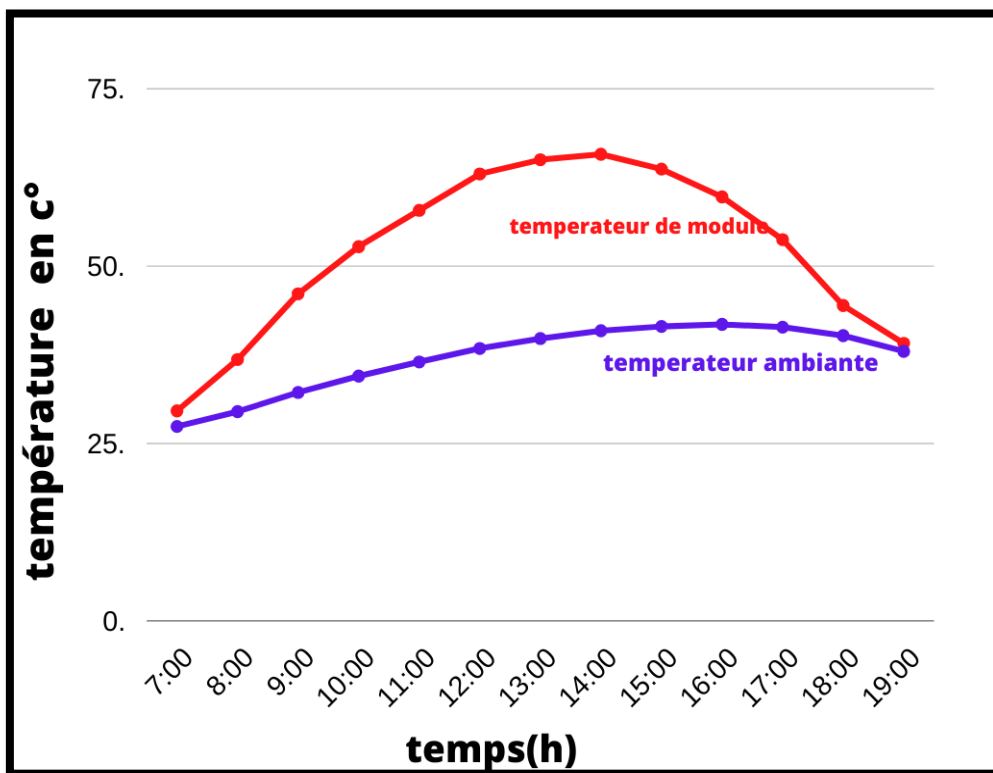


Figure (IV.24) : variation de température du module et de température ambiante en fonction de temps (une journée).

Calcul de l'exergie entrante et exergie de sortie :

Heure	Ex_{out}	Ex_{in}	η_{ex}
7 :00	18.28	114.55	15.95%
8 :00	90.57	382.85	23.65%
9 :00	207.12	722.06	28.68%
10 :00	313	941	33.26%
11 :00	391.6	1098.5	35.64%
12 :00	441.48	1259.6	35.04%
13 :00	503.04	1284.98	39.1%
14 :00	513.10	1021.1	50.24%
15 :00	416	1135	36.65%
16 :00	281	921.22	30.50%
17 :00	167	635.1	26.29%
18 :00	41.21	219.92	18.73%
19 :00	3.89	32.47	11.98%

Tableau(IV.6): les valeurs de l'exergie d'entrée, de sortie et de rendement exérgétique.

IV.3.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présente et étudie les performance énergetique et exergetique d'un module photovoltaïque (les rendements),en deux differents temperature de cellule (25c°.45c°) pour plusieurs et variante parametres qui influence sur le rendement du module comme :la vitesse de vent,irradiation ,temperature ambiante et celle du module .

Nous observons que on obtenus des puissance eleveé a chaque fois le degré de l'irradiation s'augmente ainsi que pour les rendements .

On observe aussi que l'augmentation de la temperature du module influent sur les rendments .

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut honorer la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

Le travail effectué dans ce mémoire est une contribution à l'étude et la compréhension de principe d'énergie solaire en générale.

Avant d'aborder une analyse énergétique et exergétique sur les performances d'un module PV nous avons tout d'abord étudié le contexte et la problématique de l'énergie solaire photovoltaïque, Et L'effet des différents facteurs externes (éclairage, température, vent) Sur les comportements des modules photovoltaïques Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir une connaissance approfondie du comportement d'un générateur photovoltaïque.

Nous avons établi sous les logiciels Matlab2013 et PVSYSYT, qui nous permettent de tracer la caractéristique I-V, P-V, pour différentes éclairements et températures solaires et de calculer la puissance maximale délivrée par le module photovoltaïque correspondante. Finalement ce modeste travail nous a permis d'obtenir des résultats qu'on peut Exploiter à l'avenir.

Le premier résultat important obtenu c'est que les bases température nous donnent des puissances électriques générées par le panneau photovoltaïque, supérieure par rapport à grandes températures.

Le second résultat intéressant c'est que les modules photovoltaïques ont des meilleures performances dans un environnement froid avec Ciel dégagé.

Le rendement énergétique d'un module est influencé par plu suer paramètre métrologique et leur efficacité est presque toujours faible devant les autres énergies renouvelable.

L'extraction de énergie utile perdue c'est à dire l'exergie augmente l'efficacité et le rendement énergétique .

Bibliographie

- [1]. [<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables>]22/06/2021.
- [2]. [<https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>]23/06/2021 à 11:20.
- [3]. M.Tchinang. L'énergie pour le développement au Cameroun. L'Harmattan, Paris, 2011.
- [4]. Mémoire de Master Option Energétique et Matériaux (Tlemcen) ; Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé clés année 06 juillet 2011.
- [5]. M. Wolf, " Revêtement nanostructure pour absorbeur solaire thermique résistant à la Chaleur et à la corrosion " Département of Electric al Engineering, Université of Pennsylvanien, Philadelphia, Solari Celles, pp. 53-63, 1986.
- [6]. W. Belaid, "" Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire"" , Mémoire Master, Université de Tlemcen, 2014.
- [7]. A. BOUDEN, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [8]. R. CHENNI, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [9]. Z. BENDJELLOULI, contribution à la modélisation d'une cellule solaire, Université de Bechar, 2009.
- [10]. J.A. Duffie, W. A. Beckman, "Solar engineering of thermal processes, 1st ed., Wiley, New York, 1980.
- [11]. C.P. Masson, "" Physique des semi-conducteurs, Cours universitaire, Ecole polytechnique, Université de Marseille, 2004.
- [12]. <http://www.ines-solaire.com/solpv/photo/photo1.gif>. (01/10/2020 à 12:00).
- [13]. M. Salmi, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).
- [14]. en, M.F.Shraif« Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque.
- [15]. Fête de la science L'histoire des sciences : L'effet photovoltaïque 2007. Document PPT www.fete-de-la-science.fr. (05/05/2020 à 23:00).
- [16]. C.R. Osterwald, Mc. Mahon T.J. "History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review". Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2009.
- [17]. J.H Wohlgenuth., S. Kurtz. "Reliability Testing Beyond Qualification as a Key Component in Photovoltaic's Progress Toward Grid Parity". IEEE International Reliability Physics Symposium Monterey, California, April 10-14, 2011.
- [18]. K. Kabidi, Expérimentation modélisation du comportement énergétique et thermique d'un séchoir solaire sous le climat de la région de Rabat, thèse de doctorat, université Mohammed v – Agdal faculté des sciences Rabat, 10 Juillet 2014.
- [19]. M.amjahdi, J.Lemale « Adopter le solaire –thermique et photovoltaïque ». DUNOD. Paris 2011.
- [20]. A.Labouret, P.cumunel, J.-P.Braun, B.Faraggi. « Cellules solaires, les bases de.

- [21]. A.Labouret, M.Villoz. Energie solaire photovoltaïque . édition Moniteur 2006.
- [22]. A.Labouret, M.Villoz ,« Energie solaire photovoltaïque »,Dunod,paris, ,(2003,2005), ISBN 2 10049052 4.
- [23]. Degla Mohammed, Larbi Ben Ahmed Bachir « Dimensionnement d'un Système dePompage Photovoltaïque », Mémoire MASTER PROFESSIONNEL ; UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.2017.
- [24]. M.A. Quintana., D.L. King., T.J. McMahon C.R. Osterwald. "Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules". Proc. 29 IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002.
- [25]. J.H Wohlgemuth., S. Kurtz. "Reliability Testing Beyond Qualification as a Key Component in Photovoltaic"s Progress Toward Grid Parity". IEEE International Reliability Physics Symposium Monterey, California, April 10-14, 2011.
- [26]. S. Kaplanis., E. Kaplani. "Energy performance and degradation over 20 years performance of BP c-Si PV modules". Simulation modeling practice and theory, 2011.
- [27]. M.C. Alonso-Garcia., J.M. Ruiz., F. Chenlo. "Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module". Solar Energy Materials & Solar Cells, Volume 90, 2006.
- [28]. A. BOUDEN, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque,.
- [29]. <https://solabel.be/photovoltaique/nossolutions/>, Solab energie et bâtiment E-link .
- [30]. A. BOUZID et M. AZIZI «Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour L'alimentation d'une ferme Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application », Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état, 2008.
- [31]. F. Lasnier, T. G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [32]. Mohamed, HARAUBIA. Etude simulation d'un générateur de panneau. 2019.
- [33]. Solar, J.A. Roger « Theory of the Direct Coupling between DC Motors and Photovoltaic.
- [34]. PV, W. Anis and H.M.B. Metwally « Dynamic Performance of a Directly Coupled.
- [35].solar designTOOL.com.10-07-2021
- [36] page, Le photovoltaïque Module 3 – Fonctionnement et Technologies Novembre 2010.
- [37].(<https://www.dictionnaire-environnement.com>).9-07-2021.
- [38].cder-urer.ms adrar 16/08/2020.

RESUME :

En raison de la détérioration des prix du pétrole, il est devenu nécessaire de rechercher des sources alternatives. L'énergie solaire est l'une des sources alternatives les plus importantes et présente de nombreux avantages et peut être utilisée dans divers domaines.

Les résultats suggèrent que le module a des bonnes performances pour un niveau d'éclairage supérieur à 600 w/m^2 avec des basses températures.

L'amélioration du rendement du panneau est liée à la conversion et la diminution de l'exergie.

Mot clé : photovoltaïques, exergie, énergie solaire.

ملخص

بسبب تدهور أسعار النفط، أصبح من الضروري البحث عن مصادر بديلة. تعتبر الطاقة الشمسية من أهم المصادر البديلة ولها مزايا عديدة ويمكن استخدامها في مختلف المجالات.

أظهرت النتائج ان الوحدة تتمتع بأداء جيد لمستوى اضاءة أكبر من ستمئة واط/متر مربع مع درجات حرارة منخفضة.

تحسين كفاءة اللوح مرتبط بالتحويل وتقليل الاجهاد.

كلمة مفتاحية: كهروضوئية، طاقة شمسية، الاجهاد

Abstract

Due to the deterioration of oil prices, it has become necessary to seek alternative sources.

Solar energy is one of the most important alternative sources, has many advantages, and can use in various fields .

The results show that the module has good performance for an illumination level greater than 600 w/m^2 with low temperatures.

The improvement of the efficiency of the panel is related the conversion and reduction of the exergy.

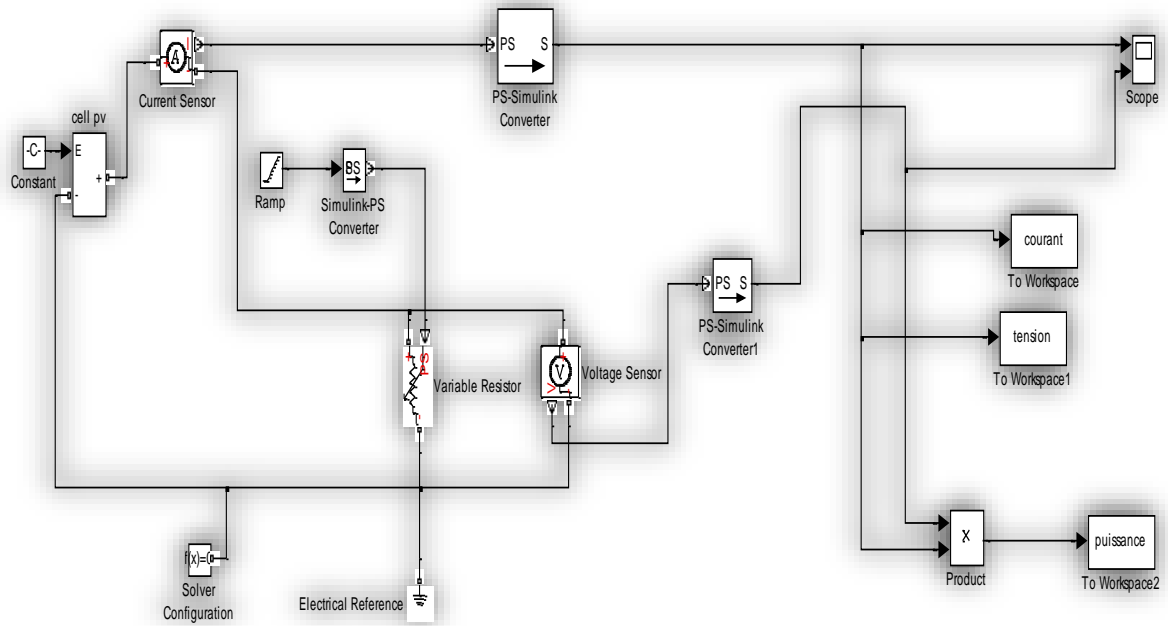
Keyword : photoelectric ,stress, Solar energy

Annexe

On a réalisé une étude dans un site saharien a Adrar le 16/08/2020 et on a obtient ce tableau.

Heure	Irradiations(w/m^2)	Vitesse (m/s)	Temperature ambiante (C°)
7:00	70	2.5	27.4
8:00	235	3.7	29.5
9:00	446	3.7	32.2
10:00	584	4.4	34.5
11:00	684	4.7	36.5
12:00	787	4.2	38.4
13:00	804	5.3	39.8
14:00	796	5.8	40.9
15:00	710	5.3	41.5
16:00	575	4.2	41.8
17:00	395	4	41.4
18:00	136	3.7	40.2
19:00	20	3.5	38.5

Annexe 1 : résultant des mesure qui effectué sur le site de Adrar.[38]



Annexe 2 : Schéma bloc de la cellule PV en MATLAB-SIMULINK.