



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE «Abbés LAGHROUR» DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**



Département Sciences de la matière

N° de série :.....

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Physique

Option : Physique des matériaux

Etude et simulation d'un module photovoltaïque

Dirigé par : **Dr. Mellal saïda**

Réalisé par :

- FARTAS HAYET
- OUANNASSI ZAKIYA

Membres de jury :

Dr .L .Aissani M.C.A *Président*

Dr. S .Khemissi M.C.A *Examineur*

Soutenue le : 25 / 06 /2018



الله أكبر



Remerciements

*Je remercie ALLAH le tout-puissant de m'avoir donné le courage,
la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Je tiens à remercier Mme SAIDA MELLAL enseignante à
l'Université khenchela qui a accepté de m'encadrer, et
je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour
m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques.*

Je remercie sincèrement les membres de jury, d'avoir accepté

D'évaluer notre travail

*Je remercie tout les professeurs qui nous ont enseigné car si nous
étions là aujourd'hui c'est bien grâce à vous tous.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la contribution
de la réalisation de ce travail.*

DEDICACE

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Mon grand-père.

Mes sœurs.

Mes oncles, mes tantes et leurs familles.

Tous mes cousins et cousines.

Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

DEDICACE

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui. Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Mon grand-père.

Mes sœurs.

Mes oncles, mes tantes et leurs familles.

Tous mes cousins et cousines.

Tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'estiment.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
<i>Chapitre. I : l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque</i>	
I. rayonnement solaire	3
I.1.Introduction.....	3
I.2.énergie solaire	3
I.3.Rayonnement électromagnétique du soleil	3
II. Conversion photovoltaïque.....	6
II.1.L'effet photovoltaïque.....	6
II.2.Histoire du photovoltaïque.....	6
II.3.Principe de la conversion photovoltaïque.....	7
II.4. L'absorption de la lumière dans le matériau	8
II.5.Génération de porteur.....	9
II.6.La collecte des charges.....	10
II.7.La cellule photovoltaïques	11
III. Les technologies de cellules photovoltaïques.....	12
III.1.Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin.....	12
• Silicium monocristallin.....	12
• Silicium poly-cristallin.....	12
III.2.Les cellules photovoltaïques en couches minces.....	12
• Silicium amorphe.....	13
• Silicium nanocristallin.....	13
IV. Rendement de ces cellules.....	14
V. Module photovoltaïque.....	12
V.1.Nombre de cellule par module.....	15

V.2. Encapsulation et encadrement.....	15
VI. Avantages et inconvénient photovoltaïque.....	17
VI.1. Avantages du photovoltaïques.....	17
VI.2. Inconvénients du pv.....	17
VII. Domaine d'application de l'énergie photovoltaïque.....	18
• Domaine spatial.....	18
• Télécommunications.....	18
• Sites isolés.....	18
• Acquisition de données.....	18
• Domaine du transport.....	18
VIII. Conclusion.....	18

Chapitre. II : Modélisation d'un module photovoltaïque

I. Introduction	19
II. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	19
II.1. Cas idéal.....	19
II.2. Cas réel.....	21
II.3. Les zones de fonctionnement d'une cellule solaire.....	22
II.4. Les paramètre d'une cellule photovoltaïque.....	23
II.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc}).....	23
II.4.2. Tension de circuit ouvert (V_{co}).....	24
II.4.3. La Puissance maximale P_{max}	26
II.4.4. Facteur de forme, ff	26
II.4.5. Rendement de conversion des cellules photovoltaïque.....	26
II.5. Modélisation d'un module photovoltaïque.....	26
II.5.1. Détermination des paramètres photovoltaïque.....	28
II.5.1.1. Calcul du pho-courant I_{ph}	28

II.5.1.2. Calcul du courant de saturation I_s	28
II.5.1.3. Calcul de la résistance série R_s	29
II.5.1.4. Calcul du coefficient d'idéalité A	29
II.5.2. Résolution de l'équation $I(V)$	30
II.6. Influences de l'éclairement et de la température.....	31
II.7. Caractéristiques électrique d'un module photovoltaïque.....	32
II.7.1. Association des cellules photovoltaïques en série.....	32
II.7.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle.....	33
III. Conclusion.....	34

Chapitre. III : Simulation d'un module photovoltaïque

I. Introduction.....	35
II. Simulation numérique.....	35
II.1. Logiciel de simulation.....	35
➤ Description.....	35
➤ Les particularités de MATLAB.....	36
II.2 Simulation du Module Photovoltaïque « BP solaire 340 ».....	36
II. 3. Résultats et discussions.....	37
II.3.1. Organigramme de calcul.....	38
II. 3.2. Caractéristiques I-V et P-V du module BP solaire 340.....	39
II.3.3. Comportement d'un module photovoltaïque.....	40
a. Influence de l'éclairement	40
b. Influence de la température.....	42
c. Influence de résistance série	43
d. Influence du facteur d'idéalité.....	44
e. Rendement énergétique.....	45

III. conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Annexes	48
Bibliographie	50
Résumé	

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1)	Représentation graphique spectrale du rayonnement solaire	5
Figure (I.2)	Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde	8
Figure (I.3)	Représentations schématiques du gap direct (a) et du gap indirect (b)	9
Figure (I.4)	Principe de la conversion photovoltaïque	10
Figure (I.5)	Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire	11
Figure (I.6)	Les différents types des cellules	14
Figure (I.7)	module photovoltaïque de 36 cellules cristallin	15
Figure (I.8)	Encapsulation des cellules	16
Figure (II.1)	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéal	19
Figure (II.2)	La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque	20
Figure (II.3)	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle	21
Figure (II.4)	Les différentes zones de la caractéristique I (V)	22
Figure (II.5)	Caractéristique I-V et paramètre physique d'une cellule solaire	23
Figure (II.6)	Cellule photovoltaïque en court circuit	24
Figure (II.7)	Cellule photovoltaïque en circuit ouvert	24
Figure (II.8)	Différent régimes de V_{co} selon l'intensité d'éclairement	25
Figure (II.9)	Circuit équivalent d'une cellule ou module photovoltaïque	27
Figure (II.10)	Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	33
Figure (II.11)	Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellule en parallèle	34
Figure (III.1)	Organigramme des caractéristique I-V et P-V du module Photovoltaïque	38
Figure (III.2)	Caractéristique I(V) du module BP solaire 340	39
Figure (III.3)	Caractéristique P(V) du module BP solaire 340	39

Figure (III. 4)	Influence de de l'éclairement sur les caractéristiques I(V)	40
Figure (III.5)	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques P(V)	41
Figure (III.6)	Influence de la température sur les caractéristiques I(V)	42
Figure (III.7)	Influence de la température sur les caractéristiques P(V)	42
Figure (III.8)	Influence de la résistance R_S sur la caractéristique $I = f(V)$	43
Figure (III.9)	Influence de la résistance R_S sur la caractéristique $P = f(V)$	44
Figure (III.10)	Influence du facteur d'idéalité sur les caractéristiques I(V)	44
Figure (III.11)	Influence du facteur d'idéalité sur les caractéristiques P(V)	45
Figure (III.12)	variation du rendement du module avec l'éclairement	45
Figure. (III.13)	variation du rendement du module avec la température	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (I.1)	Valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire	5
Tableau (I.2)	Les différents types des cellules avec leur rendement	14
Tableau (II.1)	Caractéristiques du module BP solaire 340	27
Tableau (II.2)	Valeurs de $E_{g,ref}$ pour trois types de cellules au silicium	32
Tableau (III.1)	Caractéristiques électriques du module BP solaire 340	37

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition	Unité
h	Constante de Planck	$6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$
C	Vitesse de la lumière	$300\,000 \text{ Km s}^{-1}$
v	La fréquence	s^{-1}
E	Quantité l'énergie	Ev
I_{ph}	Photo courant	A
G	L'irradiation	W/m^2
I_{cc}	Courant de court circuit	A
λ	Longueur d'onde	μm
v_{co}	Tension de circuit ouvert	V
α	Coefficient d'absorption	Cm^{-1}
G_{inc}	L'intensité lumineuse incidente	W/m^2
d	l'épaisseur traversée	Cm
E_g	L'énergie de gap d'un matériau semi-conducteur.	Ev
N_p	Nombre de cellules connectées s en parallèle	
N_s	Nombre de cellules connectées en série	
I_d	Courant de diode	A
V_d	Tension de diode	V
I_s	Courant de saturation	A
V	La tension fournir par la cellule	V
I	Le courant fournir par la cellule	A
V_T	Tension thermique	V
K	Constant de Boltzmann	$1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
T	La température de la jonction PN	° K
T_{ref}	Température de référence	° K
T_a	la température ambiante	
q	La charge d'électron	$1.6\,0217646 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
R_s	Résistance série	Ω

R_p	Résistance parallèle (shunt)	Ω
ρ_g	La résistivité de la grille	$\Omega \text{ m}$
S_g	Section des grilles collectrices	m^2
l_g	La longueur de la grille	M
R_{sc}	Résistance propre du matériau	Ω
I_{Rp}	Courant de résistance shunt	A
R_0	Est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle	Ω
Ff	Facteur de forme	
η	Rendement de la cellule	%
P_{max}	Puissance maximal produit par une cellule solaire	W
V_{max}, V_m	Tension maximal	V
I_{max}, I_m	Courant maximal	A
P_{pv}	Puissance électrique délivrée par la cellule PV	W
S_{eff}	Surface effective de la cellule PV	m^2
ϵ	Epsilon	
G_{ref}	L'éclairement de référence	$1000 \text{ W} / \text{m}^2$
α_1	Le coefficient de courant en fonction de température	(A / °C)
α_2	Le coefficient de tension en fonction de température	(V / °C)
V_{pv}	La tension à la sortie du MPV	V
T_{fn}	Température de fonctionnement normale des cellules PV	° C
X_n	présente une itération	
X_{n+1}	présent l'itération suivante	
$V_{co,ref}$	la tension de circuit ouvert à $T= 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$	V
$V_{m,ref}$	La tension maximale à $T= 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000$	V
$I_{co,ref}$	Le courant de circuit ouvert à $T= 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$	A
$I_{m,ref}$	La tension maximale à $T= 25^\circ\text{C}$ et $G = 1000$	A

$I_{s,ref}$	$I_{s,ref}$: Le courant de saturation nominal (A)	A
$E_{g,ref}$	Energie de gap à la température T_{ref}	Ev
$V_{co,module}$	Tension de circuit ouvert du module PV	V
$V_{co,cellule}$	Tension de circuit ouvert de la cellule PV	V
$I_{cc,module}$	Courant de circuit ouvert du module PV	A
$I_{cc,cellule}$	Courant de circuit ouvert cellule e PV	A

+

LISTE DES ABREVIATION

AM : masse air

AM0 : Spectre solaire hors d'atmosphère

AM1.5 : Spectre solaire terrestre (globale)

PV : photovoltaïque

GaAs : Galium Arsenis

CdTe : Le tellurure de cadmium

CIS : Cuivre Indium Selenium

CIGS : Cuivre Indium / Galium Selenium

C-Si : Silicium cristallin.

a - Si :H : silicium amorphe hydrogéné

PVF : photovoltaïque film

STC : Standard Test Condition : ($G = 1000 \text{ W/ m}^2$, $T = 25 \text{ °C}$)

MPV : Module photovoltaïque



INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le photovoltaïque est l'une des voies qui s'est significativement développée au cours de ces dernières années, avec un taux de croissance de 40 %. Depuis l'obtention d'un rendement voisin de 5% avec des cellules photovoltaïques à base de silicium en 1950, des travaux très concluants ont été effectués afin d'améliorer le rendement de conversion et d'élargir le champ du photovoltaïque à l'échelle industrielle [1].

L'activité scientifique s'exerçait jadis suivant deux modes : théorie et expérimentation les dernières décennies ont vu la simulation numérique s'imposer comme une troisième approche dans la plupart des disciplines de la recherche et du développement, des plus fondamentales aux plus proches des finalités industrielles. Parallèlement, en partie grâce à la simulation, la science prédictive a progressé au dépend de l'empirisme. Ceci n'a nullement remis en cause l'expérimentation, car il n'y a pas de prédiction valide sans identification et modélisation des phénomènes par des expériences ou finesse de la mesure.

La triptyque modélisation-simulation-expérimentation s'est ainsi affirmé comme l'épine dorsale du processus soutenu par les progrès des ordinateurs et ceux de génie logiciels, qui ont permis d'utiliser au mieux leurs extraordinaires capacités.

La simulation numérique touche presque l'ensemble des domaines des énergies renouvelables, aujourd'hui la production d'énergie à partir de ces derniers est considérée dans plusieurs pays, comme étant un objectif stratégique pour les années à venir. Pour cette raison, il est obligatoire de perfectionner notre savoir faire et nos connaissances dans ce domaine.

De nos jours il existe beaucoup de discussions et d'études qui sont faites autour des systèmes photovoltaïques du fait que ces derniers peuvent générer de l'électricité sur place quand il est nécessaire de la faire , évitant ainsi les pertes liées aux transport et contribuant aussi la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les territoires urbains.

La connaissance des caractéristiques d'une cellule solaire est la base de la conception et du dimensionnement des systèmes d'alimentation photovoltaïque. C'est pour cela que la conception de modèles mathématiques pour les modules photovoltaïque eu, et a

toujours une importance cruciale car on peut prévoir le comportement d'un module sans recourir à l'expérience. Ainsi il est possible de développer les simulations basées sur ces modèles en introduisant les paramètres propres au module photovoltaïque choisi et en introduisant les différentes conditions de travail par exemple la température, l'irradiation [1].

Dans ce travail nous allons essayer de créer un programme capable de donner à l'utilisateur la possibilité de simuler le comportement des modules photovoltaïques et leur rendement sous diverses températures et irradiations.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre nous rappelons quelques notions fondamentales sur la source d'énergie solaire, le rayonnement solaire, définition de la cellule solaire ; sa structure ; la technologie utilisée. Dans un deuxième temps nous présentons le module photovoltaïque et on terminera avec les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre nous allons définir un modèle simple (Modèle à une diode) et applicable aux cellules photovoltaïques et établir les différentes équations analytiques nécessaires à la description du modèle et ses paramètres. On présente par la suite la méthode numérique conçue pour la résolution de l'équation de courant non linéaire on utilisant la méthode de NEWTON RAPHSON.

Dans le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique du comportement d'un module photovoltaïque à base de silicium polycristallin. Les résultats obtenus sont commentés vis-à-vis de leur influence sur le rendement énergétique.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale.



Chapitre I :

***Le rayonnement
solaire et la conversion
photovoltaïque***

CHAPITRE I : L'ÉNERGIE SOLAIRE ET LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

I. RAYONNEMENT SOLAIRE

I.1.Introduction

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

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro volta. [2]

I.2. Energie solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie.

La puissance reçue, hors atmosphère, est, en moyenne de 1350 W/m^2 (Plus précisément, 1366 W/m^2 avec des variations entre 1320 et 1410 W/m^2), et ce, pour une direction perpendiculaire au rayonnement. Elle est notée AM0 (Pour « air-mass 0 »).

Après la traversée de l'atmosphère, cette puissance diminue, et on définit de nouvelles références :

- AM1 (au niveau de l'équateur où le rayonnement a traversé l'épaisseur normalisée de l'atmosphère),
- AM1,5 et AM2 (où le rayonnement a traversé 1,5 ou 2 fois l'épaisseur de l'atmosphère)

La puissance AM1,5 standard (soit 1000 W/m^2) est la référence pour les calculs énergétiques au sol. [3]

I.3. Rayonnement électromagnétique du soleil

Afin de quantifier l'énergie développée par un module photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître la nature du rayonnement solaire reçu sur sol. [4]

Les théories actuelles présentent le rayonnement solaire comme une émission de particules. Ce flux de particules, appelées photons, atteint la terre avec différentes longueurs d'ondes à la quelle correspond une énergie spécifique décrite par la relation :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

h : la constante de Planck

C : la vitesse de la lumière dans le vide ($300\,000\text{ Km s}^{-1}$)

ν : la fréquence (s^{-1})

λ : la longueur d'onde (m).

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est:

$$E \text{ (eV)} = \frac{1,24}{\lambda \text{ (}\mu\text{m)}} \quad (\text{I.2})$$

Cette quantité d'énergie quitte la surface du soleil sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de $0,22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$, l'énergie associé à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 7 % dans la bande des ultraviolets ($\lambda < 0,4\mu\text{m}$).
- 46 % dans la bande visibles ($0,4\mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,8\mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande des infrarouges ($\lambda > 0,8\mu\text{m}$). [5]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclaircissement (noté généralement par la lettre « G »), elle est exprimée en watts par mètre carré (W/m^2). [6]

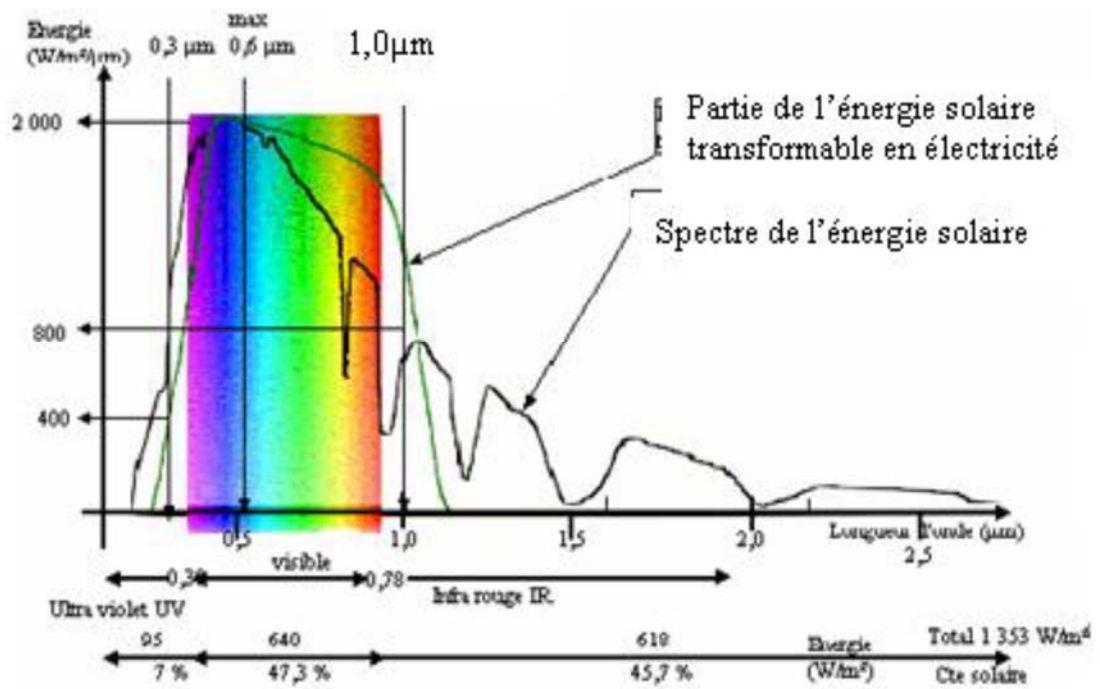


Figure (I.1) : Représentation graphique spectrale du rayonnement solaire. [7]

$\lambda(\mu m)$	E(ph)	Zone
0,2	6,2	Ultra-violet
0,4	3,1	Visible bleu
0,5	2,48	Visible Jaune –vert
0,78	1,59	Visible rouge
1	1,24	Infrarouge
2	0,62	Infrarouge
4	0,31	Infrarouge

Tableau (I.1): Valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire. [8]

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de cellule photovoltaïque, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.[8]

II .CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

II.1. L'effet photovoltaïque

Il s'agit de la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable. [4]

II.2.Histoire du photovoltaïque

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvrit que l'énergie des quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante.

En 1954 est créée, par les laboratoires BELL, la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque. [9]

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années soixante, puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés.

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. Selon l'institut allemand Fraunhofer, la capacité totale installée dans le monde a atteint 242 GW à la fin de 2015, qui a été une année record. Elle était de 134 GW en 2013 et de 178 GW en 2014.

Concernant l'Algérie, le groupe algérien Condor Electronique, s'est lancé en juillet 2013 dans la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 par panneau W et à des prix compétitifs.

Dans la dizaine d'années qui viendront, il est prévu la réalisation d'un parc d'énergies renouvelables de 5539 MW.L'objectif à 2030 est de 12000 MW en énergies renouvelable pour la consommation interne d'électricité. [10]

II.3.Principe de la conversion photovoltaïque

Le rayonnement lumineux composé de plusieurs couleurs (photons d'énergies différentes) aura donc une plage de longueurs d'onde. Par conséquent, une partie du spectre lumineux sera transmise, une partie réfléchi et une autre partie absorbée lorsque la lumière rencontrera le matériau [11]

- La partie réfléchi dépend de l'indice de réfraction (n) des matériaux traversés. Cet indice dépend lui-même de la longueur d'onde du rayonnement mais aussi des caractéristiques du matériau.

Le silicium a, par exemple, un coefficient de réflexion compris entre 0.25 et 0.36. Plusieurs couches, d'indices intermédiaires, sont placées entre l'air et le silicium pour diminuer la partie réfléchi du rayonnement incident.

- La partie absorbée est celle qui permettra la transformation de l'énergie lumineuse en électricité.

La lumière est absorbée par le matériau suivant la loi de Beer-Lambert [11]

$$G = G_{inc} \cdot \exp(-\alpha d) \quad (I.3)$$

G_{inc} : Intensité lumineuse incidente (Wm^{-2})

α : Coefficient d'absorption (cm^{-1})

d : Epaisseur traversée (cm)

Le coefficient d'absorption dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente.

- La partite transmise correspond aux photons qui traversent le matériau sans interaction, leur énergie étant trop faible, le matériau est transparent pour ces photons.

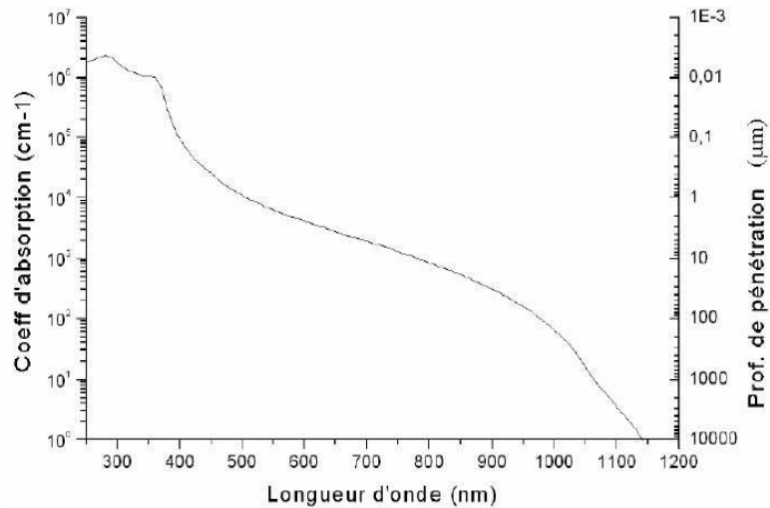


Figure (I.2) : Coefficient d'absorption en fonction de la longueur d'onde. [12]

Nous nous intéresserons tout particulièrement au phénomène d'absorption car c'est grâce à lui qu'une partie du flux lumineux sera restituée sous forme d'électricité.

II.4. L'absorption de la lumière dans le matériau

Pour l'absorption de la lumière, une caractéristique importante du matériau est son gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau.

La bande de valence est présumée être entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide.

Il existe deux types de gap : le gap direct et le gap indirect. [13]

- Le gap direct : Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde (k), le gap est direct, figure (I.4-a).

Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Le GaAs, le CdTe sont des exemples de matériaux à gap direct.

- Le gap indirect : on remarque cette fois-ci sur la figure (I.4-b) que la transition entre les extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique : les transitions électroniques sont non radiatives.

A énergie égale ou un peu supérieur à celle du gap, il n'est possible d'absorber le photon que grâce à l'intervention d'un phonon. Ce qui ajoute une nouvelle condition à

L'absorption et diminue ainsi grandement ses probabilités. Le silicium cristallin est un exemple de semi-conducteur à gap indirect.

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé.

L'interaction photon/semi-conducteur, dans le cas d'un photon suffisamment énergétique ($h\nu \geq E_g$) se traduit par la génération d'une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau. [13]

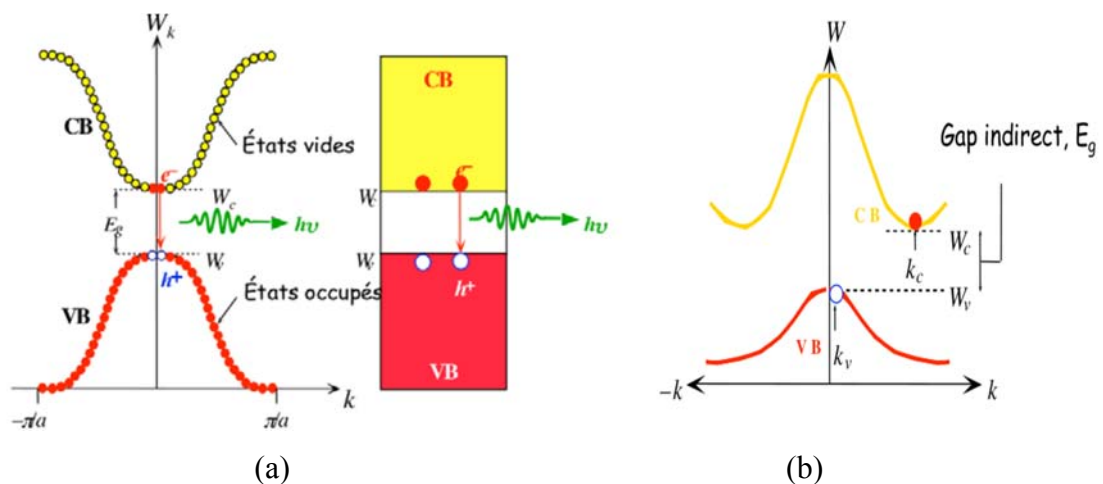


Figure (I.3) : Représentations schématiques du gap direct (a) et du gap indirect (b). [13]

II.5. Génération de porteurs

Les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Ces électrons seront alors, si l'énergie apportée par le photon le permet, autrement dit si l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap du matériau, libérés de l'attraction de l'atome. Il y aura, par conséquent, création d'un électron libre et d'un trou.

De plus, l'énergie du photon supplémentaire à celle du gap, sera convertie en chaleur. On a donc création d'une paire d'électron-trou par photon au maximum.

Il y a donc deux phénomènes qui limitent le rendement théorique :

- l'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap optique.
- la perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique. [13]

II.6. La collecte des charges

Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner.

Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes pentavalents (dopage type N), et l'autre partie sera dopée en atomes trivalents (dopage type P).

La mise en contact de ces deux zones provoquera un champ électrique interne, on réalise ainsi ce que l'on appelle une jonction **p-n**, c'est-à-dire une barrière de potentiel dans le semi-conducteurs.

Dans la zone **n** ou **p**, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone **p** (pour les trous) ou dans la zone **n** (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Il y aura un photo-courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique.

Les électrons vont aller dans la région **n** et les trous vers la région **p**. Il y aura un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour former un photo-courant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse. [14]

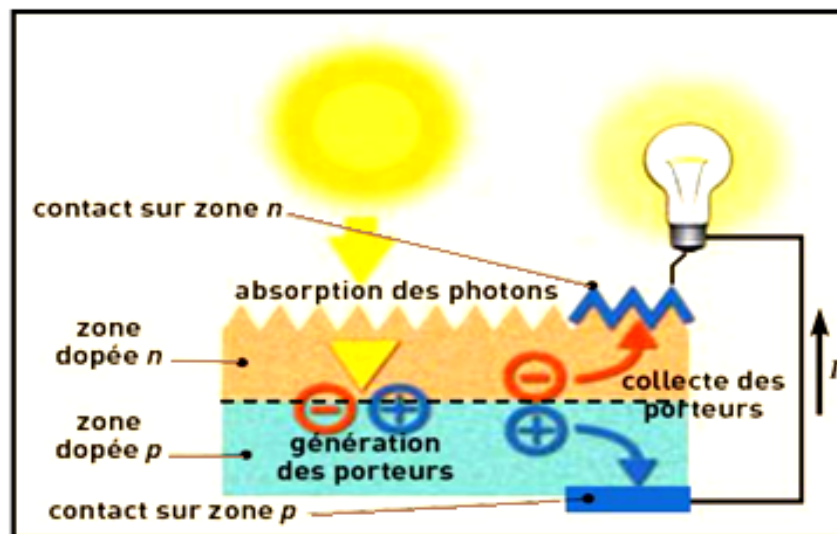


Figure (I.4) : Principe de la conversion photovoltaïque. [15]

II.7. 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. Sa structure est illustrée dans la figure (I.6) ci-dessous.

Elle montre un schéma simplifié d'une cellule photovoltaïque typique car l'architecture des dispositifs photovoltaïques modernes se révèle particulièrement complexe. La cellule photovoltaïque sera donc une plaquette du matériau semi-conducteur; où la jonction P-N représente le cœur de la cellule photovoltaïque; elle représente le vrai générateur dans le dispositif.

Les contacts métalliques en face avant et en face arrière, constituent la structure de cheminement permettant de récupérer les porteurs photogénérés, pour cela, deux électrodes sont élaborées sur la plaquette du semi-conducteur, l'une qui recouvre la totalité de la face arrière pour assurer le contact avec la zone p, et l'autre en forme de grille sur la face avant, la géométrie de cette grille étant un compromis entre une faible occultation du rayonnement et un bon contact électrique avec la zone n. [4]

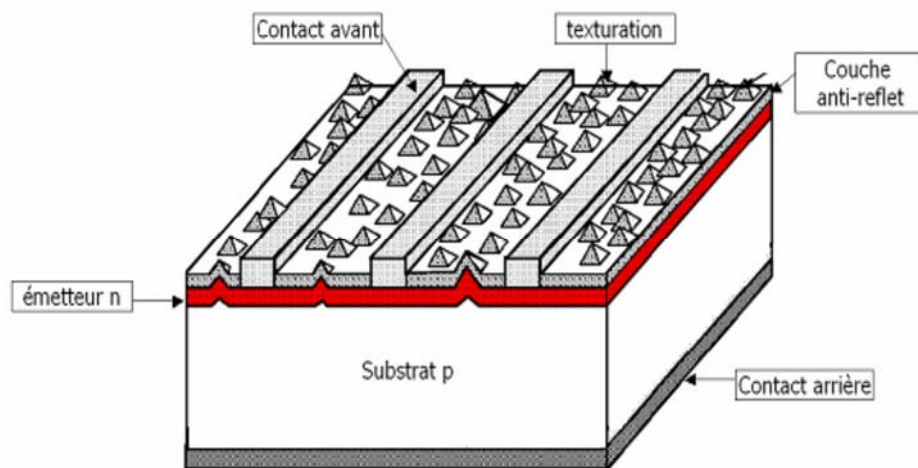


Figure (I.5) : Schéma simplifié illustratif d'une cellule solaire. [16]

Les cellules solaires sont recouvertes d'une couche antireflet qui protège la cellule et réduit les pertes par réflexion. C'est une couche qui donne aux cellules solaires leur aspect bleu foncé.

III. LES TECHNOLOGIES DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Il existe plusieurs technologies de cellules qui ont toutes des propriétés différentes. Nous parlerons, uniquement des filières utilisées pour la fabrication des modules commerciaux, pour applications terrestres, étudiés dans notre cas. Ce qui exclut la description des cellules de 3ème génération.

Les cellules, sont formées de silicium cristallin, de silicium amorphe, de CIS et de CdTe. Ce sont des cellules / modules que l'on retrouve aisément dans le commerce. On peut distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques :

- Les matériaux solides cristallisés
- Les couches minces solides. [17]

III.1. Les cellules photovoltaïques au silicium cristallin

Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dite de première génération (80% des panneaux sur le marché).

- **Silicium monocristallin**

C'est un semi-conducteur dont les atomes sont ordonnés selon un réseau périodique dans les trois directions. La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir.

Le rendement de conversion de ce matériau atteint 17% [18]

- **Silicium poly-cristallin**

Contrairement au monocristallin, le poly- cristallin ou cristallin se trouve à l'état massif a une structure ordonnée mais il est formé de plusieurs monocristaux (grains) dont les réseaux sont désorientés les uns par rapport aux autres.

Ce matériau, moins homogène que le silicium monocristallin, a de ce fait un rendement énergétique légèrement moins bon (< 14%) dans le commerce, mais sa fabrication est très facile. [17].

III.2. Les cellules photovoltaïques en couches minces

Les couches minces consistent en un dépôt de matériaux semi-conducteurs sur un substrat rigide ou souple. Il existe plusieurs technologies de couches minces commercialisées dont trois voies qui semblent s'imposer, même si cela ne représente

Actuellement pas plus de 20% du marché PV : le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et les combinaisons à partir du diséléniure de cuivre et d'indium (CIS ou CIGS lorsque du gallium est ajouté).

- **Silicium amorphe**

On trouve également le silicium dans une forme amorphe (non cristalline), c'est à dire avec une structure atomique désordonnée. Sous cette forme, il possède un coefficient d'absorption de la lumière environ mille fois supérieur au silicium cristallin. Une couche de **0,3mm** est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible. [19]

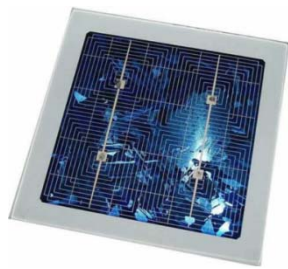
Avec ce type de matériau peu coûteux par rapport aux autres formes de silicium, on a de faibles rendements (**5 à 6%**) et des problèmes de stabilité apparaissent rapidement quand on l'expose au soleil et aux intempéries (quelques centaines d'heures). [18]

Cependant des améliorations ont été effectuées à partir de travaux en laboratoire. Maintenant, les défauts électroniques de ce matériau désordonné peuvent être passivés avec de l'hydrogène pour former le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) avec de meilleures propriétés électriques. L'une des découvertes les plus importantes dans ce domaine était la capacité de doper a-Si: H soit de type **n** ou de type **p** par cette capacité à doper l'a-Si a permis la fabrication de composants électroniques et a lancé un grand développement de la matière pour la fabrication de transistors à couches minces, des cellules solaires, etc....[20]

- **Silicium nanocristallin**

Appelé également silicium microcristallin, est un matériau entre le C-Si ordonnée et l'a-Si:H désordonnée. Il contient des cristallites de taille nanométrique (de **10-75nm**).

Ces matériaux étaient de mauvaise qualité en raison de dopage involontaire due à l'incorporation d'oxygène pendant la croissance du film, ainsi que le processus de dépôt est lent.



Cellule polycristalline



Cellule monocristalline



Cellule de silicium amorphe

Figure (I.6) : Les différents types des cellules. [21]

IV. RENDEMENT DE CES CELLULES

Le rendement de ces cellules dépend de plusieurs facteurs :

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%	13 à 17%
Silicium poly cristallin (p-Si)	19,8%	11 à 15 %
Silicium amorphe (a-Si)	13%	5 à 9%

Tableau (I.2): Les différents types des cellules avec leur rendement. [22]

V. MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN).

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la

lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque.

La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules connectées en série. [23]

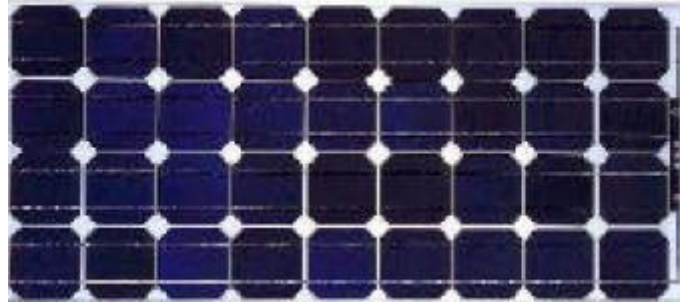


Figure (I.7) : Module photovoltaïque de 36 cellules cristallin. [24]

V.1. Nombre de cellule par module :

Une cellule au silicium cristallin présente une tension de circuit ouvert de 0.58 V à 0.60 V et un point de puissance maximale situé à 0.46-0.47 V. considérant que le module doit pouvoir charge une batterie 12V jusqu' à sa tension maximale d'environ 14V et que l'on va perdre 2 à 3 V en câblage et du fait des élévations de température il faudra disposer d'un module fournissant au minimum 16-17 V à sa puissance maximale. Si l'on divise 16.5 par 0.46, on trouve le nombre arrondi de 36, valeur extrêmement courante comme nombre de cellules en séries des modules usuels du marché.

De plus, cela permet de disposer les cellules solaires d'un module en 4 rangés de 9 cellules. En pratique, les modules les plus courants en 12 V comportent 32 à 34 cellules, cela dépend de la valeur exacte de la tension de chaque cellule et de la température d'utilisation. [17]

V.2. Encapsulation et encadrement

Le but principal de l'encapsulation d'un ensemble de cellules solaires raccordées électriquement est de protéger leurs fils de l'interconnexion de l'environnement hostile dans lequel elles sont utilisées. Par exemple, les cellules solaires sont relativement minces et sujettes à des dommages mécaniques. En plus, la grille métallique sur la face supérieure de la cellule solaire et les fils de l'interconnexion des cellules solaires

peuvent être corrodés par l'eau ou la vapeur d'eau. Les deux principales fonctions de l'encapsulation est de prévenir les dommages mécanique des cellules solaires et d'empêcher l'eau ou la vapeur d'eau de la corrosion des contacts électriques.

- En face avant : il faut placer un revêtement transparent et résistant. Un verre trempé haute transmission est un bon choix. Il s'agit de verre de moindre concentration en oxyde de fer que le verre à vitre et donc plus transparent. L'épaisseur de ce verre est généralement de 3 ou 4mm selon la dimension du module.
- En face arrière : on a longtemps mis également du verre, selon la technique de bi-verre feuilleté inspirée de la fabrication des pare-brise automobiles.

Mais il est plus économiques et parfois aussi efficace d'utiliser un film plastique de type PVF (connu sous marque Tedlar), ou un autre film faisant barrière à l'humidité comme un multicouche plastique/métal. [25]

La résine d'enrobage, quant à elle, est fréquemment de l'EVA (Ethyle-Vinyl-Acétate).

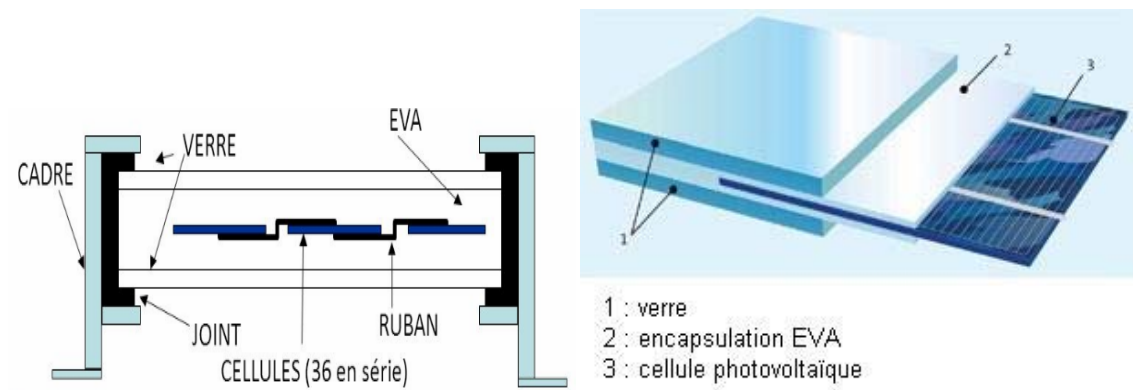


Figure (I.8) : Encapsulation des cellules. [25]

Le module photovoltaïque est alors opérationnel. et surtout, il est prêt à endurer tous les climats. On lui ajoute souvent un cadre de fixation et une sortie électrique adéquate cette dernière phase est importante car le passage des connexions électriques vers le mode extérieur ne doit pas constituer un point d'infiltration d'eau ou de vapeur d'eau. Sur le cadre on fixe le plus souvent une boîte de raccordement, dite boîte de jonction, pour connecter le panneau avec des conducteurs compatibles avec son ampérage de sortie. [4]

VI. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU PHOTOVOLTAÏQUE :

La conversion photovoltaïque est maintenant une technologie qui a fait ses preuves et qui s'annonce très prometteuse pour les affaires. Cette conversion est en mesure d'apporter un changement réel dans les communautés rurales ne bénéficiant pas de l'électricité et de créer une base commerciale pour les entrepreneurs dans des domaines à différentes échelles.

VI.1. Avantages du photovoltaïque

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants:

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. [26]

VI.2. Inconvénients du PV

Les systèmes PV Vous devriez être également conscient des limites pratiques des:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. [26]

VII. DOMAINES D'APPLICATION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

- **Domaine spatial**

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

- **Télécommunications**

Téléphonie rurale, radiotéléphonie,...

- **Sites isolés**

Parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, pays en voie de développement. Pompage de l'eau, irrigation, domiciles, villages ...

- **Acquisition de données**

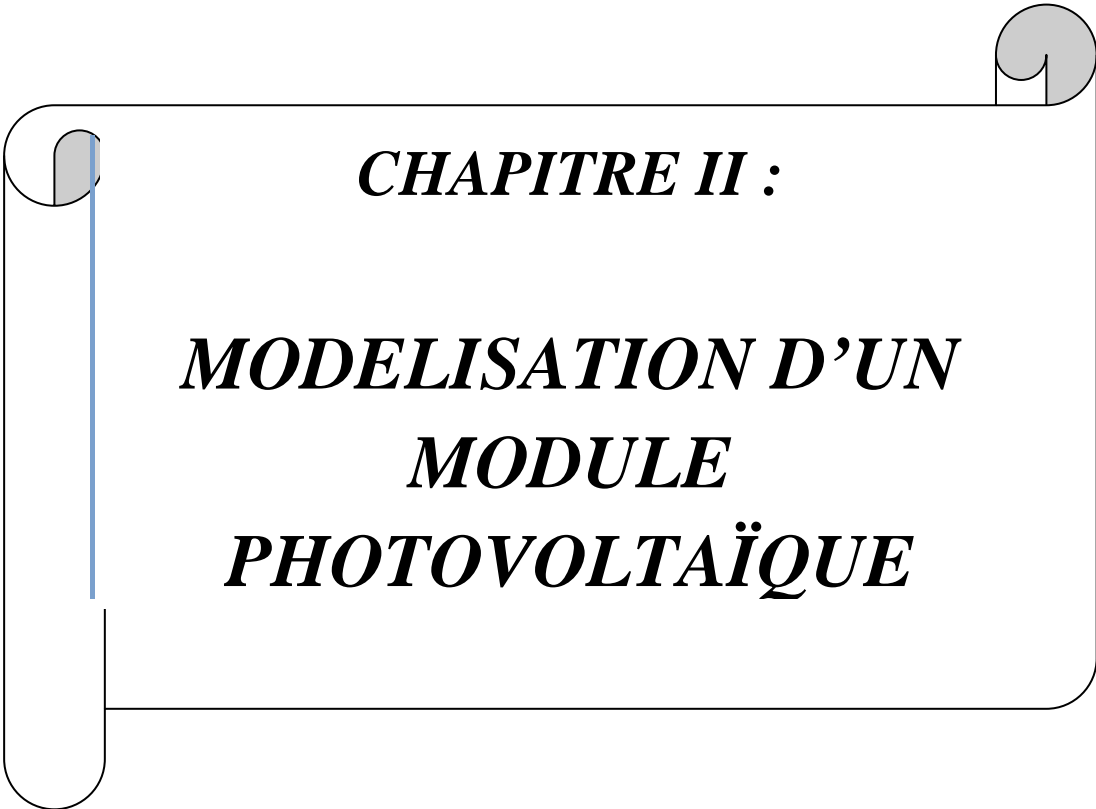
L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longévité des équipements (25 ans).

- **Domaine du transport**

Lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire. [27]

VIII. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et son application dans le domaine photovoltaïque. Suivi par une présentation de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. On a étudié aussi le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque. En dernier on a exposé de manière bref les différentes technologies de cellules photovoltaïques, les avantages, inconvénients et différentes applications du photovoltaïques.



CHAPITRE II :

MODELISATION D'UN

MODULE

PHOTOVOLTAÏQUE

CHAPITRE II : MODELISATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

I. INTRODUCTION

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un modèle puis d'évaluer la caractéristique de l'élément considéré ainsi que les paramètres constitutants. Pour un module photovoltaïque, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale P_{\max} . La simulation basée sur ce modèle permet de comprendre le comportement opérationnel du module PV et l'influence de la variation de l'éclairement et la température sur son rendement.

II. MODELISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La modélisation de la cellule photovoltaïque correspond à la présentée par sa caractéristique I-V.

II.1. Cas idéal

Dans le cas idéal, la cellule à base d'une jonction **PN** soumise à l'éclairement photovoltaïque peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale. [28]

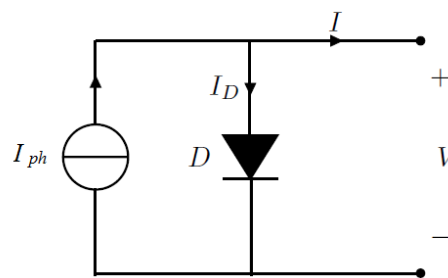


Figure (II.1). Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéal. [28]

L'équation caractéristique d'une cellule photovoltaïque idéale est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{V}{AV_T} - 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

$$V = A V_T \ln \left(1 + \frac{I_{ph} - I}{I_s} \right) \quad (\text{II.2})$$

I, V : Le courant et la tension fournis par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant généré

I_d : Le courant de diode donnée par:

II.2. Cas réel

La performance d'une cellule photovoltaïque est limitée par l'influence de deux phénomènes physiques assimilables à deux résistances (R_s et R_p) : [30]

Résistance série, R_s , modélise les pertes par effet joule, qui sont dues à une série de résistances causée par la résistivité du matériau semi-conducteur, par les résistances de contact des électrodes et par la résistance de la grille collectrice, la valeur habituelle de cette résistance est très petite de quelque dixième d'ohms, reflète directement la qualité de fabrication des cellules PV. Elle s'exprime par :

$$R_s = \rho_g \frac{l_g}{s_g} + R_{sc} \quad (\text{II.6})$$

Avec

ρ_g : La résistivité de la grille.

l_g : La longueur de la grille.

s_g : Section des grilles collectrices.

R_{sc} : Résistance propre du matériau, sa valeur est faible ($< 2\Omega$ pour les cellules au silicium).

Résistance parallèle, R_p : dite « Shunt », provient des pertes par recombinaisons dues essentiellement à l'épaisseur, aux effets de surface, ainsi qu'à la non idéalité de la jonction.

Dans le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle on associe au circuit idéal une résistance série (R_s) et une résistance shunte (R_p), Figure (II.3).

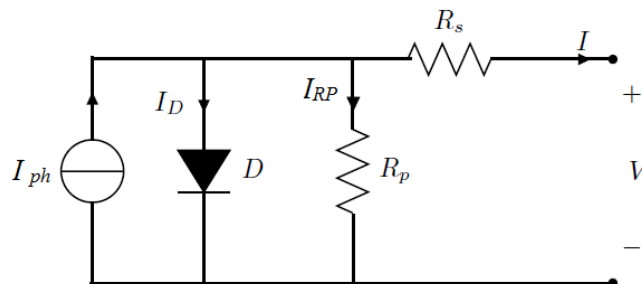


Figure (II.3). Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque réelle. [30]

Le comportement de cette cellule est décrit alors par l'équation électrique suivante:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (II.7)$$

Avec :

$$I_{Rp} = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (II.8)$$

Et :

I_d : représente le courant de polarisation de la diode, il est donné par :

$$I_d = I_s \left(\exp \frac{V + R_s \cdot I}{A \cdot V_T} - 1 \right) \quad (II.9)$$

Il en résulte que :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{V + R_s \cdot I}{A \cdot V_T} - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (II.10)$$

II.3. Les zones de fonctionnement d'une cellule solaire

La caractéristique $I(V)$ se divise en trois parties :

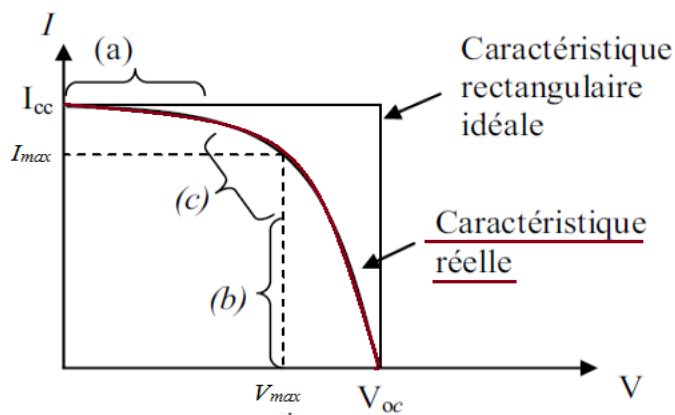


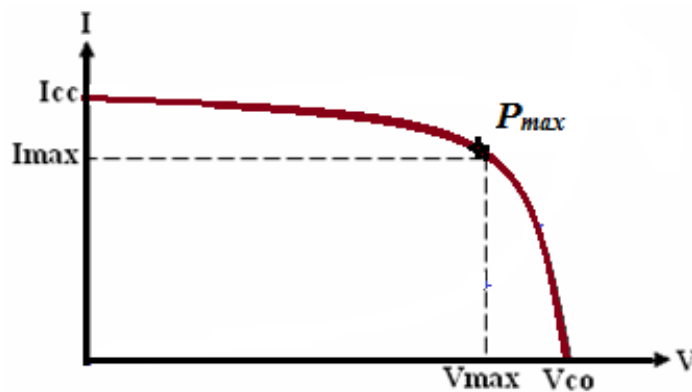
Figure (II.4). Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$. [31]

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement.
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} .
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement. [31]

II.4. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule photovoltaïque. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique $I(V)$.

La figure (II.5) représente une caractéristique courant-tension $I(V)$ 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 de la cellule. 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 point de fonctionnement optimal (P_{max}) (la puissance maximale de la cellule). Ces paramètres permettent de déterminer le facteur de forme (ff) et le rendement de conversion d'énergie (η) des cellules solaires. [32]



Figure(II.5). Caractéristique courant-tension et paramètre physique d'une cellule solaire. [32]

II.4.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

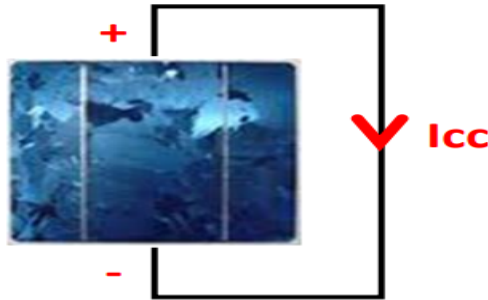
Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue. [32]

Il obtenu pour une tension de sortie nulle :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp \frac{R_s \cdot I_{cc}}{V_T} - 1 \right] - \frac{R_s \cdot I_{cc}}{R_p} \quad (\text{II.11})$$

Dans le cas d'une cellule idéal : ($R_s \rightarrow 0, R_p \rightarrow \infty$).

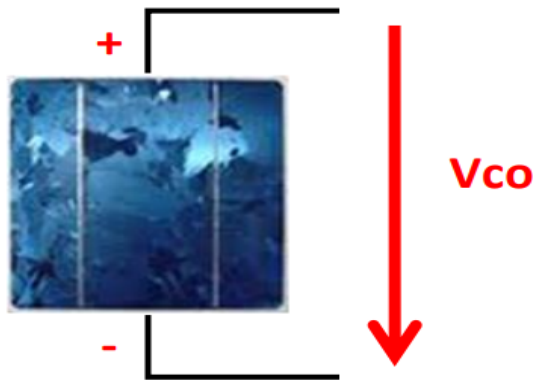
Tenant compte de l'effet des résistances R_s et R_p ; le courant de court circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.



Figure(II.6). Cellule photovoltaïque en court circuit

II.4.2. 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 infini. 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 décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [33]



Figure(II.7). Cellule photovoltaïque en circuit ouvert

$$V_{co}(I = 0) = A V_T \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (II.12)$$

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement :

- Régimes des faibles flux lumineux : dans ce cas, $I_{ph} \ll I_s$, ce qui permet d'écrire :

$$\ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \cong \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (II.13)$$

D'où :

$$V_{co} = A V_T \frac{I_{ph}}{I_s} \quad (\text{II. 14})$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule, la formule précédente peut s'écrire aussi $V_{co} = R_0 \cdot I_{ph}$, avec $R_0 = \frac{A \cdot V_T}{I_s}$

R_0 : Est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

- Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que $I_{ph} \gg I_s$

Soit : $\frac{I_{ph}}{I_s} \gg 1$

$$\text{D'où : } V_{co} = A V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (\text{II.15})$$

C'est le domaine du comportement logarithmique.

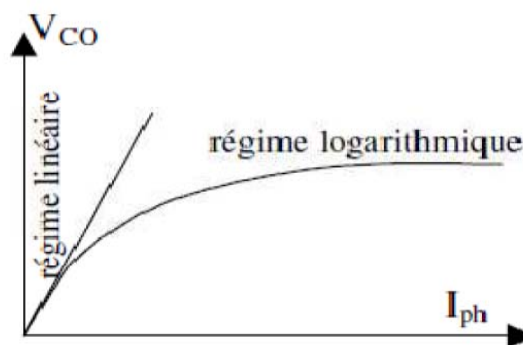


Figure (II.8). Différent régimes de V_{co} selon l'intensité d'éclairement. [33]

Il est important de remarquer que cette tension augmente peu avec le **log** de I_{ph} donc avec le log de l'illumination. En revanche, elle décroît avec la température, malgré le terme $V_T = \frac{kT}{q}$.

En effet, le courant de saturation, I_s dépend de la surface de la diode (donc de la cellule) et des caractéristiques de la jonction : il varie exponentiellement avec la température et cette dépendance en température compense largement le terme $\frac{kT}{q}$. Donc la tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la température, ce qui est important dans le dimensionnement des systèmes PV. [34]

II.4.3. La Puissance maximale P_{\max}

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{\max} , correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{\max} multipliée par le courant de court-circuit I_{\max} .

$$P_{\max} = V_{\max} * I_{\max} \quad (\text{II.16})$$

La puissance maximale P_{\max} représente 80% environ du produit $(V_{\text{co}} \cdot I_{\text{cc}})$. [31]

II.4.4. Facteur de forme, ff

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule PV : c'est le facteur de remplissage ou fill facteur (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 $I_{\text{cc}} * V_{\text{co}}$, plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. [35] Il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_{\max}}{V_{\text{co}} \cdot I_{\text{cc}}} = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{V_{\text{CO}} \cdot I_{\text{cc}}} \quad (\text{II.17})$$

II.4.5. Rendement de conversion des cellules photovoltaïque

Le rendement correspond au rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par les cellules PV et la quantité d'énergie solaire reçue. Le rendement caractérisant le taux de conversion photons-électrons d'une cellule photovoltaïque, il est alors défini selon l'équation suivante : [36]

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{incidante}}} = \frac{V_{\max} \cdot I_{\max}}{G \cdot S_{\text{eff}}} \quad (\text{II.18})$$

Où :

P_{\max} = Puissance maximale délivrée par la cellule PV (W)

S_{eff} = Surface effective de la cellule PV (m^2)

G = Irradiation, autrement nommée puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2).

II.5. Modélisation d'un module photovoltaïque :

Le profil de la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque est le même que celui d'une cellule photovoltaïque. Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'un module photovoltaïque. Ces modèles se

différencient par la méthode de calcul et le nombre de paramètres intervenants dans la caractéristique courant - tension.

Dans notre cas, nous avons choisi un modèle simple à quatre paramètres ne nécessitant que les caractéristiques électriques données par le fabricant.

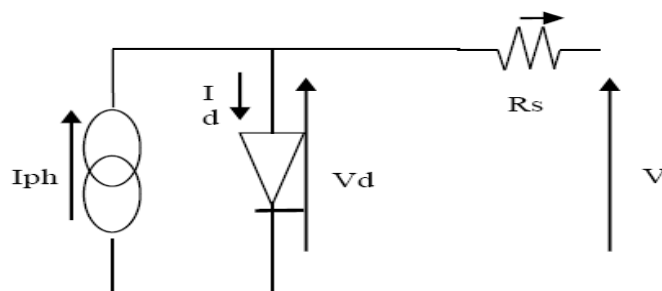
Exemple de module photovoltaïque

Le Tableaux (II.2) donne les caractéristiques données par le fabricant du **module BP solaire 340** sous les conditions standards (1000 W m^{-2} , masse optique : AM 1.5, température de cellule : $25 \text{ }^\circ\text{C}$). [37]

Caractéristiques électriques	symbole	BP solaire 340
Éclairement de référence	E_{ref}	1000W/m2
Température de référence	T_{ref}	25°C
Puissance maximale	P_{max}	40 watt
La tension au point P_{max}	V_{m}	17.3 V
Le courant au point P_{max}	I_{m}	2.3 A
La tension du circuit ouvert	V_{co}	21.8 V
Le courant de court circuit	I_{cc}	2.5 A
Coefficient de la température de I_{cc}	α_1	$(0.065 \pm 0.015) \% / ^\circ\text{C}$
Coefficient de la température de V_{co}	α_2	$-(80 \pm 10) \text{ mV} / ^\circ\text{C}$
Nombre des cellules par module (36(4x9 cellules en série)	N_s	9
	N_p	4
Température de fonctionnement normale des cellules PV (800 W/m2, 20°C , AM 1,5).	T_{fin}	$47 \pm 2 (^\circ\text{C})$

Tableaux (II.1). Caractéristiques du module BP solaire 340. [37]

Pour ce modèle la résistance shunt est négligée, puisqu'elle est très grande par rapport à la résistance série, en particulier pour les cellules monocristalline de silicium, selon le schéma de la figure (II.9). [38]



Figure(II.9).Circuit équivalent d'une cellule ou module photovoltaïque. [38]

Le modèle à quatre paramètres comme indique son nom fait intervenir quatre paramètres qui ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données des constructeurs des panneaux photovoltaïques. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I-V :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \frac{V + R_s I}{A \cdot V_T} - 1 \right) \quad (\text{II.19})$$

Le traçage de la courbe I (V) du module PV nécessite l'évaluation des paramètres inconnus (I_{ph} , I_s , A , R_s) du modèle .

Ces paramètres sont à déterminer à partir des données du constructeur (V_{co} tension de circuit ouvert, I_{cc} courant de court-circuit, I_m , V_m tension et courant au point de la puissance maximale).

II.5.1. Détermination des paramètres du circuit équivalent

En se basant sur les références [39, 40 ,41], on détermine les différents paramètres nécessaires pour tracer la courbe I (V) et P (V).

II.5.1.1 .Calcul du photocourant I_{ph} :

Le photo-courant I_{ph} généré par le module photovoltaïque correspond au courant de court circuit I_{cc} :

$$I_{ph} = I_{cc} \quad (\text{II.20})$$

On obtient l'expression de la caractéristique I (V) du modèle choisi:

$$I = I_{cc} - I_s \left(\exp \frac{V + R_s I}{A V_T} - 1 \right) \quad (\text{II.21})$$

II.5.1.2 .Calcul du courant de saturation I_s

Le courant de saturation peut être assez bien estimé à l'aide de la formule (II.21). En effet, lorsque le module est en circuit ouvert, le courant s'annule.. On peut donc écrire, après simplification :

$$I_{cc} = I_s \exp \left(\frac{V_{co}}{A \cdot V_T} \right) \quad (\text{II.22})$$

On en déduit l'expression du courant de saturation :

$$I_s = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{V_{co}}{A \cdot V_T}\right)} \quad (\text{II.23})$$

II.5.1.3 .Calcul de la résistance série R_s :

La résistance série (R_s) du module PV à un grand impact sur la pente de la courbe I-V, pour son évaluation, l'équation (II.21) est établie au point (V_m, I_m) :

$$I_m = I_{cc} - I_s \exp\left(\frac{V_m - I_m R_s}{A V_T}\right) \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant le courant de saturation l'équation (II.22) dans l'équation (II.24), on obtient :

$$I_m = I_{cc} \left[1 - \exp\left(\frac{V_m - V_{co} + I_m R_s}{A V_T}\right) \right] \quad (\text{II.25})$$

Ce qui nous permis de tirer explicitement la résistance série :

$$R_s = \frac{A V_T \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) + V_{co} - V_m}{I_m} \quad (\text{II.26})$$

II.5.1.4 .Calcul du coefficient d'idéalité A :

En exploitant le fait que la dérivée de la puissance par rapport à V est égale à zéro au point (V_m, I_m) :

$$\frac{dP}{dV} |_{(V_m, I_m)} = 0 = V \frac{\partial I}{\partial V} + I \frac{\partial V}{\partial V} \quad (\text{II.27})$$

A partir de l'équation (II.21), le premier terme de l'équation (II.27) est :

$$\frac{\partial I}{\partial V} = -I_s \exp\left(\frac{V + I R_s}{A V_T}\right) \frac{1 + \frac{\partial I}{\partial V} R_s}{A V_T} \quad (\text{II.28})$$

Ce qui donne :

$$\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{\frac{-I_s}{A V_T} \exp\left(\frac{V + I R_s}{A V_T}\right)}{1 + \frac{R_s I_s}{A V_T} \exp\left(\frac{V + I R_s}{A V_T}\right)} \quad (\text{II.29})$$

En remplaçant l'équation (II.29) dans (II.27) au point (V_m, I_m), on obtient :

$$0 = I_{cc} + I_s - I_s \exp\left(\frac{V_m + I_m R_s}{A V_T}\right) \left[1 + \frac{\frac{V_m}{A V_T}}{1 + \frac{R_s I_s}{A V_T} \exp\left(\frac{V_m + I_m R_m}{A V_T}\right)} \right] \quad (\text{II.30})$$

En remplaçant les équations (II.23) et (II.26) dans l'équation (II.30), nous donne la relation du facteur d'idéalité :

$$\mathbf{A} = \frac{(2 V_m - V_{co})}{V_T \left[\frac{I_m}{I_{cc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \quad (\text{II.31})$$

II.5.2. Résolution de l'équation I(V)

La substitution des différents paramètres (I_{ph} , I_s , A , R_s), du circuit équivalent, par leurs formules respectives dans l'équation (II.21), résulte en une équation non-linéaire, reliant le courant I et la tension V du module photovoltaïque. La méthode de Newton Raphson est utilisée pour la résolution de cette équation, où le courant pour une tension donnée est calculé itérativement par :

$$\mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n - \frac{f(\mathbf{X}_n)}{\hat{f}(\mathbf{X}_n)} \quad (\text{II.32})$$

Tel que X_n présente une itération, X_{n+1} présent l'itération suivante et $\hat{f}(X_n)$ est la dérivée de la fonction $f(X_n) = 0$

La réécriture de l'équation (II.19) donne la fonction suivante :

$$f(I) = I - I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{A V_T} \right) - 1 \right) = 0 \quad (\text{II.33})$$

Alors le courant I se calcule par :

$$\mathbf{I}_{n+1} = \mathbf{I}_n - \frac{I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{A V_T} \right) - 1 \right) - I_n}{-1 - I_s \left(\exp \left(\frac{(V + R_s I)}{A V_T} \right) - 1 \right) \times \frac{R_s}{A V_T}} \quad (\text{II.34})$$

La valeur du courant I_n considérée pour une valeur de la tension V , devra vérifier la condition de convergence [42]

$$|I_{n+1} - I_n| < \varepsilon \quad (\text{II.35})$$

II.6. Influences de l'éclairement et de la température

Les différentes grandeurs caractéristiques du module, V_{co} , I_{cc} , V_m , I_m sont calculées aux conditions de références (STC); il est possible d'estimer ces variables à une autre valeur d'éclairement et de température par les équations suivantes : [43, 44]

$$V_{co} = V_{co,ref} + A V_T \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \alpha_1 (T - T_{ref}) \quad (II.36)$$

$$I_{cc} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{cc,ref} + \alpha_2 (T - T_{ref}) \right) \quad (II.37)$$

$$V_m = V_{m,ref} + A V_T \ln \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) + \alpha_1 (T - T_{ref}) \quad (II.38)$$

$$I_m = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{m,ref} + \alpha_2 (T - T_{ref}) \right) \quad (II.39)$$

G : est l'intensité lumineuse éclairant la cellule ($W m^{-2}$)

G_{ref} : L'intensité de la condition standard ($1000 W m^{-2}$)

$V_{co,ref}$ et $I_{cc,ref}$: Représentent respectivement la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit à $T=25^\circ C$ et $G=1000 W/m^2$

α_1 : ($V/^\circ C$) coefficient de variation de la tension en fonction de la température donné par le constructeur.

α_2 : ($A/^\circ C$) coefficient de variation du courant en fonction de la température donné par le constructeur.

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

T_{ref} : Température à la condition standard de référence égale à $25^\circ C$

Le courant de saturation I_s dépendant de la température T et des paramètres électriques technologiques de la jonction, il est donné par [45]

$$I_s = I_{s,ref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{A}} \exp \left[\frac{1}{A \cdot K} \left(\frac{E_{g,ref}}{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \right) \right] \quad (II.40)$$

Où

$I_{s,ref}$: Le courant de saturation nominal (A)

A : Facteur d'idéalité de la jonction.

K : Constante de Boltzmann

E_g : Gap du matériau semi conducteur à la température T .

$E_{g,ref}$: Energie de gap à la température T_{ref}

W. De Soto, S.A. Klein et W.A. Beckman donnent une équation d'énergie de la bande de gap E_g , qui peut être utilisée pour tous type de modules à base de silicium [46]

$$E_g = \left(1 - 0,0002677(T - T_{ref})\right) \cdot E_{g,ref} \quad (\text{II.41})$$

Les données de valeurs de $E_{g,ref}$ [46]

Type de cellule	Silicium à couche mince	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin
$E_{g,ref}(eV)$	1.12	1.12	1.14

Tableau (II.2). Valeurs de $E_{g,ref}$ pour trois types de cellules au silicium

II.7. Caractéristiques électrique d'un module photovoltaïque

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un module PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. [32]

Ainsi pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du module PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \quad (\text{II.42})$$

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du module PV

V_{pv} : La tension à la sortie d'une cellule PV

I_{pv} : Le courant de sortie d'une cellule PV

II.7.1. Association des cellules photovoltaïques en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du Module photovoltaïque (MPV) . Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure (II.10). L'équation (II.43) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules :

$$V_{co.module} = N_s \cdot V_{co.cellule} \quad (\text{II.43})$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les modules commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série

($V_{co,module} = 0.6V * 36 = 21.6 V$) afin d'obtenir une tension optimale du module V_{max} proche de celle d'une tension de batterie de 12V. [35]



Figure(II.10).Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série. [35]

II.7.2.Association des cellules photovoltaïques en parallèle.

D'autre part une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du module ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure(II.11) .L'équation (II.44) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

$$I_{cc,module} = N_p \cdot I_{cc,cellule} \quad (II.44)$$

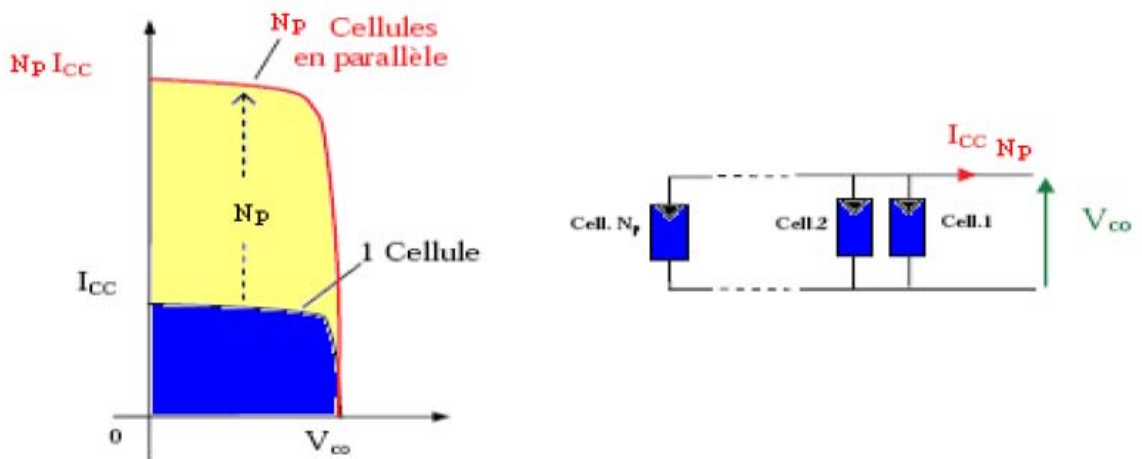


Figure (II.11). Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellule en parallèle. [35]

Si l'on désire avoir un module PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs cellules PV de caractéristiques similaires.

La puissance du module PV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée P_{\max} . Cette puissance est le maximum de la caractéristique $P(V)$ du module, correspond au produit d'une tension optimale notée V_{\max} et d'un courant optimal noté I_{\max} .

III.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présentés les différentes grandeurs caractéristiques de la cellule PV et déterminés les paramètres du circuit équivalent qui permet de tracer la caractéristique $I(V)$. Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle empirique à une diode pour simuler le fonctionnement des modules PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température. Le principal intérêt de ce modèle réside dans sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre à partir des caractéristiques techniques données par le constructeur.



CHAPITRE III :

***Simulation d'un
module
photovoltaïque***

CHAPITRE III : SIMULATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

I. INTRODUCTION

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Cependant, les coûts élevés de l'expérimentation justifient l'utilisation de la simulation qui constitue une bonne perspective. Dans ce chapitre, nous présentons les outils de simulation numérique du comportement d'un module photovoltaïque, tout en tenant compte de la variation de la température et de l'ensoleillement.

II. SIMULATION NUMERIQUE

Pour la modélisation d'un Module solaire, nous avons utilisé MATLAB comme outil de test et de simulation. Nous avons implanté un programme MATLAB sous forme d'un fichier script qui comprend différentes équations, du schéma équivalent, nécessaire pour tracer les courbes I (V) et P (V) d'un module solaire.

II.1. Logiciel de simulation

➤ Description

Le logiciel de simulation est basé sur le langage MATLAB (version 7.0). L'input est fourni par les données du matériau utilisé et les expressions établies dans le chapitre II. Il permet de réaliser des simulations numériques basées sur des algorithmes d'analyse numérique.

L'utilisation de MATLAB nous a permis d'atteindre un double objectif: la connaissance du logiciel en soi, qui est devenue indispensable, parce qu'il est de plus en plus utilisé dans l'industrie, les banques et beaucoup d'autres établissements à caractère industriel et économique et de recherche.

Chaque année, un nombre très important d'étudiants préparant des mémoires de Master ou de Doctorat ou engagés dans une étude en collaboration avec une industrie et travaillant sur des sujets à caractère numérique utilisent de plus en plus MATLAB.

L'apprentissage du logiciel passe impérativement par la mise en pratique des algorithmes d'analyse numérique étudiés plus théoriquement dans des cours consacrés à la mise en pratique de ce logiciel ou autres.

➤ **Les particularités de MATLAB**

MATLAB permet le travail interactif soit en mode commande, soit en mode programmation; tout en ayant toujours la possibilité de faire des visualisations graphiques. Considéré comme un des meilleurs langages de programmations (C++ ou Fortran),

MATLAB possède les particularités suivantes par rapport à ces langages:

- la programmation facile.
- la continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes.
- la gamme étendue des nombres et leurs précisions.
- la bibliothèque mathématique très compréhensive.
- l'outil graphique qui inclut les fonctions d'interface graphique et les utilitaires.
- la possibilité de liaison avec les autres langages classiques de programmations (C et Fortran).

Dans MATLAB, aucune déclaration n'est à effectuer sur les nombres. En effet, il n'existe pas de distinction entre les nombres entiers, les nombres réels, les nombres complexes et la simple ou double précision. Cette caractéristique rend le mode de programmation très facile et très rapide. En Fortran par exemple, une subroutine est presque nécessaire pour chaque variable simple ou double précision, entière, réelle ou complexe. Dans MATLAB, aucune nécessité n'est demandée pour la séparation de ces variables.

La bibliothèque des fonctions mathématiques dans MATLAB donne des analyses mathématiques très simples. En effet, l'utilisateur peut exécuter dans le mode commande n'importe quelle fonction mathématique se trouvant dans la bibliothèque sans avoir à recourir à la programmation. Pour l'interface graphique, des représentations scientifiques et même artistiques des objets peuvent être créées sur l'écran en utilisant les expressions mathématiques. Les graphiques sur MATLAB sont simples et attirent l'attention des utilisateurs, vu les possibilités importantes offertes par ce logiciel.

II.2 Simulation du Module Photovoltaïque « BP solaire 340 »

Pour réaliser cette simulation, nous avons utilisé l'environnement MATLAB. Nous avons choisi le module photovoltaïque «BP solaire 340» qui fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur.

Le module est composé de 36 cellules solaires polycristallines en silicium connectées en quatre rangés en parallèles chacune formées de neuf cellules en série pour produire une puissance maximale de 40 W.

Le Tableaux (III.1) donne les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sous les conditions standards (1000 W m^{-2} , masse optique : AM 1.5, température de cellule : $25 \text{ }^\circ\text{C}$) [10]

Caractéristiques électriques	symbole	BP solaire 340
Éclairement de référence	E_{ref}	1000W/m2
Température de référence	T_{ref}	25°C
Puissance maximale	P_{max}	40 watt
La tension au point P_{max}	V_{m}	17.3 V
Le courant au point P_{max}	I_{m}	2.3 A
La tension du circuit ouvert	V_{co}	21.8 V
Le courant de court circuit	I_{cc}	2.5 A
Coefficient de la température de I_{cc}	α_1	(0.065±0.015)% /°C
Coefficient de la température de V_{co}	α_2	- (80±10)mV/°C
Nombre des cellules par module 36(4x9 cellules en série)	N_{s}	9
	N_{p}	4
Température de fonctionnement normale des cellules PV (800 W/m2, 20°C , AM 1,5).	T_{fin}	47±2(°C)

Tableaux (III.1). Caractéristiques électriques du module BP solaire 340. [37]

II. 3. Résultats et discussions

A partir du logiciel établi nous avons déterminé ce qui suit :

- Caractéristique $I = f(V)$ du module PV .
- Caractéristique $P = f(V)$ du module PV .
- Les coordonnées du point de de puissance maximale (I_{m} , V_{m})
- Les quatre grandeurs caractéristiques du circuit équivalent (I_{ph} , I_{s} , A , R_{s}).
- Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$.
- Influence de la température sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$.
- Influence de la résistance série sur les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$.
- Variation du rendement du module en fonction de l'éclairement $\eta = f(G)$.
- Variation du rendement du module en fonction de la température $\eta = f(T)$.

II.3.1. Organigramme de calcul

L'organigramme reporté sur la figure III.1, résume la méthode explicite simplifiée pour les caractéristiques courant-tension I-V du module photovoltaïque.

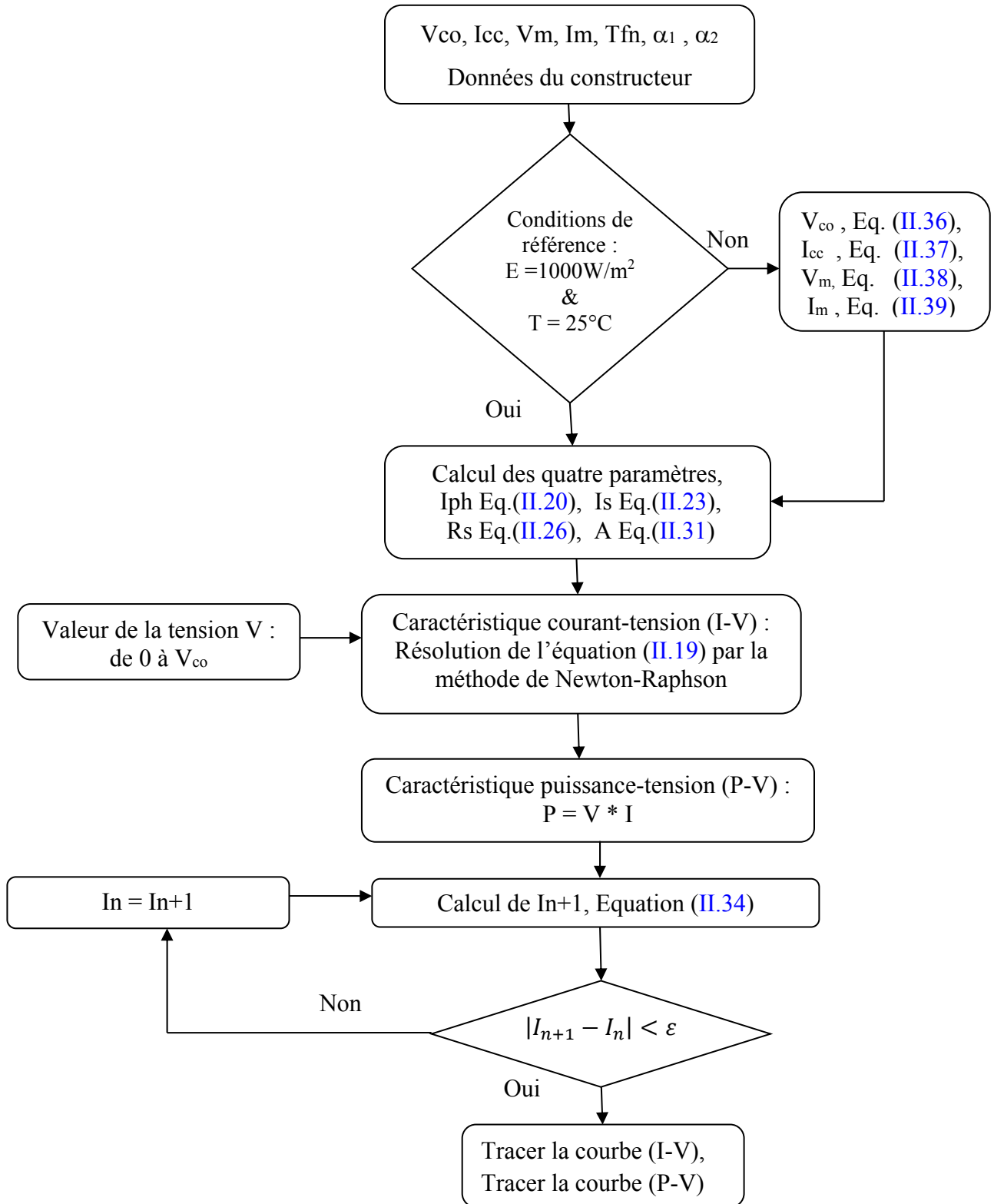
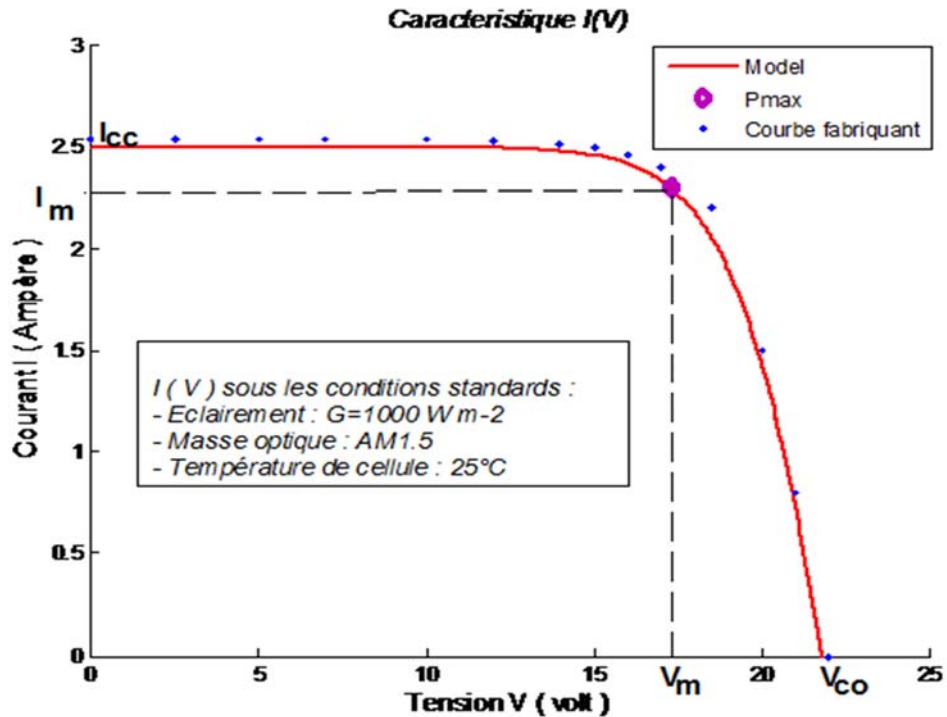


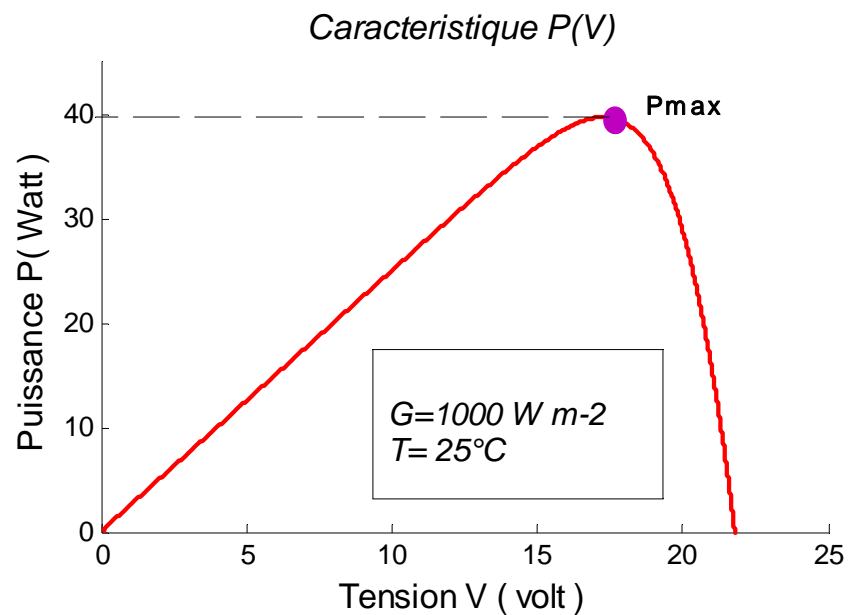
Figure (III.1). Organigramme des caractéristique I-V et P-V du module photovoltaïque

II. 3.2. Caractéristiques I-V et P-V du module BP solaire 340

Les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du module sont simulées sous les conditions standards de fonctionnement.



Figure(III.2). Caractéristique I(V) du module BP solaire 340



Figure(III.3). Caractéristique P(V) du module BP solaire 340

Les figures (III.2) et (III.3) (caractéristiques $(I-V)$ et $(P-V)$ du module PV) présentent, pour un éclairement et une température donnés, trois points remarquables: le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension de circuit ouvert (V_{co}) et la puissance optimale qui est la puissance maximale (P_{max}) délivrée par le modules PV. Donc pour extraire le maximum d'énergie du module PV, il faut les faire fonctionner au point de puissance maximale.

Comparant avec les caractéristiques données par le constructeur, nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques expérimentales et celles déduites par simulation du modèle à quatre paramètres.

II.3.3. Comportement d'un module photovoltaïque

a. Influence de l'éclairement

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 (III.4).

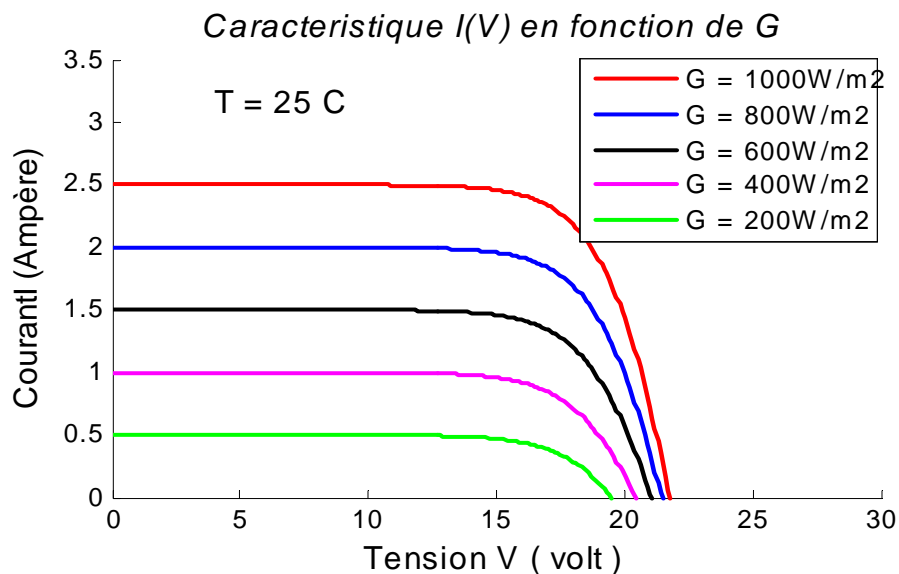


Figure (III. 4). Influence de la variation de l'éclairement sur les caractéristiques $I(V)$.

Pour différents niveaux d'irradiation et à 25°, le changement du courant optimal est très important. Ceci confirme l'approximation faite classiquement sur le courant optimal délivré par un module PV qui est globalement proportionnel au niveau d'irradiation.

Nous remarquons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert à une chute du flux lumineux. Nous pouvons le voir aussi sur la figure (III.5). Selon les conditions météorologiques, nous obtenons différentes courbes avec différentes puissances maximales au cours d'une même journée.

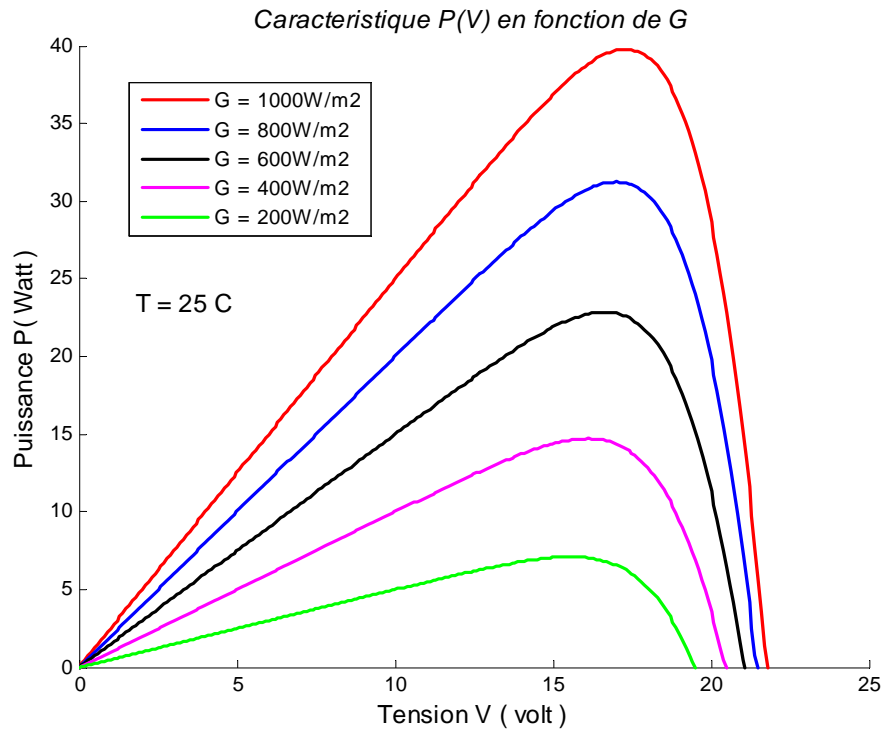


Figure (III.5). Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P(V)$.

En examinant les caractéristiques obtenues, nous pouvons conclure que des fortes variations du niveau d'irradiation provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Alors que, les variations relatives de la tension optimale restent faibles.

- La puissance maximale P_{max} est très sensible à l'éclairement, lorsque l'éclairement diminue de 200 W/m^2 , la puissance P_{max} diminue de **20 %**.
- Le courant I_{cc} est très sensible à l'éclairement: lorsque l'éclairement varie de 200 W/m^2 , le courant I_{cc} varie de **21 %**.
- La tension V_{max} varie très peu avec l'éclairement: lorsque l'éclairement varie de 200 W/m^2 la tension V_{max} varie de **2 %**.

Ces résultats montrent que la tension V_{max} varie assez peu au cours de la journée. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du module PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

b. Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. Les figures (III.6, III.7) décrivent le comportement du module sous un éclairage fixe de 1000 W/m^2 , et à des températures de cellule comprises entre 0°C et 60°C .

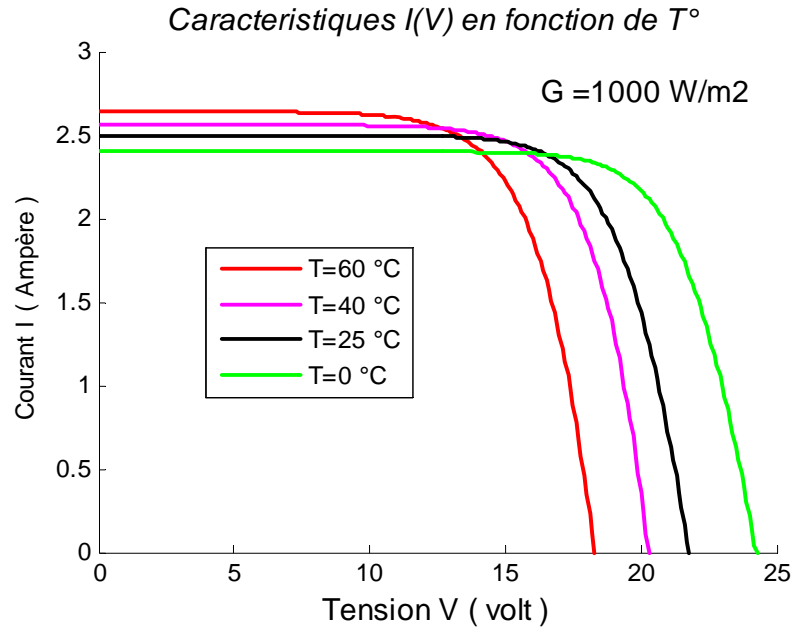


Figure (III.6). Influence de la température sur les caractéristiques I (V).

La figure III.6 montre que la tension à vide (V_{co}) d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule. L'ordre de grandeur des pertes est de 2.2 mV / par degré Celsius / par cellule. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05% par degré Celsius).

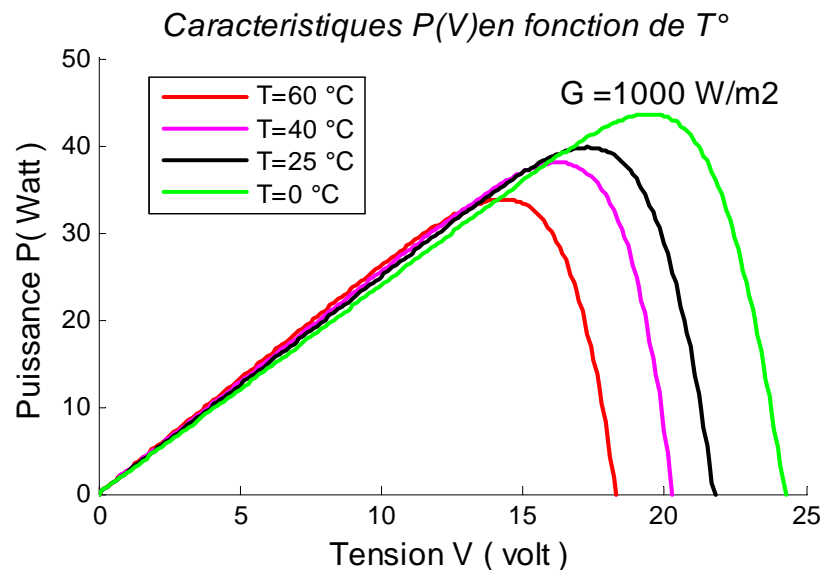


Figure (III.7). Influence de la température sur les caractéristiques (P-V).

On peut remarquer sur la figure **III.7** que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

Lorsque la température augmente de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ autour de la température ambiante et pour un éclairage de 1000W/m^2 la puissance maximale diminue de 10.8% , la tension V_{max} varie de 10.5% .

c. Influence de résistance série

Les performances d'un module photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible [13].

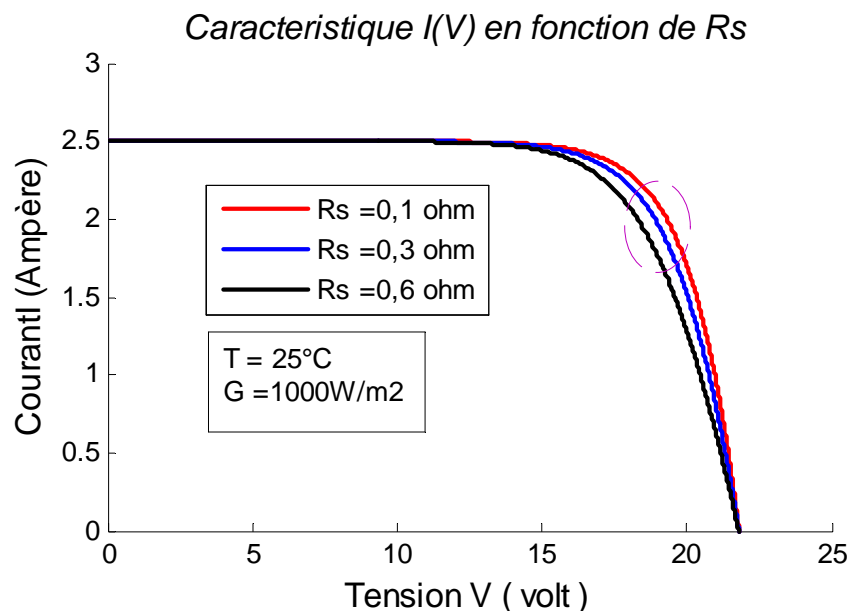


Figure (III.8). Influence de la résistance R_s sur la caractéristique $I = f(V)$

La figure **(III.8)** montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension (à droite du point de puissance maximale). La chute de tension correspondante est liée au courant générée par le module.

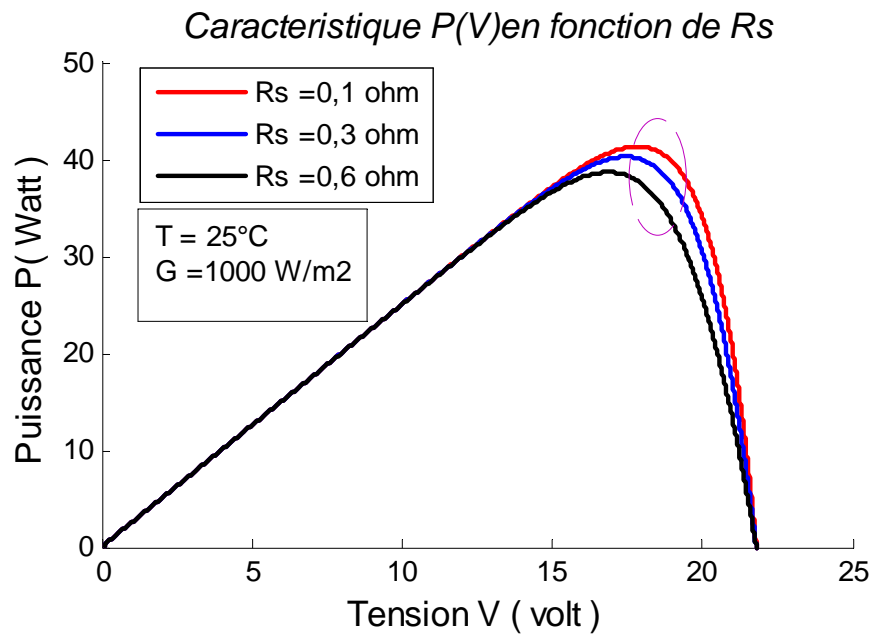


Figure (III.9). Influence de la résistance R_s sur la caractéristique $P=f(V)$

La figure (III.9) montre que cette influence se traduit par une diminution de la puissance maximale du module.

d. Influence du facteur d'idéalité

L'augmentation du facteur d'idéalité de la diode influe inversement sur la zone de puissance maximale et cela se traduit par une baisse de puissance au niveau de la zone de fonctionnement.

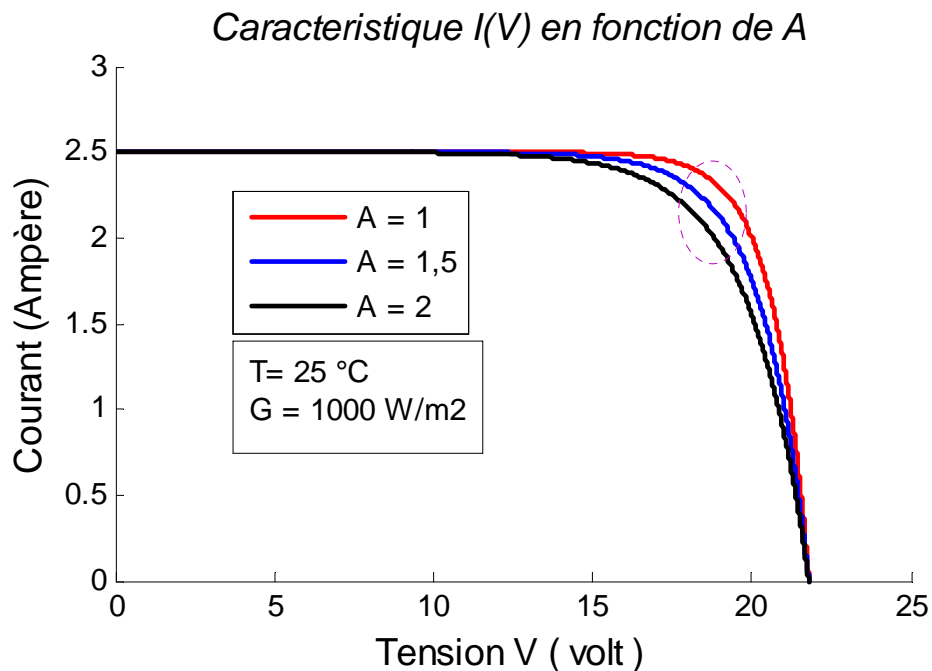


Figure (III.10). Influence du facteur d'idéalité sur les caractéristiques $(I-V)$.

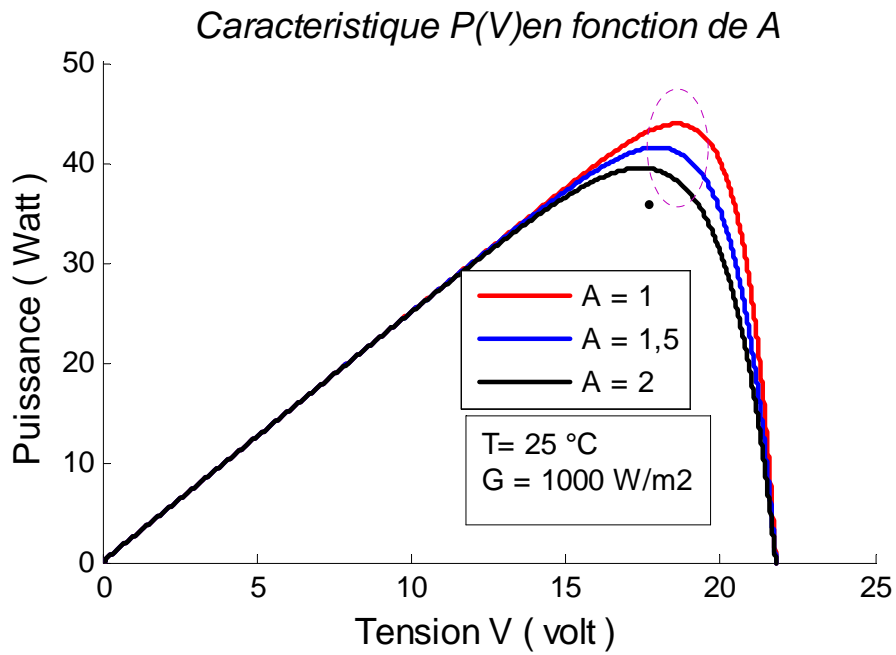


Figure (III.11). Influence du facteur d'idéalité sur les caractéristiques (P-V).

e. Rendement énergétique

Le rendement de conversion de l'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident. Le rendement dépend des conditions de fonctionnement électrique (intensité, tension) des cellules.

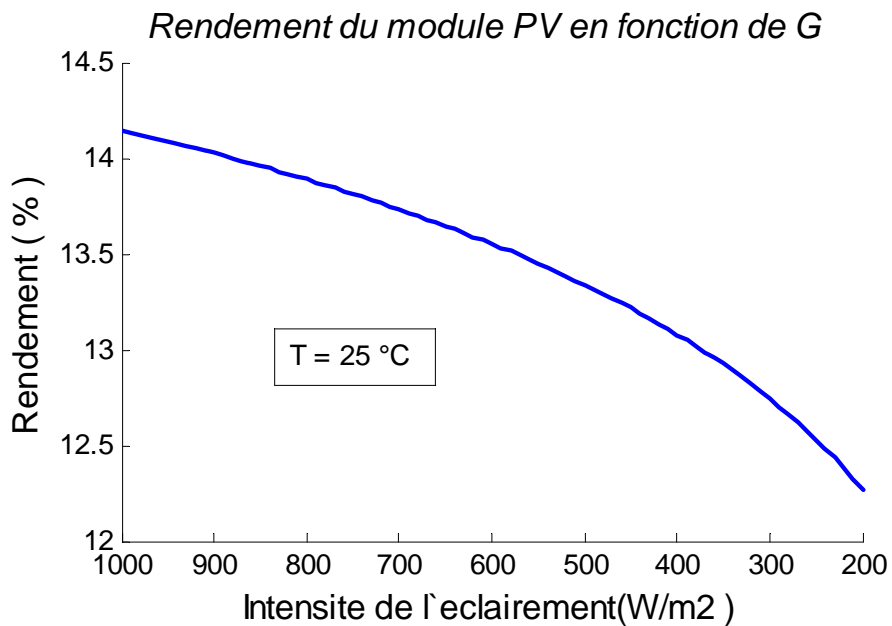


Figure (III.12). Variation du rendement du module avec l'éclairement.

La figure **III-13** ci-dessous montre clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la température de la cellule.

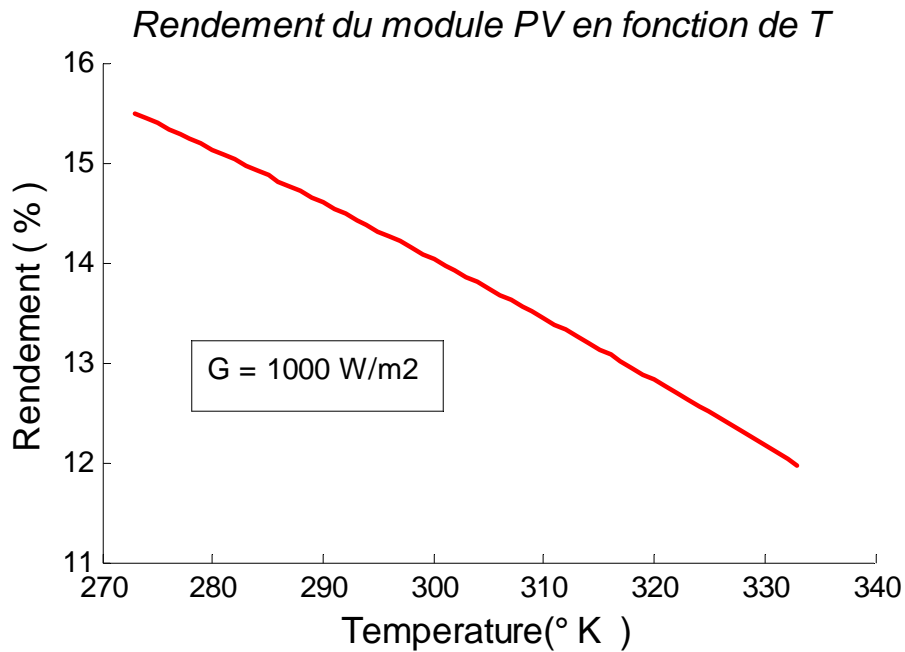


Figure (III.13). variation du rendement du module avec la température.

III. CONCLUSION

La simulation du modèle du module PV paraît intéressante ; l'influence des différents paramètres et autres sur les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ a été abordée. Pour notre étude nous avons choisi le modèle à quatre paramètres pour simuler le fonctionnement du module PV pour différentes conditions d'ensoleillement et de température.



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire concerne une application des plus actuelles des énergies renouvelables, celle de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour la production d'électricité.

Une meilleure rentabilité de ces systèmes photovoltaïques implique forcément une meilleure prédiction de son rendement énergétique en fonction des conditions météorologiques.

En effet, ce mémoire est consacré à la simulation de modules photovoltaïques, chose qui nous a permis de mieux comprendre le comportement du module photovoltaïque dans les conditions réelles de fonctionnement.

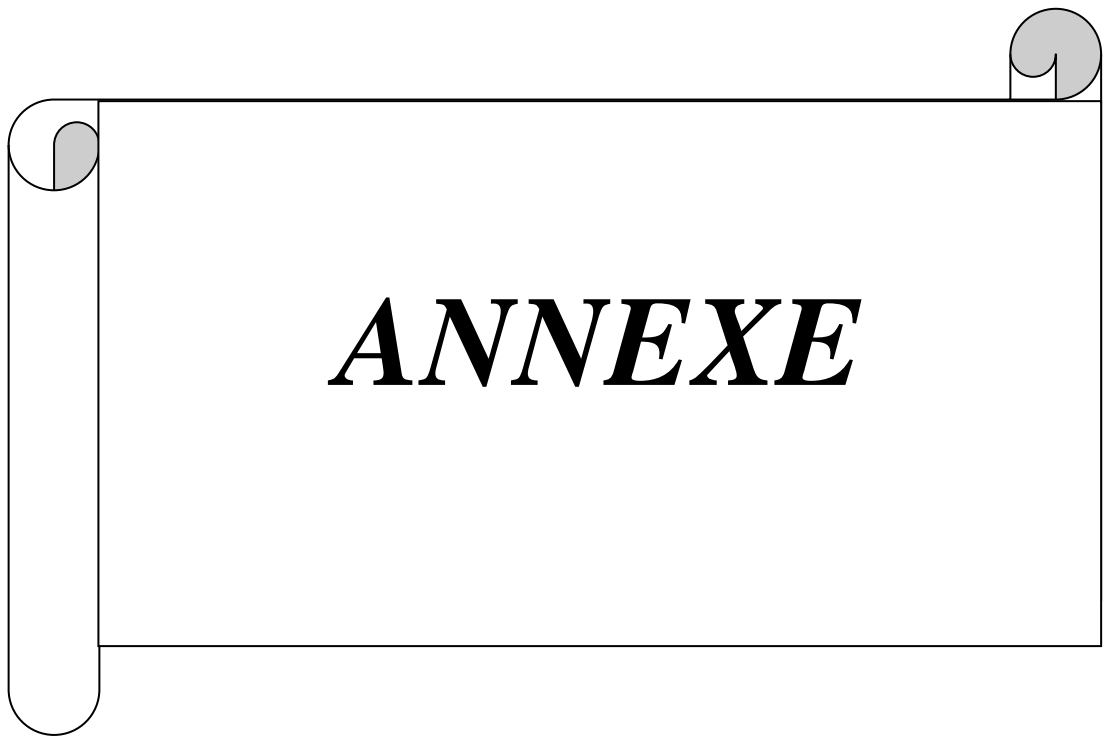
Dans un premier temps, nous avons procédé à la description de la cellule photovoltaïque ainsi que les différents paramètres qui caractérisent son comportement. Ensuite nous avons présenté un modèle mathématique permettant de calculer les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module solaire photovoltaïque LBP SOLAR340. Les paramètres constituant le modèle sont facilement calculés. Aussi, leurs paramètres d'entrée (I_{cc} , V_{co} , I_m , V_m) sont accessibles et ne nécessitent pas de méthodes d'extraction, ils sont généralement donnés par le constructeur de modules dans les conditions standards de test STC (l'éclairement 1000 W/m^2 et la température $25 \text{ }^\circ\text{C}$), cela exige un calcul de ces paramètres dans les conditions réelles de fonctionnement.

Dans un deuxième temps, on a mis en évidence l'influence des paramètres et des conditions climatiques sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du module photovoltaïque ainsi que sur son rendement de conversion.

On conclut que le présent travail est une initiation à la recherche dans le domaine du solaire photovoltaïque. Cela nous a permis:

- de programmer à l'aide de logiciel Matlab dans un premier temps.
- d'évaluer le comportement du module photovoltaïque sous différents éclairagements et Températures, et d'estimer sa puissance maximale.

Comme perspective à ce travail, il conviendrait de compléter l'étude par des modélisations du module PV qui font intervenir d'autres paramètres tel que la résistance shunt ou le modèle à deux diodes.



ANNEXE



BP 340

40 Watt Photovoltaic Module

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride multicrystalline silicon cells.

Performance

Rated power (P_{max})	40W
Power tolerance	$\pm 10\%$
Nominal voltage	12V
Limited Warranty ¹	25 years

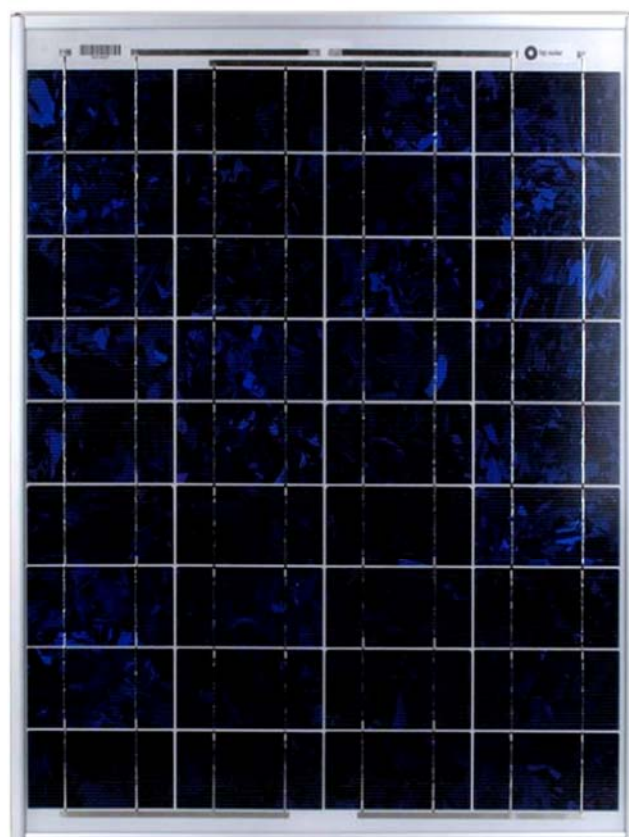
Configuration

J Clear universal frame and standard J-Box

Electrical Characteristics²

BP 340

Maximum power (P_{max}) ³	40W
Voltage at Pmax (V_{mp})	17.3V
Current at Pmax (I_{mp})	2.3A
Warranted minimum P_{max}	36W
Short-circuit current (I_{sc})	2.5A
Open-circuit voltage (V_{oc})	21.8V
Temperature coefficient of I_{sc}	$(0.065 \pm 0.015)\%/^{\circ}C$
Temperature coefficient of V_{oc}	$-(80 \pm 10)mV/^{\circ}C$
Temperature coefficient of power	$-(0.5 \pm 0.05)\%/^{\circ}C$
NOCT (Air 20°C; Sun 0.8kW/m ² ; wind 1m/s)	47 \pm 2°C
Maximum series fuse rating	20A
Maximum system voltage	50V (U.S. NEC & IEC 61215 rating)






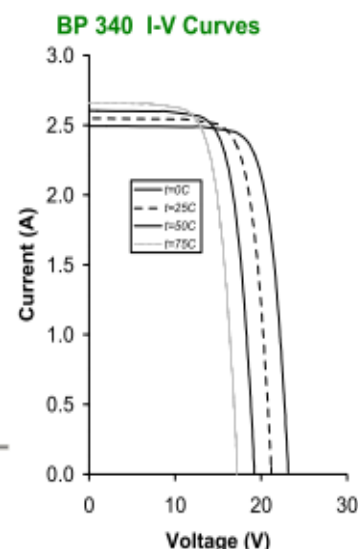
Mechanical Characteristics

Dimensions	Length: 655mm (25.8")	Width: 537mm (21.1")	Depth: 50mm (1.97")
Weight	5.75 kg (12.7 pounds)		
Solar Cells	36 cells (62.5mm x 125mm) in a 4x9 matrix connected in series		
Junction Box	J-Version junction box with 4-terminal connection block; IP 65, accepts PG 13.5, M20, 1/2 inch conduit, or cable fittings accepting 6-12mm diameter cable. Terminals accept 2.5 to 10mm ² (8 to 14 AWG) wire.		
Construction	Front: High-transmission 3mm (1/8 th inch) tempered glass; Back: White Polyester; Encapsulant: EVA		
Frame	Clear anodized aluminum alloy type 6063T6 Universal frame; Color: silver		

1. Module Warranty: 25-year limited warranty of 80% power output; 12-year limited warranty of 90% power output; 5-year limited warranty of materials and workmanship. See your local representative for full terms of these warranties.
2. This data represents the performance of typical BP modules, and are based on measurements made in accordance with ASTM E1036 corrected to SRC (STC.)
3. During the stabilization process that occurs during the first few months of deployment, module power may decrease by approx. 1% from typical P_{max} .

Quality and Safety

	Manufactured in ISO 9001-certified factories; conforms to European Community Directives 89/33/EEC, 73/23/EEC, 93/68/EEC; certified to IEC 61215
ESTI	Module power measurements calibrated to World Radiometric Reference through ESTI
	Listed by Underwriter's Laboratories for electrical and fire safety (Class C fire rating)
	Approved by Factory Mutual Research in NEC Class 1, Division 2, Groups C & D hazardous locations.

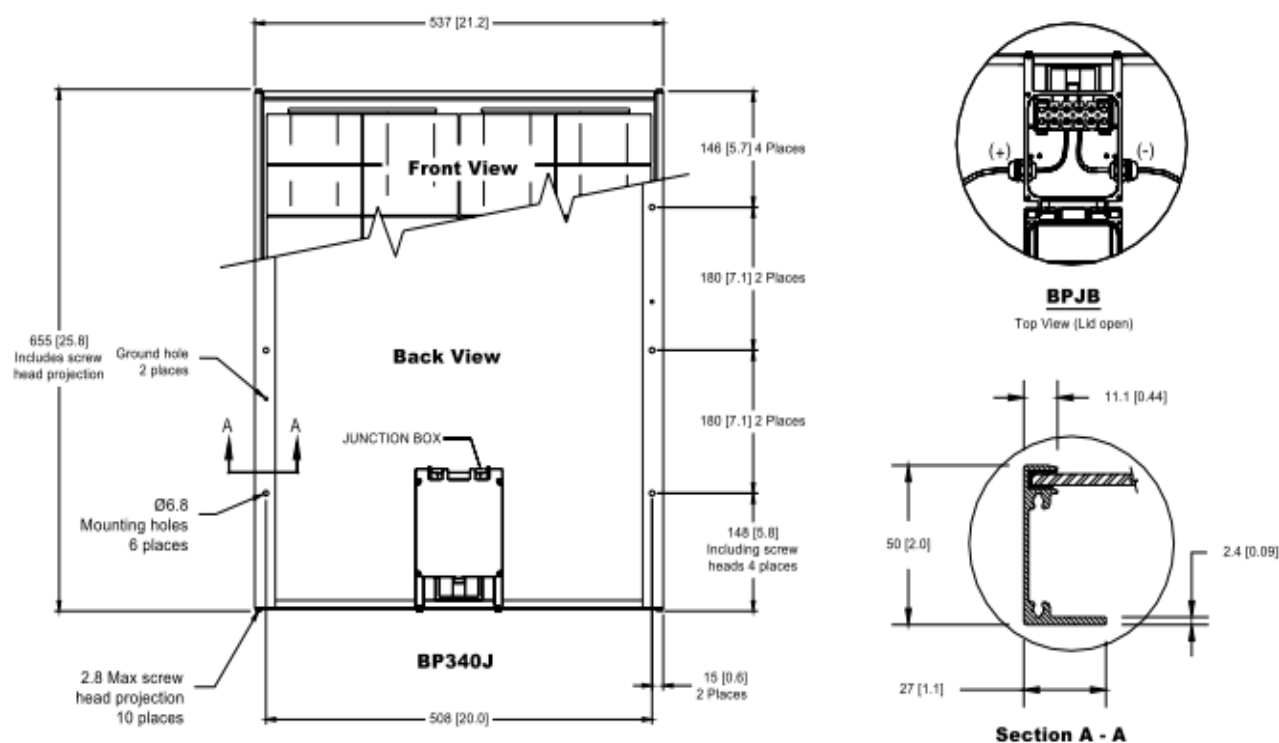


Qualification Test Parameters

Temperature cycling range	-40°C to +85°C (-40°F to 185°F)
Humidity freeze, damp heat	85% RH
Static load front and back (e.g. wind)	50psf (2400 pascals)
Front loading (e.g. snow)	113psf (5400 pascals)
Hailstone impact	25mm (1 inch) at 23 m/s (52mph)

Module Diagram

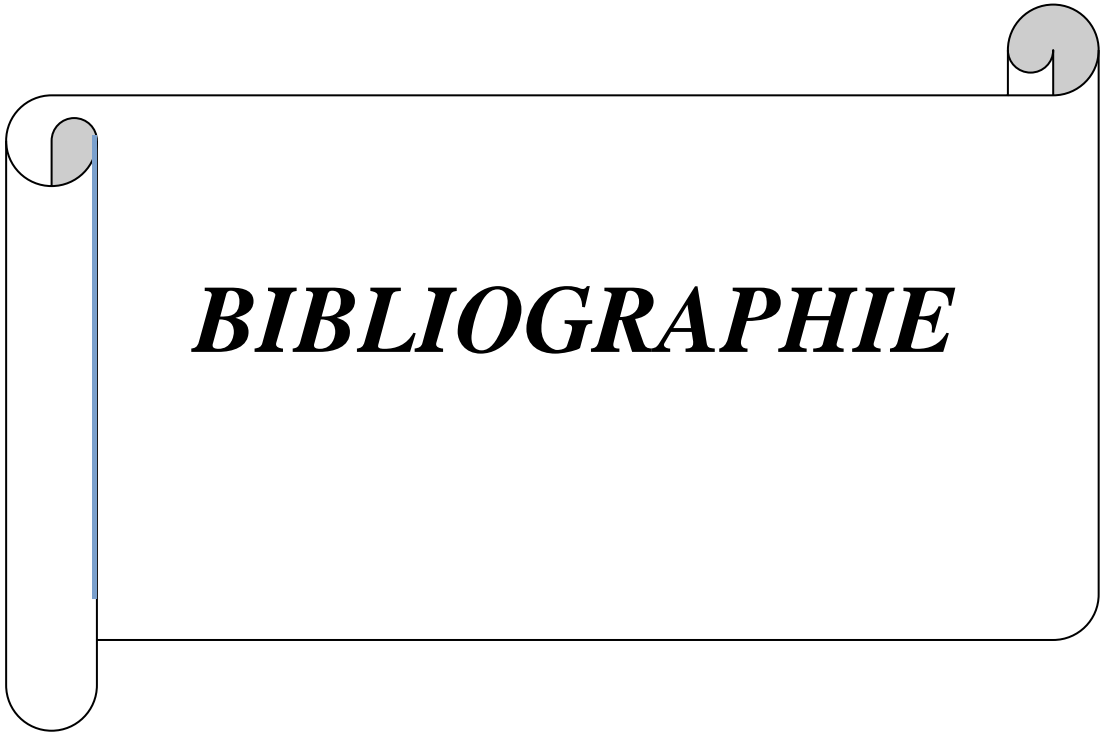
Dimensions in brackets are in inches. Un-bracketed dimensions are in millimeters. Overall tolerances ±3mm (1/8")



Included with each module: self-tapping grounding screw, instruction sheet, and warranty document.

Note: This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject to change without notice. Additional information may be found on our web site: www.bpsolar.com





BIBLIOGRAPHIE

- [1] OBSERV'ER. Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Systèmes Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.69-83.
- [2] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane «Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque» mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, Septembre 2015.P 3
- [3] harold J.hovel, « semiconductors and semimetals » ,vol.11,solar cells, academic press new York san Francisco London , 1975.
- [4] S.W.Angrist, « Direct Energy conversion», 4th ed. Boston: Allyn and Bacon, Inc, p177. 1982.
- [5] B. Equer, « Energie solaire photovoltaïque physique et technologie de la conversion photovoltaïque », 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [6] S. NAOUAL, « Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur », Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique 2010.
- [7] Honsberg C, Bowden, « Photovoltaics Devices, Systems and Applications » Sydney (Aus) Univ of New South Wales, 1998.
- [8] MISSOUM MOHAMMED, «Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie» Mémoire, UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF ,11 décembre 2011 P26
- [9] BOUALEM DENDIB, « Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque », Université Ferhat Abbes-Sétif mémoire de magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007
- [10] Ressources naturelles du canada, « Les systèmes photovoltaïques, division de l'énergie renouvelable et électrique», n°M92-28/2001F, Ottawa, Canada 2002
- [11] W. Wu, N. Pongratananukul, W. Qiu, K. Rustom, T. Kasparis, and I. Batarseh, «DSP-based multiple peak power tracking for expandable power system», in Proc. APEC, pp. 525–530, 2003.

- [12] A. Ricaud, « Photopiles solaires: de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés, Presses polytechniques », universitaires romandes, p. 199, 1997.
- [13] W. Shockley and H.J. Queisser, « Detailed balance limit of efficiency of p-n Junction solar cells », *J.Appl.phys.*32, 510, 1961.
- [14] M.A. Green, « Third Generation photovoltaics: Advanced Solar Electricity Generation » Springer. Berlin, 75, 2003.
- [15] Lalouni. «Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie», Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2005
- [16] Y. Veschetti, « Modélisation caractérisation et réalisation de nouvelles structures Photovoltaïques sur substrat de silicium mince», Thèse de doctorat, discipline: physique des semi-conducteurs, université Louis Pasteur (Strasbourg I), 2005.
- [17] Anne Labouret et Michel Viloz, «énergie solaire photovoltaïque: le manuel du professionnel », Collection EEA Série Electrotechnique, Paris: 4ème édition Dunod, 2003.
- [18] A.Aziz, K.KAssmi, F.Olivié, G.Sarrabayrouse, A.Martinez, « Synthèses bibliographiques sur les chaines photovoltaïques. 1-générateur photovoltaïque (PV) », Rapport LAAS N°04348, 27p, Juin 2004
- [19] Jean-Paul BRAUN. Benjamin FARAGGI. Anne Labouret. « Les cellules solaires »Editions technique et scientifique Françaises – Paris – 1996
- [20] Noble Duncan, et Robert K. Swartman. « The Canadian Renewable Energy Guide, Burns town», General Store Publishing House, 1995.
- [21] F.Slama, « Modélisation d un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique » Mémoire de magister ; université Ferhat Abbas, Sétif. 2011.
- [22] N. Achäïbou, « Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque ». *Rev. Energ. Ren : Valorisation* (1999) 1-6.
- [23] T.Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement, manuel D'utilisation » agence française pour la maitrise de l'énergie.
- [24] E.L. Meyer and E.Ernest van Dyk, «The Effect of Reduced Shunt Resistance and Shading on Photovoltaic Module Performance», *Proc. of the 31th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, pp 1331-1334, 2005.

- [25] Harlod J. hovel, « semiconductors and semimetals », vol. 11, solar cells, academic press New York san Francisco London, 1975.
- [26] J. Royer T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », IEPF/Université D Ottawa/EIER/CREPA
- [27] Pastor, A.C., « Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electronics, in Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes 2006 », GEET Thèse de doctorat p. 129.
- [28] A. Boden « Analyse optimisée du système de pompage photovoltaïque » Mémoire de magistère, université de Constantine, année 2008.
- [29] A. Ould Mohamed Yahya1 , A. Ould Mahmoud1 et I. Youm2,3 « Revue des Energies Renouvelables Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » Vol. 11 N°3 (2008) 473 – 483 473.
- [30] Nafa « Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque» Mémoire de DES, Université de Tlemcen, Juin 2001.
- [31] M^{elle} Debili Narimane « Etude de optimisation en environnement Matlab /simulink d'un système de pompage photovoltaïque » Thèse de magister en électronique , Université de Constantine, 2014/2015.
- [32] Helali Kamelia «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative » Mémoire de magistère en électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou ,2012 .
- [33] Roshank Radbeh «Réalisation et caractérisation des cellules solaire organique à couches composites polymères incluant des carbones »Thèse de doctorat, Université de Limoges ,2008 .
- [34] Zouach Foudil «Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques » Mémoire de magistère en électronique, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [35] Petibon Stéphane « Nouvelle architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïque » Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

- [36] Dariga Meekhun «Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique » THESE de doctorat, université de Toulouse.
- [37] Fiche technique du module BP solaire 340(voire annexe)
- [38] Assia Zerduodi, Rachid Chenni «Etude de l'influence des différents paramètres sur un module photovoltaïques» ,N°41, juin 2015,49-54 .
- [39] Akihiro Oi, «Design And Simulation Of Photovoltaic Water Pumping System », In Partial Fulfillment Of The Degree Of Master of Science In Electrical Engineering, Faculty Of California. Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2005.
- [40] R Chenni, M Makhlof, A Bouzid «A Detailed Modeling Method For photovoltaic Cells», Elsevier, Energy, 32. 2007.
- [41] Rafika Khazzar «Optimisation de chaine de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique » Thèse en vue de l'obtention du diplôme de doctorat, Université El-Hadl Lakhdar-Batna1, 2017.
- [42] A. Djafour « Etude d'un système de production d'hydrogène solaire » Thèse doctorat, Université de Batna, 2013.
- [43] T. U. Townsend «The long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems » These doctorate, University of Wisconsin-Madison, 1989.
- [44] B. FRY « Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems» These doctorate , University of Wisconsin-Madison, 1999.
- [45] Bencherif Mohammed, « Physique énergétique et matériaux Sur le Thème Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension »
- [46] Alanso Gorinne « Contribution à l'optimisation, la gestion et traitement de l'énergie » Mémoire d'habilitation à diriger les recherche, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons opté à la modélisation et la simulation d'un module photovoltaïque, on avons choisi, comme modèle, un circuit équivalent à une diode ne nécessitant que le calcul de quatre paramètres (I_s , A , I_{cc} , R_s) et ne faisant intervenir que les caractéristiques du fabricant du module .

L'objectif de ce travail est de tester les paramètres extensifs qui influent sur notre module PV. On s'intéresse plus particulièrement à l'effet de la température et de l'éclairement solaire incident.

Les résultats de la simulation obtenue par MATLAB démontrent la dégradation des performances du module photovoltaïque (puissance, rendement) lorsque les conditions météorologiques sont défavorables

Mots clés : Photovoltaïque, Modélisation, Simulation.

ملخص :

في هذه الأطروحة ، قمنا بنمذجة ومحاكاة وحدة الكهروضوئية ، من اجل ذلك اخترنا ، كنموذج ، دائرة مكافئة ذات ثنائي الصمام واحد الذي يتطلب فقط حساب المعلمات الأربعة (I_s ، I_{cc} ، A ، R_s) و المستخلصة من خصائص الشركة المصنعة للوحدة.

الغرض من هذا العمل هو اختبار المعلمات التي تؤثر على الوحدة الكهروضوئية. و بشكل خاص تأثير درجة الحرارة و الإضاءة الشمسية.

نتائج المحاكاة المتحصل عليها تمت بواسطة MATLAB تدل على تدهور أداء الوحدة الكهروضوئية (الطاقة والمردودية) عندما تكون الظروف الجوية غير مواتية.

الكلمات المفتاحية: كهروضوئي , المحاكاة , التصميم.