

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Télécommunications

Présenté par

Amara Sayad

Ouada Amine

Thème

Etude et simulation d'une cellule photovoltaïque

Soutenu le 25/05/2016. Devant le jury composé de :

Mr. Chemsali Ali.

Maitre de conférences Président

Melle. Boukaous Chahra.

Maitre de conférences Rapporteur

Mr. Medjouri Abdelkader.

Maitre de conférences Examineur

Année Universitaire 2015/2016

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

*Mes très chers parents, pour leurs sacrifices, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager
que Dieu me les garde*

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes collègues et mes amis.

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

Remerciements

En premier lieu, nous remercions DIEU tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour accomplir notre travail.

Nous tenons aussi à remercier :

- *Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Docteur. C. BOUKAOUS d'avoir accepté de diriger ce travail.*
- *Le président et les membres du jury pour leur temps précieux consacré à la lecture et à l'évaluation de ce mémoire. - Les responsables et tout le personnel du département de l'électronique pour les facilités accordées pour terminer ce travail.*
- *Tous nos professeurs enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus. A tous ceux qui, nous ont aidés ou encouragés de loin ou de près à l'élaboration de ce mémoire.*
- *Nous remercions aussi Dr Monsieur Yacine Labbi, de m'avoir consacré son temps, pour son encouragement et ses conseils qui ont été très utiles, pour la réalisation de ce travail*
- *A mes parents et ma famille qui m'ont soutenue durant toute la période d'étude et qui m'ont tellement encouragée, un grand remerciement.*

SAYAD ET AMINE

Tables des matières

Tables des matières	1
Liste des figures et tableaux.....	3
Introduction générale.....	7
Chapitre I : Etat de l'art d'une cellule photovoltaïque	10
I.1. Introduction.....	10
I.2. Historique (chronologie).....	10
I.3. Photovoltaïque.....	11
I.3.1. Cellule photovoltaïque.....	11
I.3.2. L'effet photovoltaïque.....	11
I.4. Comportement de la jonction PN.....	12
I.4.1. Bandes d'énergie.....	12
I.4.2. Les Propriétés physique et électrique des Semi-conducteurs	13
I.4.3. Dopage	15
I.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	19
I.5.1. Définition.....	19
I.5.2. Structure d'une cellule photovoltaïque.....	19
I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	20
I.6. Paramètre photovoltaïque.....	21
I.7. Types des cellules solaires.....	23
I.8. Panneau solaire.....	25
I.9. Module photovoltaïque.....	25
I.10. Association des cellules solaires photovoltaïques	26
I.10.1. Association en série.....	26
I.10.2. Association en parallèle.....	26
I.10.3. Association hybride (en série et en parallèle).....	27
I.11. Avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	28
I.11.1. Avantages.....	28
I.11.2. Inconvénients	28
I.12. Domaines d'application.....	29
I.13. Conclusion.....	30
Chapitre II : Circuits équivalents et modèles mathématiques.....	32
II.1. Introduction.....	32
II.2. Modélisation des cellules photovoltaïques.....	32

II.2.1 Modèle à deux diodes.....	33
II.2.1.1 Modèle à sept paramètres (2M7P).....	33
II.2.1.2 Modèle à six paramètres (2M6P).....	36
II.2.1.3 Modèle à cinq paramètres (2M5P)	36
II.2.2. Modèle à une diode.....	37
II.2.2.1.Modèle à trois paramètres (L3P).....	38
II.2.2.2.Modèle à quatre paramètres (L4P).....	39
II.2.2.3. Modèle à cinq paramètres (L5P)	39
II.3. Sélection du modèle.....	40
II.3.1. Présentation du modèle choisi.....	40
II.3.2. Paramètre associés au modèle.....	43
II.4 Conclusion	44
Chapitre III: Simulation, résultats et discussions	46
III.1. Introduction.....	46
III.2.L'environnement MATLAB/Simulink.....	46
III.3.Création du modèle de la cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink.....	47
III.4. Résultats et discussions de simulation.....	52
III.4.1. Caractéristiques de la cellule PV	52
III.4.2. Caractéristiques du module PV.....	54
III.4.2.1.Influence de l'éclairement.....	54
III.4.2.2.Influence de la température.....	56
III.4.2.3.Influence de la résistance série.....	59
III.4.2.4.Influence simultanée du rayonnement et de température.....	60
III.5. Conclusion	61
Conclusion générale	63
Références Bibliographiques	65
Résumé	

Liste des figures et tableaux

Figure I. 1 : Schéma d'une cellule élémentaire [5].....	11
Figure I. 2: Diagrammes des bandes d'énergies au voisinage de la jonction [8].....	13
Figure I. 3: Bandes d'énergie pour un métal, un isolant et un semi-conducteur [10].....	14
Figure I. 4: Semi-conducteur de type n [14].....	16
Figure I. 5: Semi conducteur de type p [14].....	17
Figure I. 6: La jonction PN.....	17
Figure I. 7: Caractéristique courant-tension $I(V)$ d'une jonction PN [14].	18
Figure I. 8: L'effet photovoltaïque.....	19
Figure I. 9: Cellule solaire photovoltaïque [17].....	19
Figure I. 10: Structure équivalente d'une cellule photovoltaïque [18].	20
Figure I. 11: Structure (gauche) & diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [19].	21
Figure I. 12: Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque [19].	22
Figure I. 13: Cellules monocristallines [23].....	24
Figure I. 15: Cellules polycristallines [23].....	24
Figure I. 16: Cellules amorphe. [23].....	24
Figure I. 17: Panneaux photovoltaïques [23].....	25
Figure I. 18: Module photovoltaïque [24].	26
Figure I. 19: Caractéristique résultante d'un montage en série [5].	26
Figure I. 20: Caractéristique résultante d'un montage en parallèle [5].	27
Figure I. 21: Caractéristique résultante d'un montage hybride de (np et ns) cellules [26].	27
Figure I. 22: Système d'information des bus-Lyon [28].....	29
Figure I. 23: Ombrières photovoltaïques à St Aunés (Hérault) [28].	30
Figure II. 1: Schéma équivalent d'une cellule PV. Modèle à deux diodes.....	33
Figure II. 2: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P.....	34
Figure II. 3: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.....	36
Figure II. 4: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.....	37
Figure II. 5: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.	38
Figure II. 6: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.....	38
Figure II. 7: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.....	39
Figure II. 8: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.....	40
Figure II. 9: Module SOLKAR 36W.....	41
Figure II. 10: Schéma équivalent du modèle à une seule diode.	42

<i>Figure III. 1: Bibliothèque Simulink</i>	47
<i>Figure III. 2: Current Folder</i>	47
<i>Figure III. 3: File new modèle</i>	48
<i>Figure III. 4: Circuit sous-système 1</i>	48
<i>Figure III. 5: Circuit sous-système 2</i>	49
<i>Figure III. 6: Circuit sous-système 3</i>	49
<i>Figure III. 7: Circuit sous-système 4</i>	50
<i>Figure III. 8: Circuit sous-système 5</i>	50
<i>Figure III. 9: Circuit sous-système 6</i>	51
<i>Figure III. 10: Interconnexion de tous les six sous-systèmes</i>	51
<i>Figure III. 11: Modèle d'une cellule PV sous Simulink</i>	52
<i>Figure III. 12: Caractéristique typique I(V) d'une cellule solaire</i>	52
<i>Figure III. 13: Caractéristique P(V) d'une cellule solaire</i>	53
<i>Figure III. 14: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)</i>	54
<i>Figure III. 15: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)</i>	55
<i>Figure III. 16: Variation du rendement du module en fonction de l'éclairement</i>	56
<i>Figure III. 17: Influence de la température sur la caractéristique I(V)</i>	57
<i>Figure III. 18: Influence de la température sur la caractéristique P(V)</i>	57
<i>Figure III. 19: Variation du rendement du module en fonction de la température</i>	58
<i>Figure III. 20: Influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I(V)</i>	59
<i>Figure III. 21: Influence de la résistance série R_s sur la caractéristique P(V)</i>	59
<i>Figure III. 22: Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur caractéristique I(V)</i>	60
<i>Figure III. 23: Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur caractéristique P(V)</i> ..	60
<i>Tableau I. 1: Rendement énergétique des différents types des cellules photovoltaïques [21]</i>	23
<i>Tableau II. 1: Caractéristiques du module SOLKAR 36W [31]</i>	41
<i>Tableau III. 1: Variation des paramètres de la caractéristique I (V) en fonction de l'éclairement</i>	55
<i>Tableau III. 2: Variation des paramètres de la caractéristique I (V) en fonction de la température</i> ...	57

V_{co} : Tension a circuit-ouvert	[V]
N_s : Nombre de cellules en série	
N_p : Nombre de cellules en parallèles	
V_{mp} : Tension maximale de la cellule	[V]
I_{mp} : Courant maximale de la cellule	[V]
R_s : Résistance série par cellule	[Ω]
P_{max} : Puissance maximale disponible	[W]
R_{sh} : Résistance shunt par la cellule	[Ω]
I_{pv} :Le courant fourni par la cellule	[A]
I_d : Courant dans la diode	[A]
I_s : Courant de saturation de la diode	[A]
V_d : Tension aux bornes de la diode	[V]
q : Charge d'électron	[c]
K : Constante de Boltzmann	[J/K]
I_{d1} : Courant de la diode 1	[A]
I_{d2} : Courant de la diode 2	[A]
$I_{ph(ref)}$: Le courant photonique sous condition de référence	[A]
I_{sh} : Courant de la résistance shunt	[A]
μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température	[A/K]
G_{ref} : Condition de référence	
G, G_{ref} : L'éclairement réels et la condition de référence la surface de module photovoltaïque.	[W/m ²]
T_c : Température absolue	[K]
T : Température	[K]
$T_c, T_{c(ref)}$: La température de cellules à la condition de référence	[W/m ²]
E_g : L'énergie de gap	[eV]
FF : Facteur de forme	
η : Rendement de la cellule	[%]
PV : Photovoltaïque	
S : Surface du module photovoltaïque	[m ²]
k_i : Le coefficient de température de I_{ph}	[A/°C]
P_{in} : La puissance incidente (d'éclairement)	[W]

Introduction

Générale

Introduction générale

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part

L'énergie issue de sources fossiles, qui est très largement utilisée aujourd'hui, est polluante, rejette d'importantes quantités de gaz à effets de serre, génère des tensions géopolitiques et des problèmes de sûreté. De plus la quantité disponible de ces ressources va s'amenuiser à plus ou moins brève échéance. Les importantes conséquences environnementales et sociétales de nos modes de production et de consommation d'énergie nous amènent donc à devoir complètement repenser ceux-ci afin de les rendre plus durables.

Une partie importante de la solution à cette problématique réside dans l'accroissement de la part des énergies renouvelables. En effet, ces énergies rejettent moins de gaz à effet de serre et de polluants, et ont une source d'énergie inépuisable par utilisation intensive. Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance car le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV).

Au cours de ces dernières années, des améliorations considérables concernant les performances des cellules solaires ont permis d'aboutir à des rendements de conversion photovoltaïque respectivement de 24.8 % et de 23 % sous la condition d'éclairement du soleil.

Durant ces dernières années, les chercheurs se sont orientés vers la simulation à cause des coûts élevés de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication).

La simulation des cellules solaires à l'aide de différents simulateurs consiste à comprendre leur comportement. Simulink de Matlab est l'un de ces simulateurs avec un langage simple et très efficace. Matlab permet, entre autre, la visualisation des paramètres qui influencent le comportement des cellules solaires.

Donc dans le but de comprendre et maîtriser le fonctionnement des cellules solaires en fonction de plusieurs paramètres internes liés au dispositif lui-même ou externe lié à l'environnement tel que le rayonnement et la température, ce modeste travail est structuré ainsi :

Le premier chapitre, donne un rappel et une description générale des cellules photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les circuits équivalents électriques du générateur photovoltaïque et les modèles à une et à deux diodes. Des modèles mathématiques, associés aux circuits équivalents, sont cités afin de sélectionner le modèle adéquat pour notre étude.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus pour un modèle à une diode en utilisant le logiciel « Matlab/Simulink ». Les résultats obtenus sont comparés à ceux de la littérature.

Finalement, nous terminerons par une conclusion générale qui résume notre étude et les perspectives possibles.

Chapitre I

Etat de l'art

d'une cellule photovoltaïque

Chapitre I : Etat de l'art d'une cellule photovoltaïque

I.1.Introduction

La production d'électricité par conversion de la lumière à l'aide de cellules photovoltaïques connaît un essor fulgurant à l'aube du 21ème siècle avec un taux de croissance record de plus de 40% en 2000. De nouvelles approches technologiques seront toujours nécessaires afin de réaliser des cellules à faible coût et à haut rendement de conversion énergétique afin de permettre au photovoltaïque de dépasser le seuil de compétitivité par rapport aux autres sources de production d'électricité.

Ce premier chapitre sera consacré à une étude du principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque qui est basé sur une jonction PN avec ses bandes d'énergie et son dopage suivi d'une présentation des différents paramètres qui feront l'objet du troisième chapitre.

I.2. Historique (chronologie)

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, un procédé utilisant l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide.
- 1877 : l'apparition de première cellule solaire silicium.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, mettent au point la première cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1960 : une cellule avec un rendement de 14%.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1974-1977 : les premières compagnies de l'énergie solaire.
- > 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.
- 1995 : Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001[1-2].

En 2001, Shmidt-Mende réalisèrent une cellule auto-assemblée à base de cristaux liquides de hexabenzocoronene et pérylène, et quelques années plus tard, les avancés scientifique et technologiques sont telles qu'en 2008, l'entreprise Fujikura (fabriquant de composés électroniques) est parvenue à faire fonctionner une cellule en photovoltaïque organique de type DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell ou cellule Gratzel) [3].

I.3. Photovoltaïque

I.3.1. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, quand elle est exposée à la lumière (photons) génère de l'électricité. C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est en fonction de la lumière incidente. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule (figure I.1)[4].

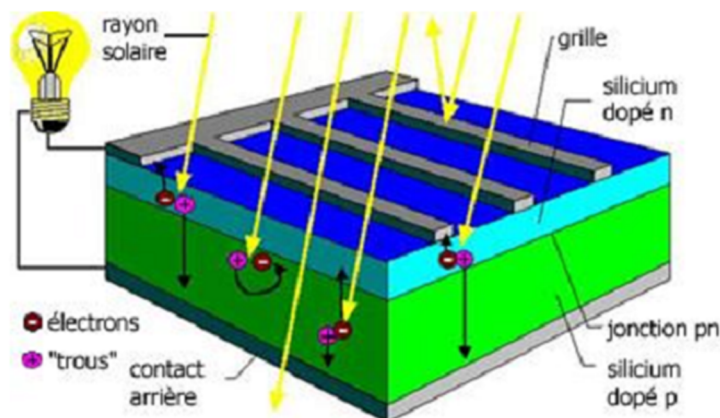


Figure I. 1 : Schéma d'une cellule élémentaire [5].

I.3.2. L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot de grec ancien « photos » (lumière) et du nom du physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrique, qui donna son nom au Volt (unité de mesure de la tension électrique).

L'effet voltaïque a été découvert par la première fois en 1839 par le physicien Alexandre- Edmond Becqueurel. Lorsque les « grains de lumière » heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fin. Ce courant peut être ajouté à

celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné. Donc cet effet est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs, (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques), qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Il est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors des paires électrons-trous créant une tension ou un courant électrique.

Le principe de ce phénomène est le suivant : le matériau semi-conducteur comporte deux régions, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée n et dopée p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde les électrons en excès dans le matériau de type n diffusent dans le matériau de type p. la zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à reposer les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. Plusieurs types de composants peuvent être créés à partir de ce principe, ils sont appelés photo diodes [6-7].

I.4.Comportement de la jonction PN

I.4.1.Bandes d'énergie

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones, l'une de type P (majoritaire en trous, minoritaire en électrons) et l'autre de type N (majoritaire en électrons, minoritaire en trous). Dès la juxtaposition, des courant de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction et créent, au voisinage immédiat de celle-ci, une barrière de potentiel qui s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Lorsque l'équilibre est atteint, le champ électrique créé par la barrière de potentiel est suffisant pour équilibrer les courants de diffusion des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires, par suite

de la largeur très faible de la jonction, d'où un courant global de diffusion nul. Les niveaux d'énergies au voisinage de la jonction sont alors donnés par la figure I.2 [8].

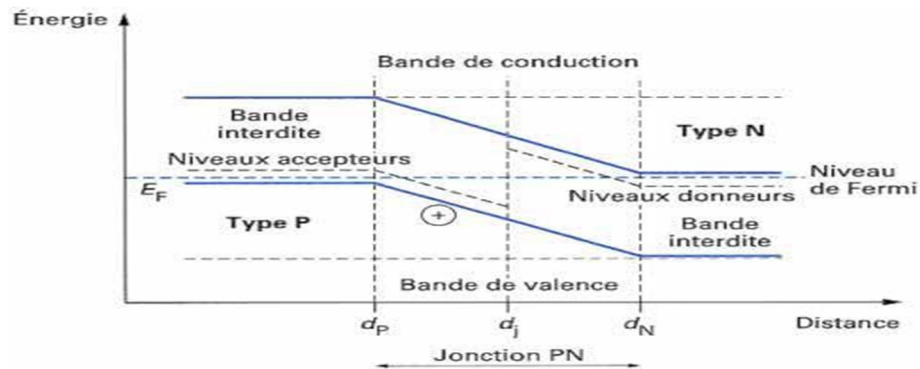


Figure I. 2: Diagrammes des bandes d'énergies au voisinage de la jonction [8].

Au niveau de la jonction, la bande d'énergie est centrée autour du niveau de Fermi E_F , il existe, autour de cette énergie, une largeur de bande interdite séparant la bande de valence et la bande de conduction. Pour créer un courant autour de la jonction PN, il est nécessaire :

- Soit d'abaisser la barrière de potentiel en polarisant la jonction (effet utilisé pour les diodes de redressement,...);
- Soit d'apporter une énergie supplémentaire aux porteurs dans la bande de valence (énergie thermique, énergie lumineuse,...);

Et de collecter rapidement les charges ayant traversé la bande interdite avant la recombinaison.

Remarquons que si la température augmente, les électrons remplissent progressivement tous les états d'énergies et peuvent pour une température donnée, annuler la bande interdite donc l'effet de la jonction PN. Cette remarque est importante pour les cellules photovoltaïques à jonction PN dont le rendement diminue avec l'élévation de la température [8].

I.4.2. Les Propriétés physique et électrique des Semi-conducteurs

A des températures très basses, la bande de valence des semi-conducteur est chargée totalement, leur bande de conduction est vide.

A hautes températures ou l'énergie thermique (kT) correspond à l'énergie de la bande interdite, une partie des électrons de la bande de valence a une énergie suffisamment grande

pour sauter à la bande de conduction à travers la bande interdite, dans ce cas un bon nombre des atomes ionisés ont déjà cédé leurs électrons à la bande de conduction, dans la quelle ils participent à la conduction électrique avec une charge négative .

La bande de valence, même quasiment pleine présente un nombre de niveaux inoccupés (trous) égal au nombre d'électrons dans la bande de conduction (dans le cas d'un semi-conducteur intrinsèque); ces niveaux inoccupés peuvent être occupés par un électron de valence d'un atome voisin et ainsi se déplacer dans le réseau cristallin et participer à la conduction électrique comme s'ils étaient des particules chargés positivement. Les électrons et les trous sont appelés <<porteurs >> [9].

Pour traduire la densité de population des électrons et des trous d'une part et les effets de la température (niveau d'occupation des bandes) d'autres part, on fait intervenir la notion de niveau de fermi E_F . Son positionnement dans le diagramme des bandes d'énergie va déterminer dans quelle catégorie doit être classé : métal, isolant ou semi-conducteur (Figure I.3).

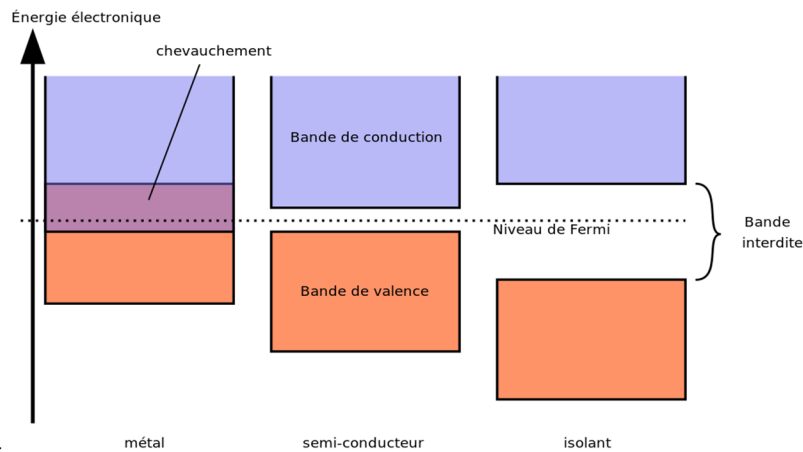


Figure I. 3: Bandes d'énergie pour un métal, un isolant et un semi-conducteur [10].

La répartition des électrons et des trous dans le matériau suit la statistique de Fermi-Dirac. En considérant cette dernière, et au voisinage de chacune des limites E_c et E_v , respectivement la bande de conduction et la de valence, il est possible d'exprimer leur concentration respective de la façon suivante :

$$n=N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{K_b T}\right) \tag{I.1}$$

$$p=N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{K_b T}\right) \tag{I.2}$$

Avec:

n, p : La concentration des électrons et des trous (cm^{-3}),

E_F : le niveau de Fermi (eV),

N_c, N_v : sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence (cm^{-3}),

K_B : la constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}J.K$),

T : la température absolue (K).

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne pouvant résulter que de l'excitation thermique des électrons de la bande de valence, les trous et les électrons existent nécessairement par paires ($n_i = p = n$) [11].

Il est possible de modifier fortement la résistance intrinsèque d'un semi-conducteur en lui incorporant une dose d'impuretés : dopage du semi-conducteur.

1.4.3. Dopage

Le silicium à l'état pur est un semi-conducteur intrinsèque, avec un niveau de Fermi (E_f) placé au milieu du "gap", entre une bande de valence pleine (BV) et une bande de conduction vide (BC). Vis à vis des propriétés de conduction, il est nécessaire de posséder des porteurs mobiles pour permettre l'établissement d'un courant électrique. Avec une BC vide, une BV totalement remplie et aucun état permis dans le gap, la seule possibilité n'est la génération thermique de paires électrons-trous à travers tout le gap du semi-conducteur. Avec un gap de 1,1eV et $T=300K$, la probabilité de générer une telle paire est extrêmement faible. De plus le gap du silicium étant indirect (déphasé dans l'espace réciproque), il n'est pas possible de générer ces paires directement avec une source de lumière : un couplage avec les phonons est nécessaire et la probabilité de cet événement est encore plus rare. Le silicium pur est donc extrêmement résistif à température ambiante [12].

- l'ajout de phosphore (cinq électrons de valence - (K)2 (L)8 (M)5) au silicium (quatre électrons de valence - (K)2 (L)8 (M)4) se traduit par un excès d'électrons dans le réseau : cette association forme alors un semi-conducteur de type N (conduction assurée par des charges négatives).

- L'ajout d'aluminium (trois électrons de valence - (K)2 (L)8 (M)3) au silicium se traduit par un défaut d'électrons formant des trous dans le réseau: il s'agit alors d'un semi-conducteur de type P (conduction assurée par des charges positives).

Le dopage est un moyen d'augmenter la conductivité électrique du corps. Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux de l'hôte ont un nombre différent d'électrons périphériques. Le dopage produit ainsi des particules électriques chargées positivement (type P) ou négativement (type N) [13-14].

a. Dopage de type n

En substituant des atomes de valence 3 (bore, aluminium, gallium, indium), des électrons manquent pour compléter les couches périphériques voisines figure I.4. Ceci entraîne la présence de charges positives excédentaires : le semi-conducteur est dopé P (ou type P).

A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés. Chacun a généré un trou qui est libre de circuler dans le réseau. Tout en restant globalement neutre, on distingue donc deux types des porteurs des charges :

- des trous libres
- des ions négatifs fixes (les atomes dopants qui gagnent un électron) [13-14].

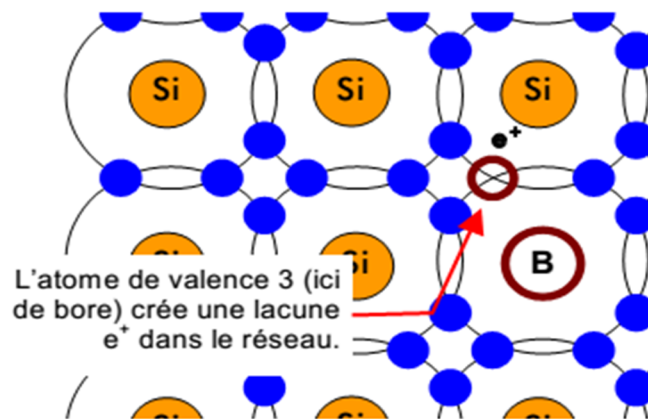


Figure I. 4: semi-conducteur de type n [14].

b. Dopage de type p

En choisissant un dopant de valence 5 (phosphore, arsenic, antimoine), le semi-conducteur contient des électrons excédentaires qui traduisent des charges négatives supplémentaires: le semi conducteur est de type N (Figure I.5).

A température ambiante, tous les atomes dopants sont ionisés, mais le matériau reste neutre. Chacun a libéré un électron qui circule dans le réseau. On distingue alors deux types de porteurs de charges :

- des électrons libres
- des ions positifs fixes (les atomes dopants qui perdent un électron).

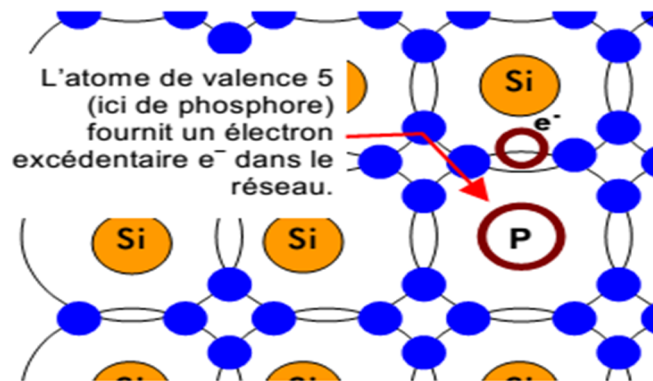


Figure I. 5: semi conducteur de type p [14].

I.4.4. Jonction PN

Une jonction PN est formée quand les semi-conducteurs de type n et de type p sont placés en contact. Dans un tel dispositif, certains des électrons de conduction excessifs dans le matériau émigrent rapidement au matériau de type p pour combler les trous de valence.

Ceci provoque un champ électrique fort et permanent à proximité de la jonction, comme il est montré ci-dessous [15]:

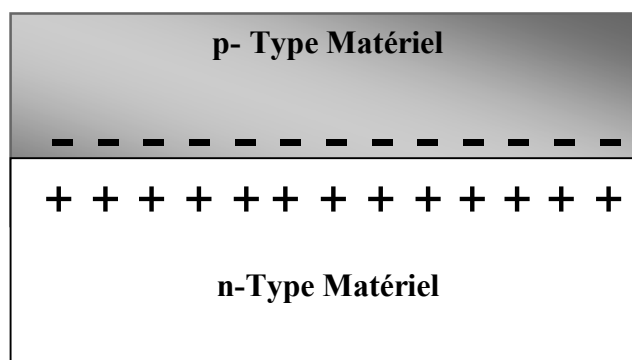


Figure I. 6: La jonction PN

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Silicium, on obtient la caractéristique statique représentée en figure I.7:

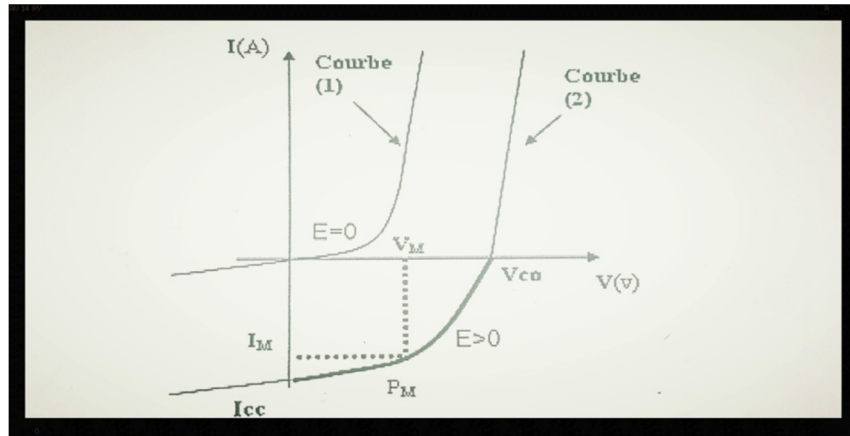


Figure I. 7: Caractéristique courant-tension I(V) d'une jonction PN [14].

Ce comportement statique peut être décrit par l'équation électrique suivante :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{A \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.3})$$

I_s : correspond au courant de saturation,

K: la constante de Boltzmann ($1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K),

T: la température effective des cellules (en Kelvin),

q: la charge le charge de l'électron,

A: le facteur de qualité de la jonction.

Sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Cependant, il varie peu avec la tension appliquée, tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Il faut noter que ces courants directs ou inverses comme pour des jonctions classiques sont sensibles à la température de jonction.

Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors il se produit l'effet photovoltaïque (PV). Ainsi, le flux lumineux crée des paires électrons-trous supplémentaires dans le matériau à la condition que leurs énergies soient supérieures ou égales à la bande interdite E_g .

La différence de potentiel ainsi créée aux bornes de la structure, caractérise l'effet photovoltaïque et se situe selon les matériaux et la structure de la jonction entre 0.3 et 0.7 V [15]. Comme nous pouvons le voir sur les caractéristiques

- Si $V < 0$, la jonction se comporte en photorécepteur.
- Si $V > 0$, la jonction fonctionne comme un générateur avec un courant de court-circuit I_{cc} proportionnel à l'éclairement.

- Si la cellule PV est connectée à une charge, l'électron de la bande de conduction sera repoussé par le photon incident du côté de type p de la cellule PV. Sa circulation à travers le circuit, produit un courant dans la charge comme montre la figure I.8 [16].

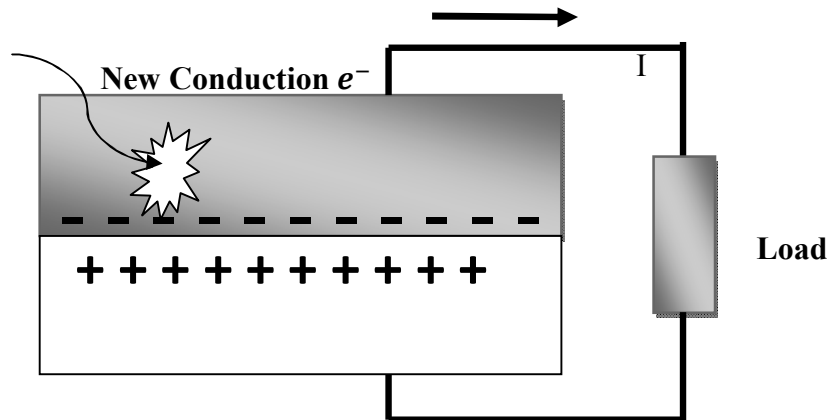


Figure I. 8: L'effet photovoltaïque: la lumière incidente déplace un électron de la bande de valence vers la bande de conduction.

I.5. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.5.1. Définition

Les cellules solaires photovoltaïques sont des dispositifs de conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique [17].



Figure I. 9: Cellule solaire photovoltaïque [17].

I.5.2. Structure d'une cellule photovoltaïque

La cellule est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. Parmi les cellules photovoltaïques utilisant le silicium comme matériel de base on distingue les monocristallins, les polycristallins et amorphes. Ainsi la cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée et est celle qui a les meilleures performances, tandis que la cellule en silicium polycristallin est moins coûteuse que celle du silicium monocristallin et son efficacité est plus faible et les processus de sa préparation est

moins stricte, enfin la structure de la cellule photovoltaïque amorphe présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes.

Généralement, la couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé N. Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à une couche de silicium pur, d'où l'appellation de dopage N (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative.

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé P. Cette couche possèdera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à une couche de silicium pur, les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous positifs (P).

Il faut ajouter des contacts électriques transparents, une couche antireflet pour assurer une bonne absorption des photons, ainsi qu'une couche de verre pour résister aux intempéries [18].

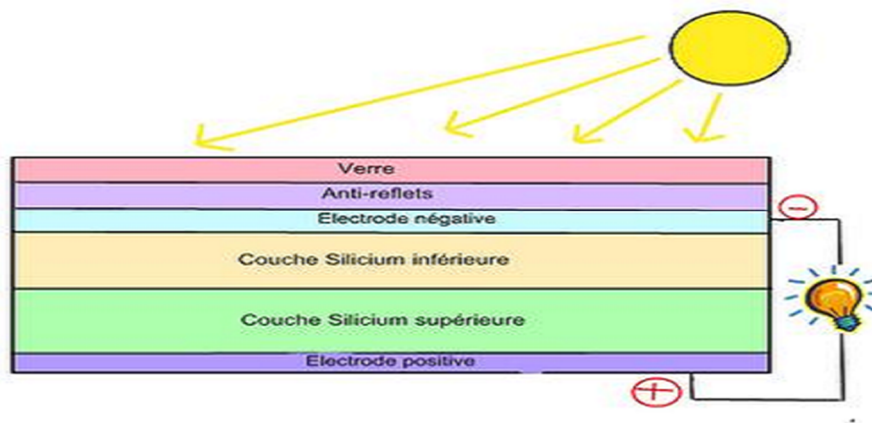


Figure I. 10: Structure équivalente d'une cellule photovoltaïque [18].

I.5.3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi conducteur;
- collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt

des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.11.

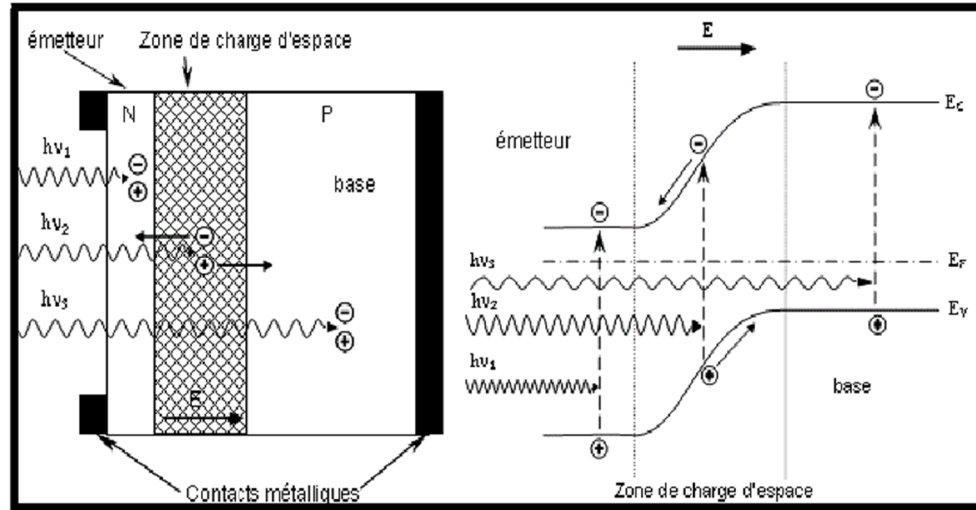


Figure I. 11: Structure (gauche) & diagramme de bande (droite) d'une cellule photovoltaïque [19].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- 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. On aura une photo courant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, le pair électron/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura une photo courant de génération [19].

I.6. Paramètre photovoltaïque

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

La figure (I.12) représente une caractéristique courant-tension I(V) sous obscurité et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïques à jonction PN.

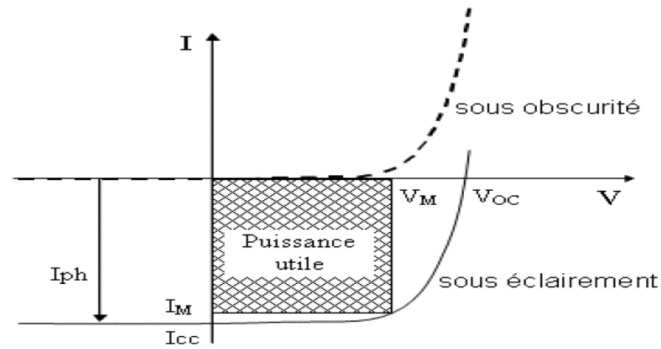


Figure I. 12: Caractéristique courant-tension et paramètres physique d'une cellule photovoltaïque [19].

Le tracé de cette courbe permet d'accéder à un bon nombre de paramètres physique du composant. Les premiers propres d'une cellule solaire sont les suivants.

- le courant du court-circuit I_{cc}
- la tension du circuit-ouvert V_{co}
- le facteur de forme FF
- le rendement η

a. Le courant du court-circuit I_{cc}

Il s'agit de courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Celui ci est en fonction de la température de la longueur d'onde de rayonnement de la surface de la cellule, de la mobilité des porteurs. Ce courant est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue.

b. La tension du circuit-ouvert V_{co}

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

c. Le facteur de forme FF

Le facteur de forme est un paramètre qui caractérise la qualité de la cellule; il est définit le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite $P_{max}=I_{max} \cdot V_{max}$ de la photopile sous les conditions de mesures standardisés, et le produit $I_{cc} \times V_{co}$.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \tag{I.4}$$

d. Rendement de la cellule

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{in}} \quad (1.5)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre important pour comparer les performances des cellules solaires [20].

I.7. Types des cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), chaque type de ces cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Ce tableau récapitule quelques types des cellules photovoltaïques :

Types de cellules	Rendement des cellules PV		
	Théorique	En laboratoire	Disponibles
Silicium monocristalline (m-Si)	27.0 %	24.7 %	14.0-16.0 %
Silicium poly cristallin (p-Si)	27.0 %	19.8 %	12.0-14.0 %
Silicium amorphe (a-Si)	25.0%	13.0 %	6.0-8.0 %
GaAs	29.0 %	27.5 %	18.0-20.0 %
CIGS	27.5 %	18.2 %	10.0-12.0 %
CdTe	28.5 %	16.0 %	8.0 %
Si ruban (silicium en ruban)	27.0 %	27.0 %	9.0-11.0 %

Tableau I. 1: Rendement énergétiques des différents types des cellules photovoltaïques [21].

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [22] :

- a. **Les cellules monocristallines:** Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12- 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), mais aussi celle qui ont le coup le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

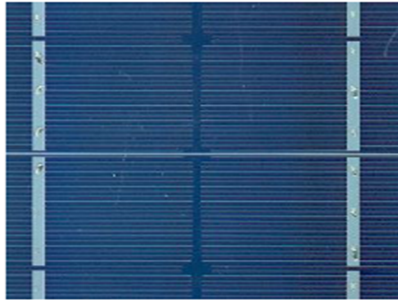


Figure I. 13: Cellules monocristallines [23].

- b. **Les cellules polycristallines:** Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible: 11% - 13% (18% en laboratoire) [24].

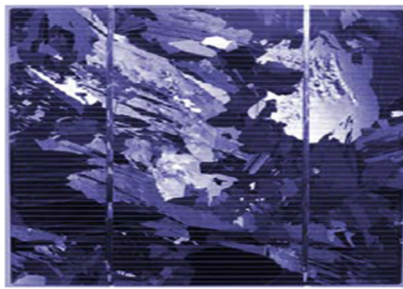


Figure I. 14: Cellules polycristallines [23].

- c. **Les cellules amorphes:** Elles ont un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres [24].



Figure I. 15: Cellules amorphe. [23].

Ainsi notre recherche de la performance maximale, nous a amenés à nous procurer des

cellules monocristallines, qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation.

I.8. Panneau solaire

Un panneau solaire photovoltaïque (ou module solaire photovoltaïque) est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques [23].



Figure I. 16: Panneaux photovoltaïques [23].

I.9. Module photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [24].

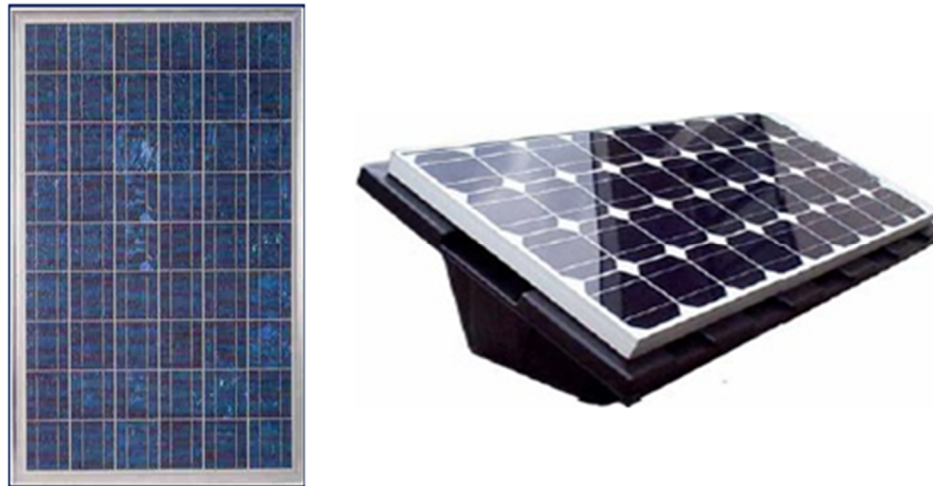


Figure I. 17: Module photovoltaïque [24].

I.10. Association des cellules solaires photovoltaïques

I.10.1. Association en série

Dans un montage en série, le même courant traverse toutes les cellules, la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné [25]. La Figure I.18 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

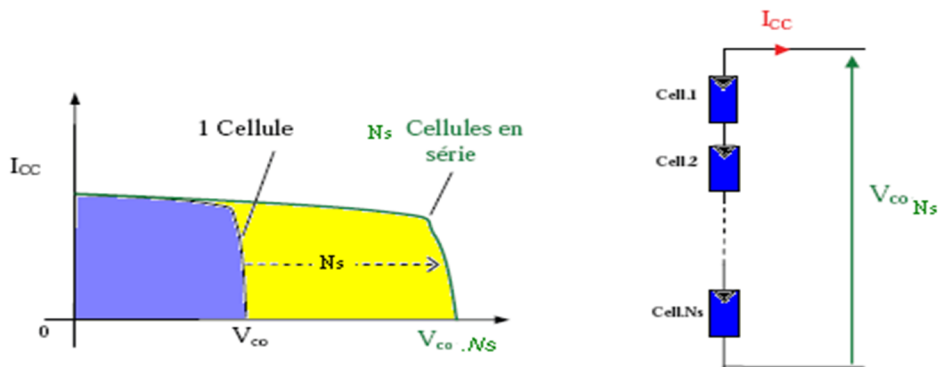


Figure I. 18: Caractéristique résultante d'un montage en série [5].

I.10.2. Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [25].

La Figure I.19 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

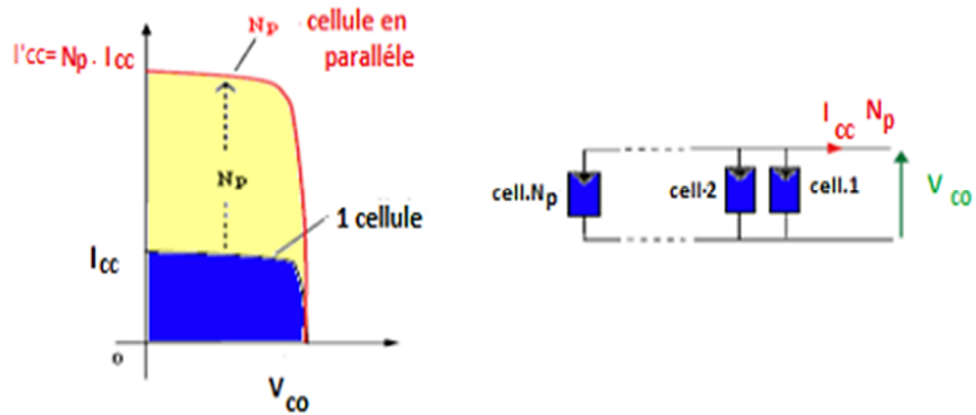


Figure I. 19: Caractéristique résultante d'un montage en parallèle [5].

I.10.3. Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations [25]:

$$I_{cc(\text{total})} = n_p \times I_{cc} \quad (\text{I.6})$$

$$V_{co(\text{total})} = n_s \times V_{co} \quad (\text{I.7})$$

n_p : nombre des cellules en parallèle ;

n_s : nombre des cellules en série.

La Figure I.20 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

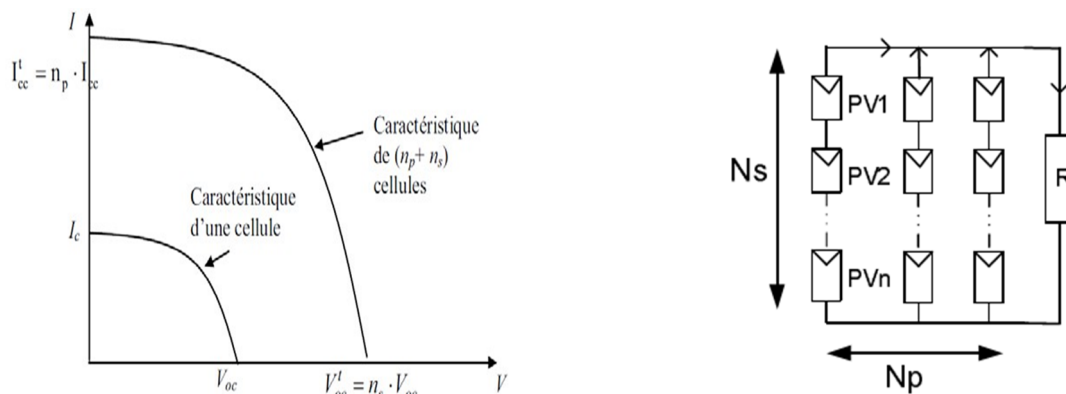


Figure I. 20: Caractéristique résultante d'un montage hybride de (n_p et n_s) cellules [26].

Les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} sont plus ou moins

importantes, à savoir l'association des cellules (série ou/et parallèle).

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule [25].

I.11. Avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.11.1. Avantages

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:

- La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dus à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au mégawatt.
- Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

I.11.2. Inconvénients

- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable,
- Le coût très élevé à cause de la haute technologie utilisé dans la fabrication,
- Faible rendement de conversion,
- Le coût de l'installation augmente, s'il faut stocker l'énergie avec des batteries,
- Pollution à la fabrication.

Malgré ces inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des

applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout en ce qui concerne les coûts de fabrication [27].

I.12. Domaines d'application

Marquée par une grande variété permise par les caractéristiques intrinsèques de la technologie photovoltaïque, la longue liste des applications du photovoltaïque peut être divisée en deux grandes catégories :

- a. Les applications autonomes :** c'est-à-dire non-raccordées à un réseau électrique, elles comportent quatre domaines distincts :
- les satellites artificiels pour lesquels le photovoltaïque constitue la seule source d'énergie qui réponde à toutes les contraintes.
 - les appareils portables, aujourd'hui calculettes et montres, demain téléphones et micro-ordinateurs.
 - les applications «professionnelles», relais de télécommunications, balises maritimes ou aéroportuaires, signalisation routière, bornes de secours autoroutières, horodateurs de stationnement.).
 - l'électrification rurale des sites isolés, habitat dispersé, refuges, dispensaires et écoles dans les pays en voie de développement.



Figure I. 21: Système d'information des bus-Lyon [28].

- b. Les applications raccordées :** c'est-à-dire raccordés au réseau public de distribution d'électricité que l'on peut subdiviser en trois grands domaines :
- les systèmes attachés à un bâtiment consommateur d'électricité, qu'il soit à usage résidentiel (maisons individuelles, habitat collectif social ou privé) ou professionnel (bureaux, commerces, équipements publics, industrie, agriculture). Les modules peuvent

être « sur-imposés » à la toiture (toit en pente ou toiture-terrasse) sans assurer le clos ni le couvert ou bien « intégrés au bâti » dans une logique de double fonction (clos et couvert, bardage, verrière ,garde-corps). Leur surface active vade quelques dizaines à quelques milliers de mètres carrés, soit des puissances de quelques kilowatts-crêtes à quelques mégawatts-crêtes.

- les systèmes posés sur ou intégrés à des structures non-consommatrices d'électricité par elles-mêmes mais pour lesquelles les panneaux remplissent une
- fonction bien identifiée en sus de la production d'électricité (ombrière de parking, couverture de passage public ou de quai de gare, mur antibruit).



Figure I. 22: Ombrières photovoltaïques à St Aunés (Hérault) [28].

Les parcs photovoltaïques aux sols, constitués de quantités importantes de modules posés sur des structures porteuses, dont la production est exclusivement destinée à l'alimentation directe du réseau électrique. Leur surface active va de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (puissance de quelques centaines de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts) [28].

I.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales des semi conducteurs, la structure des bandes d'énergie et le principe de la cellule photovoltaïque. L'étude s'est axée sur les paramètres photovoltaïques suivis d'une présentation des différents types de cellules photovoltaïques ainsi que leurs avantages et inconvénients. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des circuits équivalents et les modèles mathématiques .

Chapitre II

Circuits équivalents & modèles mathématiques

Chapitre II :Circuits équivalents et modèles mathématiques

II.1.Introduction

Dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque, la modélisation fine du fonctionnement électrique des modules photovoltaïques (PV) est indispensable. Ceci permettra d'une part de qualifier le processus technologique de réalisation des cellules PV, et d'autre part, d'analyser le fonctionnement optimal, ainsi que le vieillissement des modules photovoltaïques. Pour trouver le modèle d'une cellule photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. Dans ce chapitre, nous présenterons quelques modèles existants dans la littérature avec leurs circuits électriques équivalents afin de sélectionner un modèle pour notre étude. Le critère de choix du modèle est bien la simplicité des équations mathématiques pour nous faciliter le calcul des paramètres par simulation en utilisant « Matlab /Simulink ».

II.2. Modélisation des cellules photovoltaïque

La modélisation des modules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents, en prenant plus ou moins de détails. De nombreux modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. Dans ce qui suit nous présentons quelques modèles mathématiques existant dans la littérature, ils se divisent en deux grandes familles:

- Modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Tous les deux sont basés sur l'équation de diode bien connue de Shockley.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques dans la littérature ont été développés, dont le but est l'obtention d'une caractéristique $I(V)$ la plus performante possible, parmi ces modèles nous pouvons citer les suivants [29] :

- Modèle à sept paramètres (2M7P)
- Modèle à six paramètres (2M6P)
- Modèle à cinq paramètres (L5P)
- Modèle à quatre paramètres (L4P)
- Modèle à trois paramètres (L3P)

Pour chaque modèle, nous pouvons déterminer les paramètres suivants :

- I_{ph} = le courant photonique
- $I_{s(ref)}$ = courant de saturation inverse
- n = facteur d'idéalité
- R_s = la résistance séries
- R_{sh} = la résistance shunt

II.2.1 Modèle à deux diodes

Ce modèle est composé essentiellement de deux diodes, elles symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma électrique équivalent de ce circuit est la suivante [26].

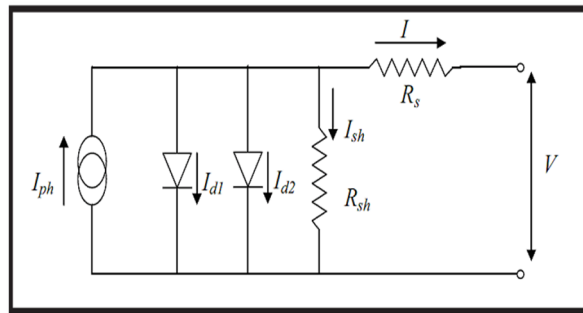


Figure II. 1: Schéma équivalent d'une cellule PV. Modèle à deux diodes.

II.2.1.1 Modèle à sept paramètres (2M7P)

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped, 2Mechanism model with 7 Parameters). Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.2). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire [30].

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact métal/semi-conducteur. Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour une tension V égale à V_{co} . Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contact métal/semi-conducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage trop élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit R_{sh} traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur devra être la plus élevée possible [30].

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives.

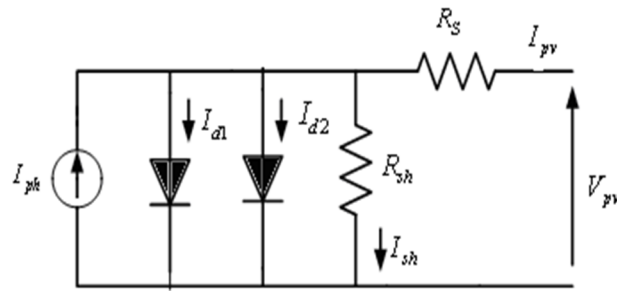


Figure II. 2: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M7P

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [26]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II.1})$$

Avec:

I_{ph} : courant photonique

I_{d1} : courant de diode 1

I_{d2} : courant de diode 2

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [31]:

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Avec:

$V_t = \frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel thermodynamique..

T_c : est la température absolue.

q : la constante de charge d'électron: $1.602.10^{-19}c$.

K : La constante de Boltzmann: $1.38.10^{-23} J/K$.

I_{sh} : est le courant de la résistance de shunt.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [32].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t \cdot n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t \cdot n_2}\right) - 1 \right) \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.5})$$

Le courant photonique lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence est donné par [32]:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph(ref)} - \mu_{cc} (T_c - T_{c(ref)}) \right) \quad (\text{II.6})$$

Avec

$I_{ph(ref)}$: le courant photonique sous condition de référence [A].

μ_{cc} : Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K].

G, G_{ref} : l'éclairement réels et à la condition de référence [W/m^2].

$T_c, T_{c(ref)}$: la température de cellule, réelle et à la condition de référence.

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes [30,33]:

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot K}\right) \quad (\text{II.7})$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp\left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot K}\right) \quad (\text{II.8})$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre 150 -180 $A.K^3$ et $1,3 -1,7 \times 10^{-2} A.K^{-5/2}$ pour une cellule de 100 cm^2 .

Une valeur du facteur d'idéalité n différent de l'unité est associée à un mécanisme de recombinaison prédominant et elle dépend de la nature et de la position des niveaux pièges.

- $n=1$: la zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).
- $1 < n < 2$: le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et n dépend de la polarisation [34].
- $n=2$: les centres de recombinaison sont distribués uniformément dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.
- $2 < n < 4$: les centres de recombinaison sont distribués de façon non uniforme avec une

densité réduite au centre de la zone de charge d'espace par rapport à la surface. E_{gap} : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS = 1,03 eV, CdTe = 1,5 eV).

II.2.1.2 Modèle à six paramètres (2M6P)

Si la résistance shunt est considérée infinie ($R_{sh} = \infty$), le nombre de paramètres à déterminer devient six et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (Lumped, 2 Mechanism model with 6 Parameters) [33]. Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances donc le courant qui la traverse est négligeable. Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (II.7)) et I_{s2} (équation (II.8)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} (équation (II.6) qui dépend de l'éclairement solaire et de la résistance série R_s .

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique, figure(II.3).

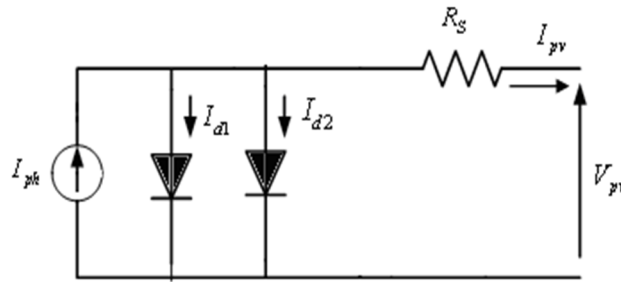


Figure II. 3: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M6P.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [26] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (II.9)$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{V_t n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{V_t n_2}\right) - 1 \right) \quad (II.10)$$

II.2.1.3 Modèle à cinq paramètres (2M5P)

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle à six paramètres représenté sur la figure (II.4) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped, 2 Mechanism model with 5 Parameters) [31]. Cette simplification se traduit par supposer que la résistance shunt est infinie, et la résistance série est nulle.

Le circuit équivalent sera représenté comme suit, figure (II.4).

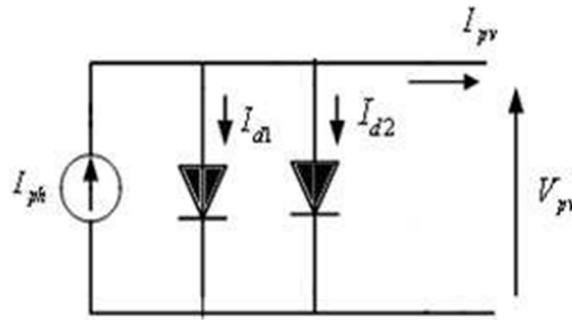


Figure II. 4: Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles, 2M5P.

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation (II.7)) et I_{s2} (équation (II.8)), les facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} (équation (II.6)) qui dépend de l'éclairement solaire et de la température.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \quad (\text{II.11})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [31]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t n_1}\right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t n_2}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.12})$$

II.2.2. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle standard à une diode. Il est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. Ce modèle comporte une seule diode.

Remarque : généralement la résistance parallèle R_p est très élevée, dans le cas contraire, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairement. La caractéristique courant-tension décrivant le fonctionnement du circuit ci-dessus [26].

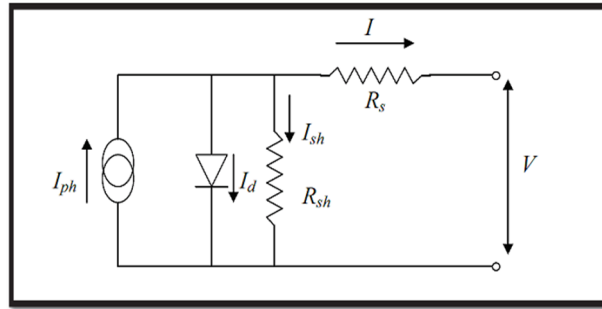


Figure II. 5: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode.

II.2.2.1. Modèle à trois paramètres (L3P)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} , (équation (II.6)) proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lumped, 1 Mechanism model with 3 Parameters) [34-35]. Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (II.6) :

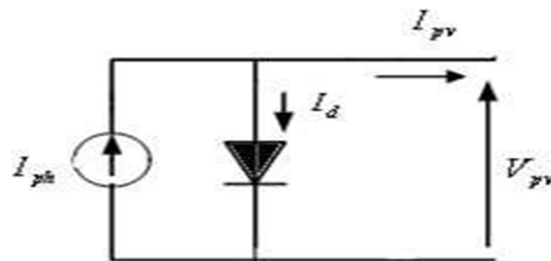


Figure II. 6: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L3P.

Dans le cas de cellules solaires au silicium monocristallin, on considère l'hypothèse d'une cellule idéale. Le facteur d'idéalité est alors considéré comme égal à l'unité.

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.13})$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [30-31] :

$$I_{pv} = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.14})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.15})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression [31]:

$$I_s = I_{s(ref)} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c(ref)}} \right)^3 \exp\left(\frac{qE_{gap}}{n \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c(ref)}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \quad (\text{II.16})$$

II.2.2.2. Modèle à quatre paramètres (L4P)

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé; il a été étudié par Townsend [31]. Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_s .

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont le courant photonique I_{ph} (équation (II.6)), la résistance série R_s , et deux caractéristiques de la diode I_s (équation (II.11)), et n . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants) [32].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté sur la figure(II.7):

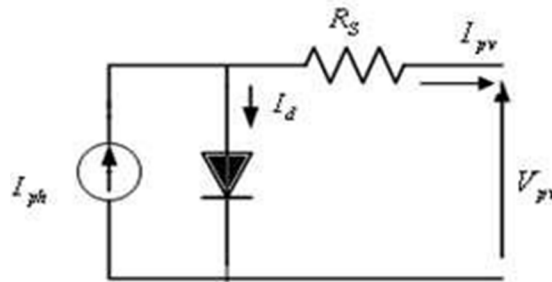


Figure II. 7: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L4P.

Le courant électrique produit par la cellule est donné par l'expression suivante [33]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.17})$$

II.2.2.3. Modèle à cinq paramètres (L5P)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la figure (II.8) qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par

deux résistances, une résistance shunt, une résistance série. Le modèle fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: n , I_{ph} (équation (II.6)), R_s , R_{sh} et I_s (équation (II.11)). Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters) [31,33].

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff

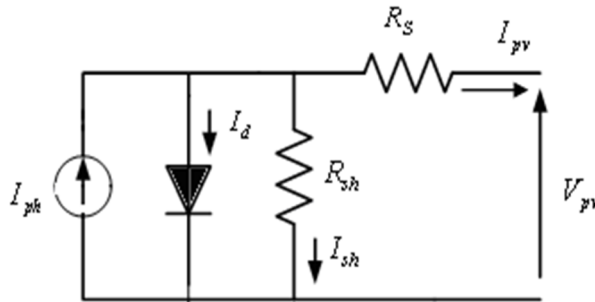
$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II.18})$$


Figure II. 8: Schéma équivalent du modèle à une exponentielle, L5P.

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante [33]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{V_t \cdot n}\right) \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_{sh}}\right) \quad (\text{II.19})$$

II.3. Sélection du modèle

II.3.1. Présentation du modèle choisi

Les modèles présentés dans le paragraphe précédent sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres mis en jeu.

Dans le contexte de ce mémoire, nous avons étudié un module SOLKAR 36W, présenté sur la figure II.9. Ce modèle comporte 36 cellules solaires de silicium polycristallin connectées en série.



Figure II. 9: Module SOLKAR 36W.

Le tableau II-1 donne les caractéristiques du module SOLKAR 36W sous les conditions standards (1000 W/m², masse optique: AM 1.5, Température de cellule: 25 °C).

Grandeur	Valeur
Température des conditions standards ou de références (T_{ref})	25°
Eclairement des conditions standards ou de références (G_{ref})	1000W/m ²
Puissance crête maximale (P_m)	37.08 W
Tension de crête maximale (V_{mp})	16.49V
Courant de crête maximale (I_{mp})	2.25A
Courant de court-circuit (I_{cc})	2.5A
Tension de court-circuit (V_{co})	21.1V
Nombre de cellules en série (N_s)	36
Nombre de cellules en parallèle (N_p)	1
Coefficient de la température du courant de court-circuit	0.0017A/°C

Tableau II. 1: Caractéristiques du module SOLKAR 36W [31].

Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque seront décrites comme suit [34] :

- Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule :

$$I_{cc(\text{cellule})} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{II.20})$$

- La tension du circuit ouvert (V_{co}) de chaque cellule est:

$$V_{co(cellule)} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{II.21})$$

- Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(cellule)} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{II.22})$$

- La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(cellule)} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{II.23})$$

- La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{\max(cellule)} = I_{mp(cellule)} \cdot V_{mp(cellule)} \quad (\text{II.24})$$

- La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{II.25})$$

- La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{II.26})$$

La figure II.10 représente le schéma équivalent du modèle à seule diode.

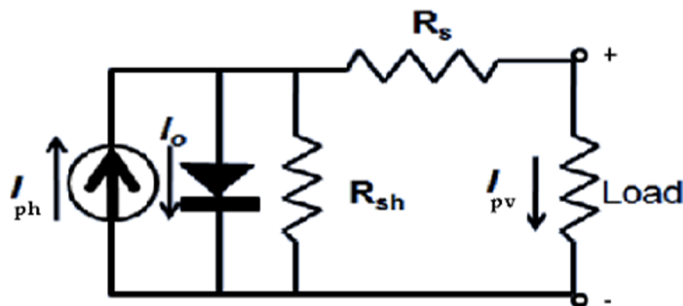


Figure II. 10: Schéma équivalent du modèle à une seule diode.

I_{ph} : représente le photocourant de la cellule solaire,

R_{sh} et R_s : sont les résistances série et shunt la de la cellule solaire respectivement.

Généralement, la valeur R_s est très faible et celle de R_{sh} est très grande, d'où elle peut être négligé pour simplifier l'analyse. La précision de ce modèle plus que le modèle à diode unique, mais à cause de la difficulté de résoudre l'équation, le modèle de diode unique est préféré.

Les cellules PV sont regroupés dans des unités plus grandes, appelées modules PV qui sont encore regroupés dans une configuration parallèle-série pour former des panneaux photovoltaïques, ces dernier peuvent être modélisé mathématiquement comme donnée dans les équations suivantes:

Le photo-courant est proportionne là l'éclairement et dépend aussi de la température, son expression est donné par [31]:

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i(T - 298)] \frac{G}{1000} \quad (\text{II.27})$$

Le courant de saturation inverse est donné par relation suivante :

$$I_{s(ref)} = I_{cc} / [\exp(q V_{co} / N_s k n T) - 1] \quad (\text{II.28})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression:

$$I_s = I_{s(ref)} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c(ref)}} \right)^3 \exp\left(\frac{q E_{gap}}{n \cdot k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c(ref)}} \right) - \left(\frac{1}{T_c} \right) \quad (\text{II.29})$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = N_s \times I_{ph} - N_s \times I_s \left(\exp\left(\frac{q \times (V_{pv} R_s)}{R_s \cdot n K T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.30})$$

II.3.2. Paramètre associés au modèle

➤ Le courant du court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle .Dans le cas idéal ($R_s=0$ et $R_{sh}=\infty$), ce courant se confond avec la photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation(II.31), on obtient :

Quand la condition $V=0$ est vérifiée la densité de courant $I=I_{cc}$ [36].

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(q \frac{V + I R_s}{K T_c}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.31})$$

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(q \frac{I_{cc} R_s}{K T_c \cdot n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.32})$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_s = \left[\left(\exp\left(q \frac{I_{cc} R_s}{K T_c \cdot n}\right) - 1 \right) \right]$ devant I_{ph} l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (\text{II.33})$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du grandeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

➤ **La tension du circuit-ouvert V_{co}**

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

Quand la condition $I=0$ est vérifié la tension $V= V_{co}$.

$$I_{ph} = I_s \left[\left(\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{kT_c \cdot n}\right) - 1 \right) \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (\text{II.34})$$

D'où

$$I_{ph} = I_s \left[\left(\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{kT_c \cdot n}\right) - 1 \right) \right] \quad (\text{II.35})$$

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

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \text{Log}\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (\text{II.36})$$

➤ **Le facteur de forme FF**

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{II.37})$$

➤ **Rendement de la cellule**

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{E \cdot S} \quad (\text{II.38})$$

S: Surface du module solaire.

E: Flux incident.

(I_m, V_m) : Cordonnées du point de fonctionnement.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail quelques modèles mathématiques des cellules PV avec leurs circuits équivalents : modèle à une seule diode et modèle à deux diodes. En second lieu, nous avons choisi un modèle d'une seule diode à cinq paramètres dans le but de le simuler avec le logiciel Matlab/sumilink pour bien comprendre son fonctionnement et optimiser les paramètres de la cellule PV.

Chapitre III

Simulation

Résultats & Discussions

Chapitre III: Simulation, résultats et discussions

III.1. Introduction

L'étude du système photovoltaïque (PV) d'une manière efficace nécessite une connaissance précise des courbes caractéristiques I-V et P-V des modules. Dans ce chapitre, nous présentons la simulation du module PV. Le modèle a été sélectionné sur la base du modèle mathématique du module PV qui est basé sur celui d'une cellule solaire PV élémentaire. Un module PV particulier a été choisi pour l'analyse du modèle développé. Ce chapitre sera consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus en utilisant l'environnement "*Matlab/Sumilink*" et en appliquant les relations cités dans le chapitre précédent. Ce dernier a retenu notre intérêt à cause de la maturité et la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants, notamment la "*Simspace toolbox*".

III.2.L'environnement MATLAB/Simulink

MATLAB/Simulink sont des produit des math Works Inc; ils sont utilisés pour le développement des technique de calcul et de la conception basée sur les modèles MATLAB est destiné essentiellement à réalise des calculs mathématiques, la visualisation, l'analyse des résultats et l'édition de nouveaux programmes utilisateurs. Simulink est l'extension graphique de MATLAB qui sert à la modélisation et la simulation des systèmes dynamique.

Cet environnement graphique est une plate forme de simulation multi domaines basés sur les flots de signaux d'entrée et de sortie .Il contient de bibliothèques qui peuvent être adaptées et/ou enrichies aux besoins du concepteur.

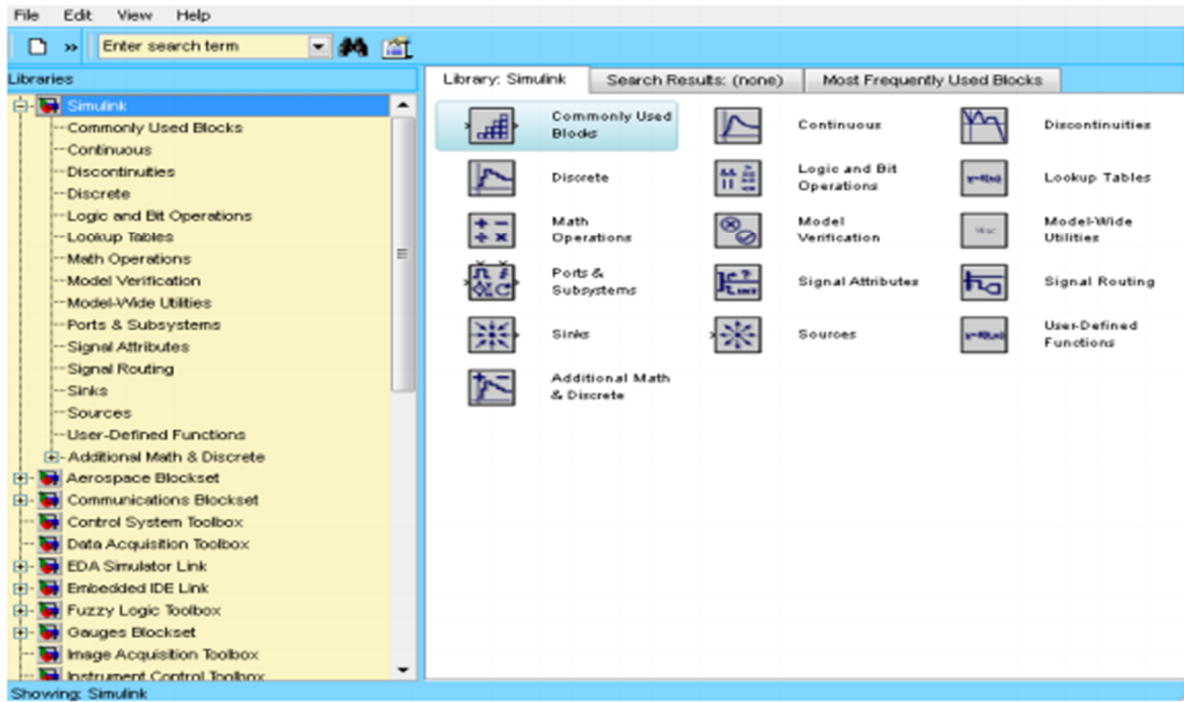


Figure III. 1: Bibliothèque Simulink.

III.3.Création du modèle de la cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink

Cette étape est assurée en premier lieu par la création de la « boîte noire », pour ce faire il faut suivre les étapes suivantes :

- ❖ Lancer Matlab et créer votre répertoire de travail (current folder).

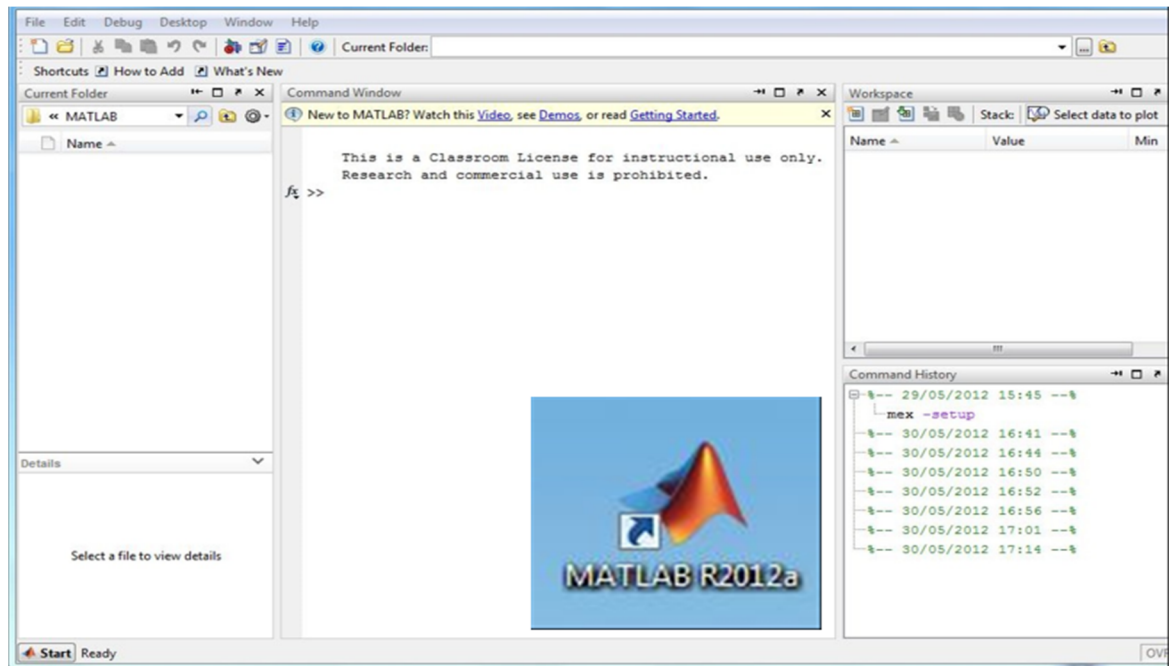


Figure III. 2: Current Folder.

❖ Lancer Simulink

Aller dans file et new model, une fenêtre doit apparaitre et elle va nous permettre notre modèle de cellule photovoltaïque.

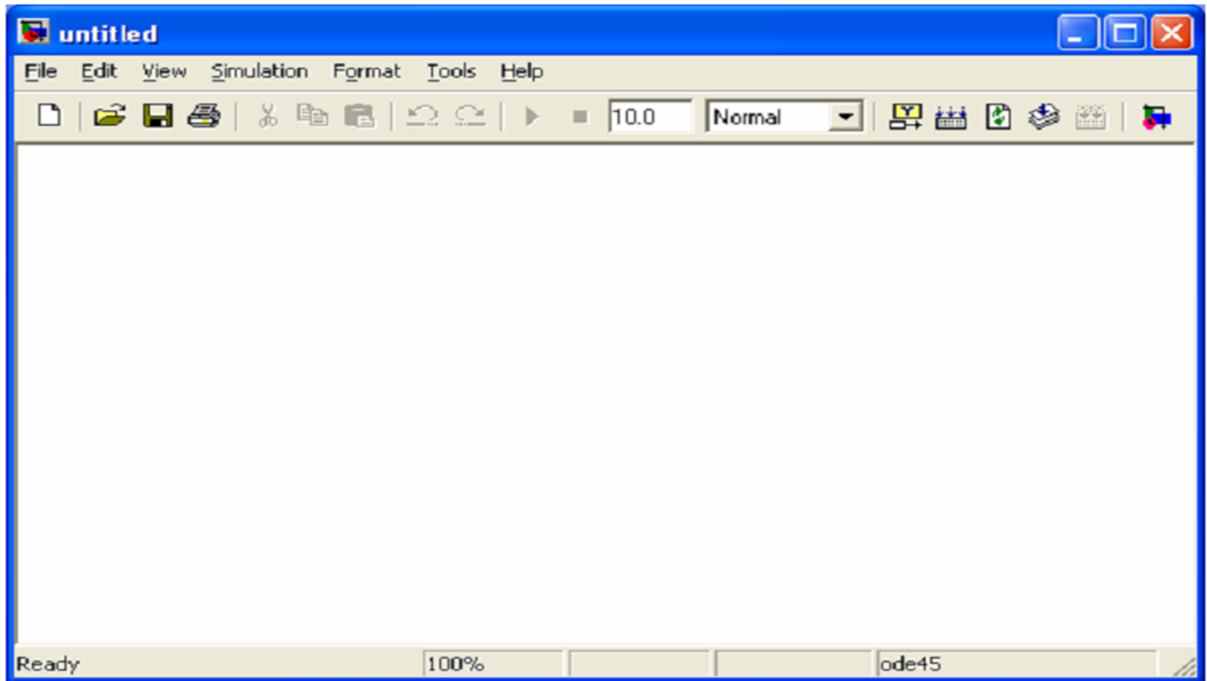


Figure III. 3: File new modèle.

Pour concevoir notre modèle dans le Simulink, nous suivons les étapes illustrés sur les figures ci-dessous

Etape 1:

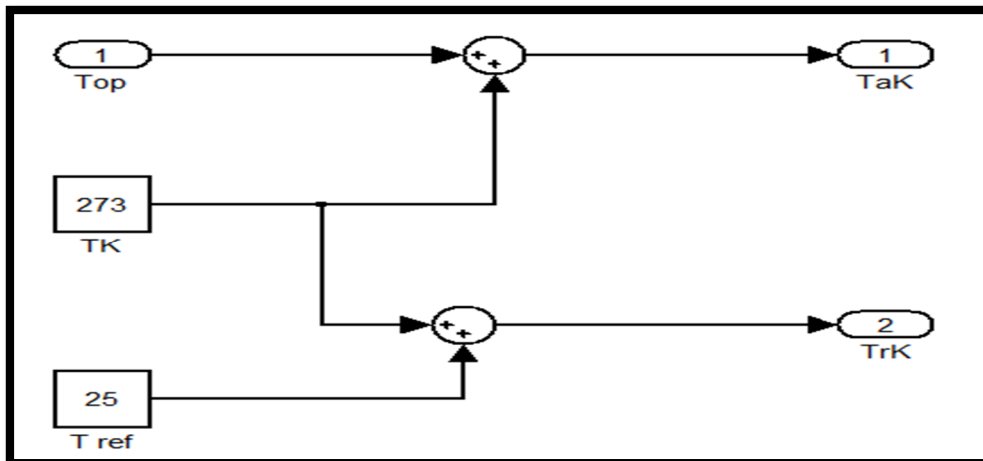


Figure III. 4: Circuit sous-système 1.

Etape 2:

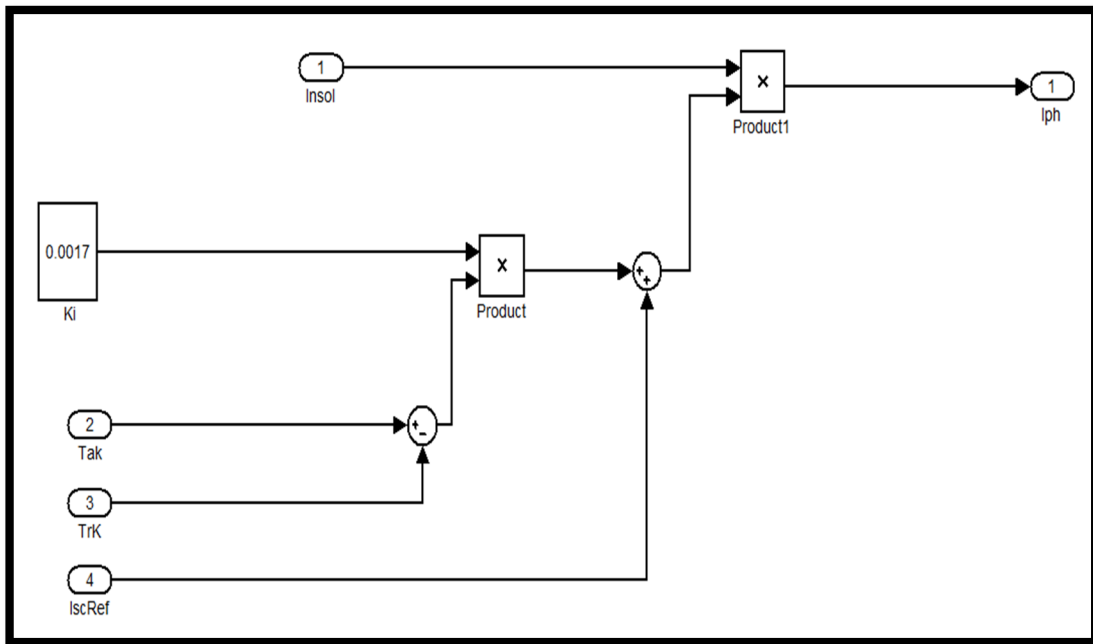


Figure III. 5: Circuit sous-système 2.

Etape 3:

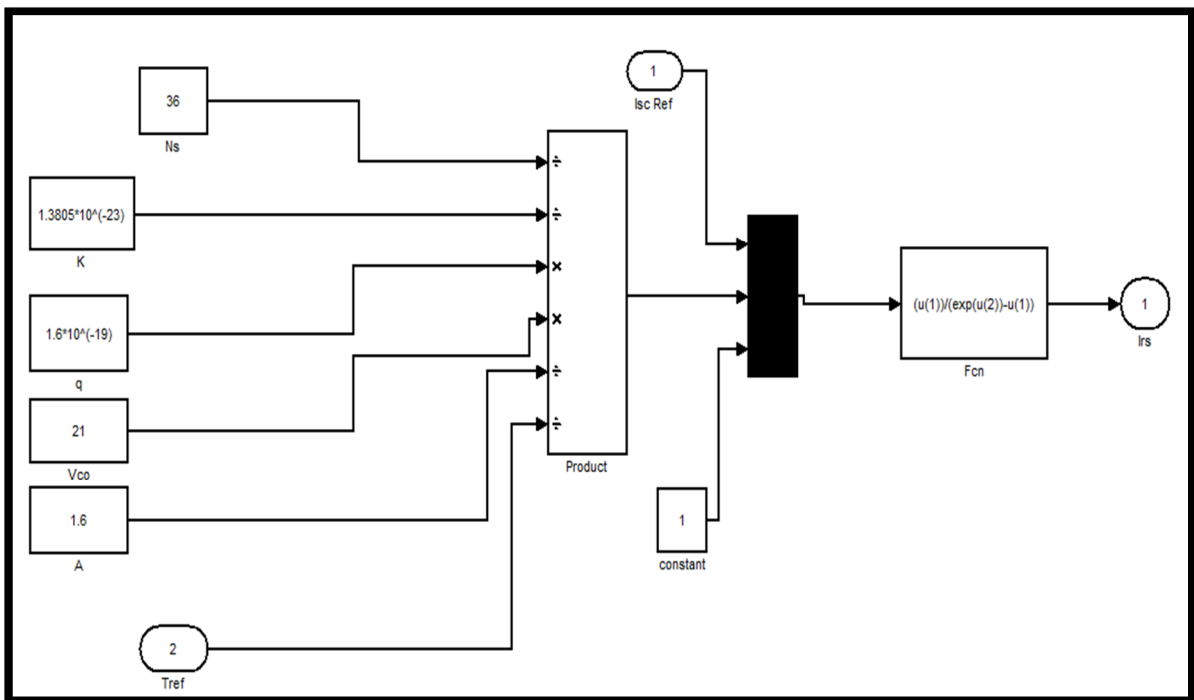


Figure III. 6: Circuit sous-système 3.

Etape 4:

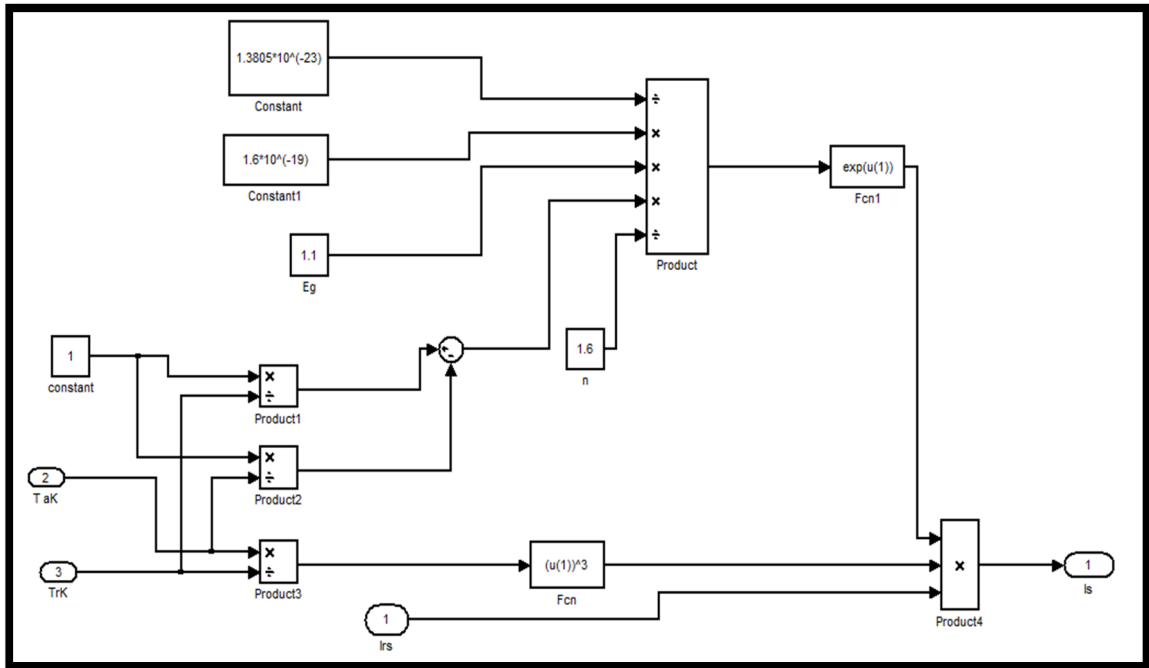


Figure III. 7: Circuit sous-système 4.

Etape 5:

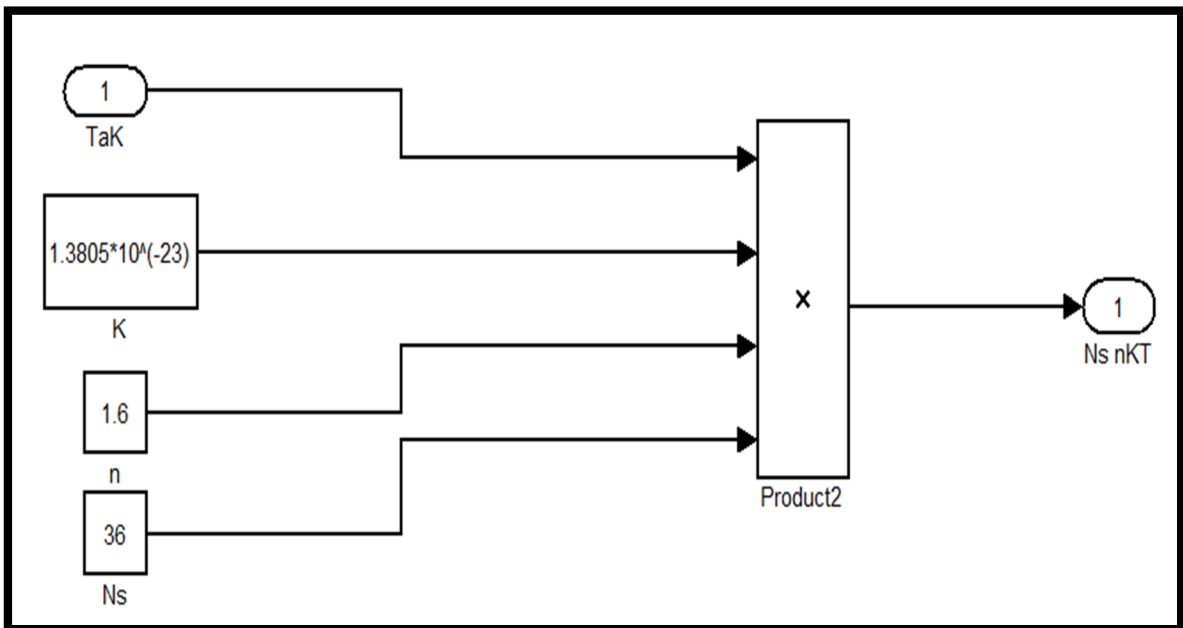


Figure III. 8: Circuit sous-système 5.

Etape 6:

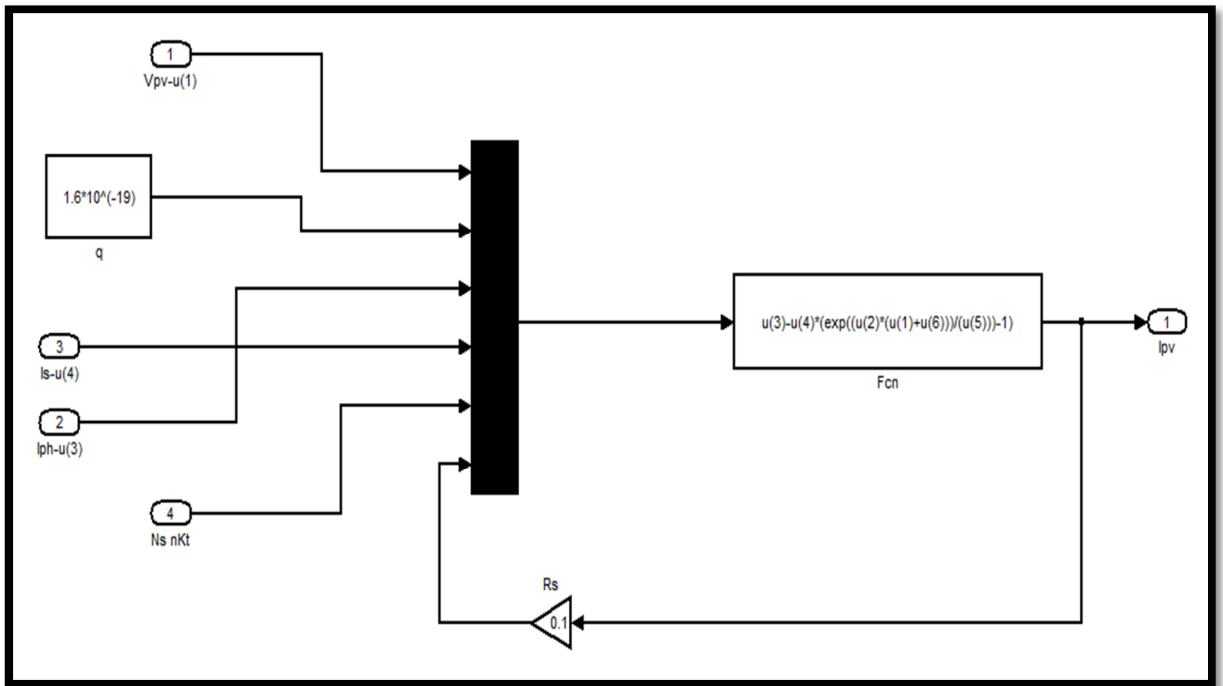


Figure III. 9: Circuit sous-système 6.

Etape 7:

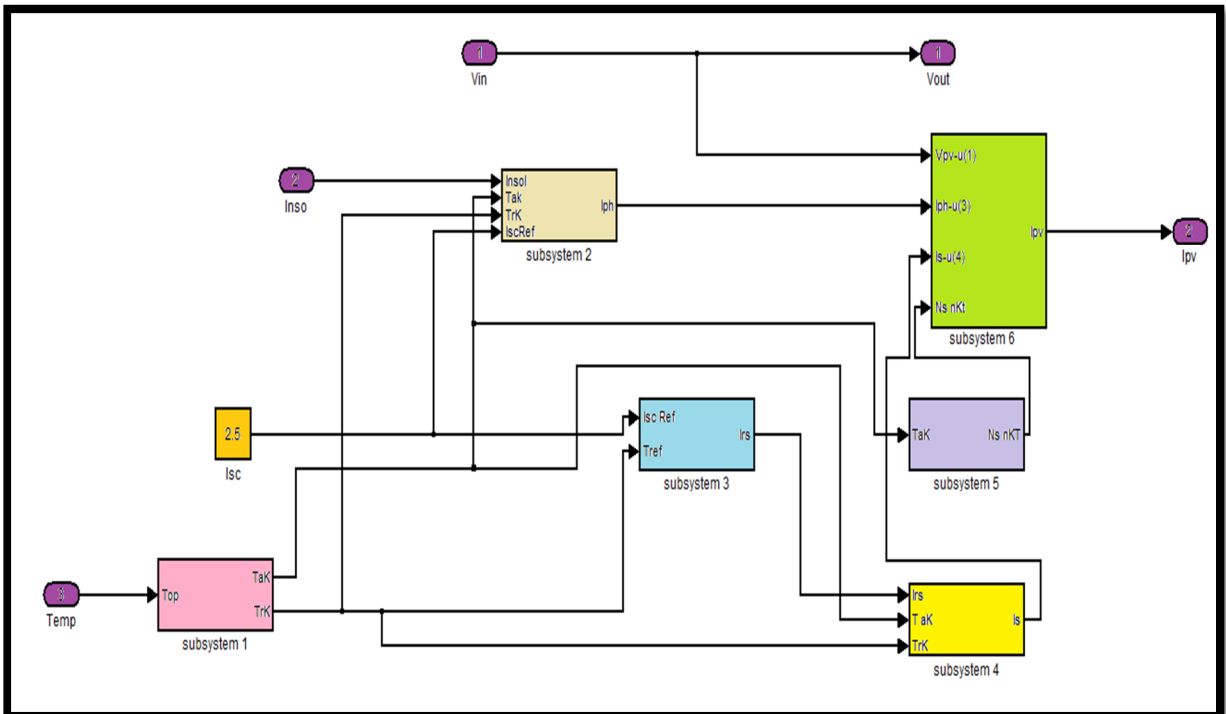


Figure III. 10: interconnexion de tous les six sous-systèmes.

Le modèle final est représenté sur la figure III.11:

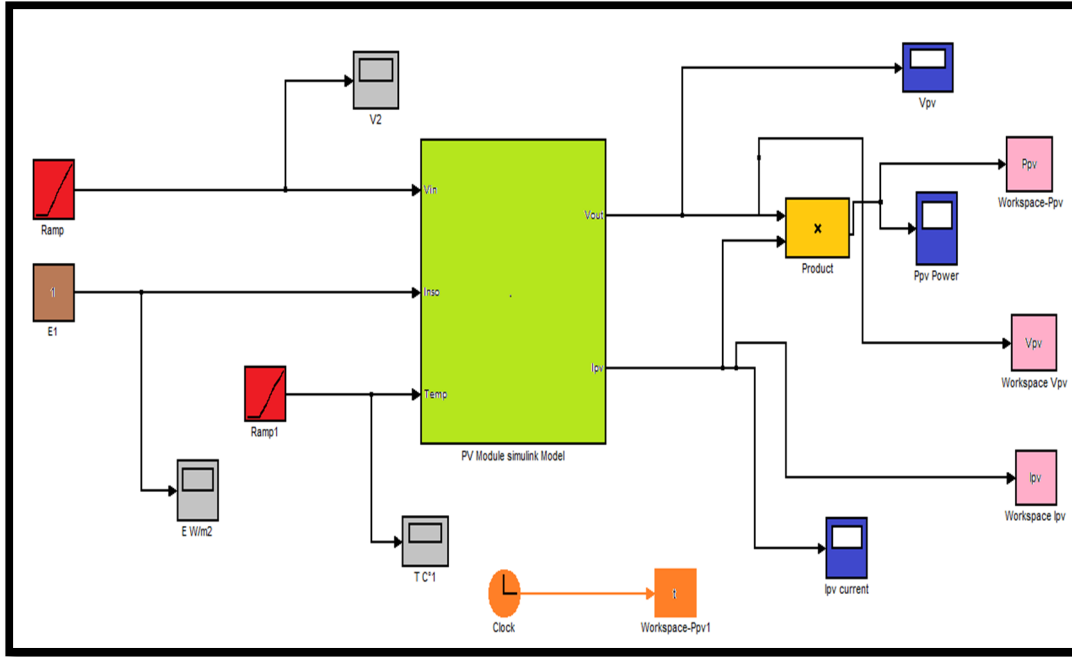


Figure III. 11:Modèle d'une cellule PV sous Simulink.

III.4. Résultats et discussions de simulation

III.4.1. Caractéristiques de la cellule PV

Après l'exécution du bloc de simulation d'une cellule PV, la variation de courant et la puissance en fonction de la tension du module qui représentent la caractéristique I(V) et P(V) respectivement, sont illustrés dans les figures III.12 et III.13.

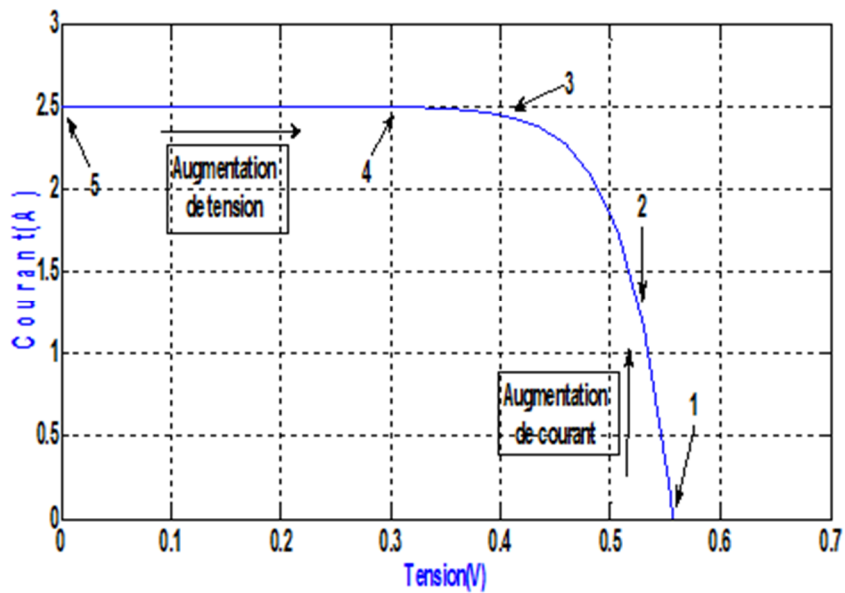


Figure III. 12: Caractéristique typique I(V) d'une cellule solaire.

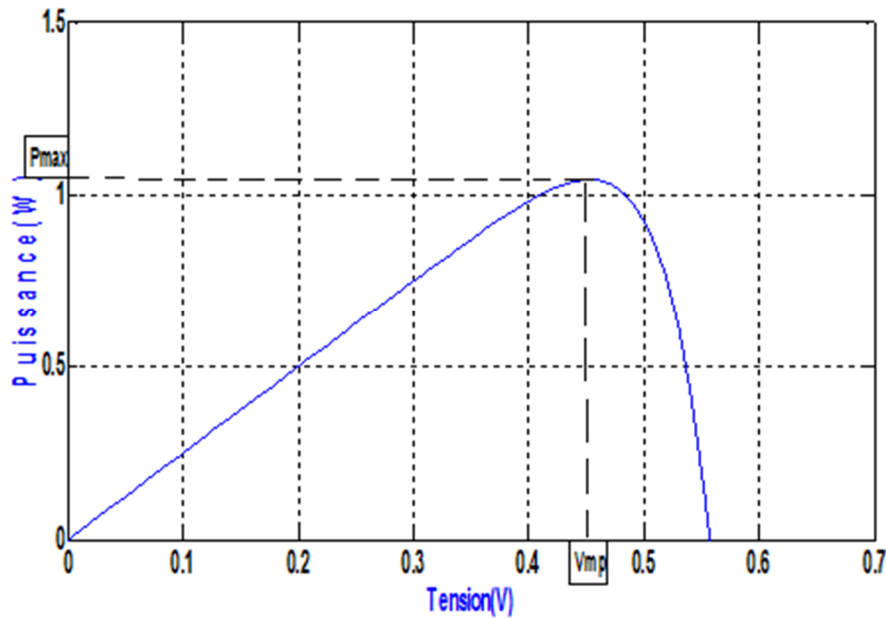


Figure III. 13:Caractéristique typique P(V) d'une cellule solaire.

La caractéristique principale de la cellule solaire est la caractéristique I(V) qui montre comment une cellule solaire répondra à toutes les charges possibles sous un ensemble particulier des conditions d'ensoleillement et de température. Il y a trois points importants dans cette courbe:

- Le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale (point 3).
- Le point où la tension est égale à zéro et le courant est en maximum (courant de court-circuit, point 5).
- Le point où le courant est égal à zéro et la tension est en maximum (tension de circuit ouvert, point 1).

Egalement la caractéristique I(V) peut être divisée en trois gammes:

- Une gamme où la cellule est considérée comme une source de tension (1-2), le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants petits et des tensions élevées.
- Une gamme où la cellule est considérée comme une source de courant (4-5), le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions petites.
- Une gamme où ni la tension ni le courant ne sont constants (2-4), le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances élevées, des courants et des tensions acceptables.

Concernant les valeurs obtenues par la simulation du notre modèle, nous remarquons sur la figure III.12 que le courant est pratiquement constant malgré l'augmentation de la tension jusqu'à atteindre une valeur de 0,4 V. Après cette valeur nous observons une diminution de la valeur de courant.

Pour la puissance (figure III.13), nous observons que la puissance délivrée par une cellule photovoltaïque augmente proportionnellement avec l'augmentation de la tension jusqu'à la valeur optimale $P_{max} = 1V$ pour une tension de 0,4 V. Ensuite elle décroît jusqu'au zéro ($P=0$), quand la tension est égale à la tension de circuit ouvert. Ces résultats sont en bon accord avec d'autres utilisant le module SOLKAL 36 W [37-38].

III.4.2. Caractéristiques du module PV

Dans ce qui suit, nous avons simulé le module décrit dans le chapitre II. On va étudier l'effet de l'éclairement, la température et la résistance série sur les caractéristiques I(V) et P(V).

III.4.2.1. Influence de l'éclairement

L'éclairement modifie la caractéristique I(V) de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} , I_m et V_m .

La figure (III.14) présente les caractéristiques courant-tension d'un notre module solaire pour plusieurs intensités du rayonnement solaire à la température ambiante ($T=25^{\circ}C$).

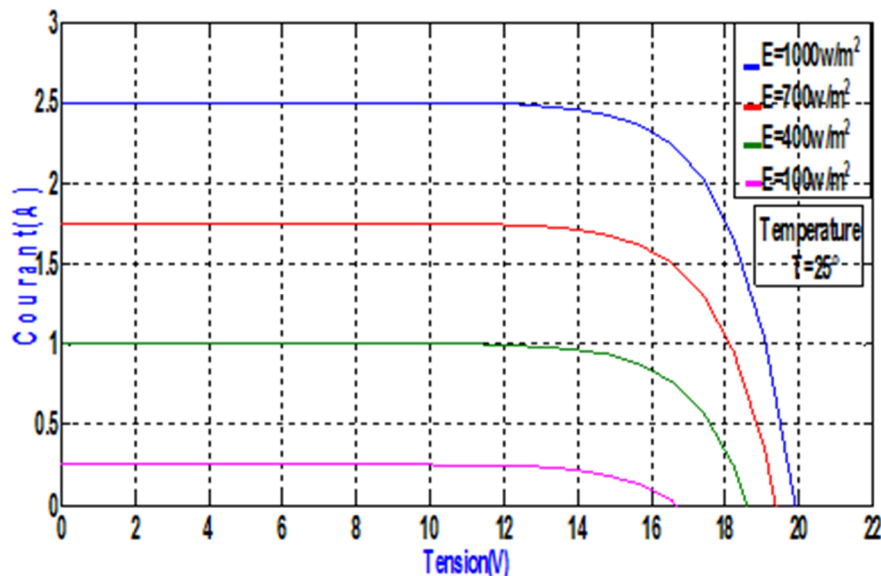


Figure III. 14: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

On remarque que le courant du court circuit I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité de rayonnement car le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement E.

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co} , ceci peut être expliqué par dépendance de cette dernière de la qualité du matériau et du type de jonction considérée. Concernant les caractéristiques P(V), la figure III.15 montre clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondant aux points de puissance maximale P_{max} , cette valeur augmente avec l'augmentation de l'éclairement.

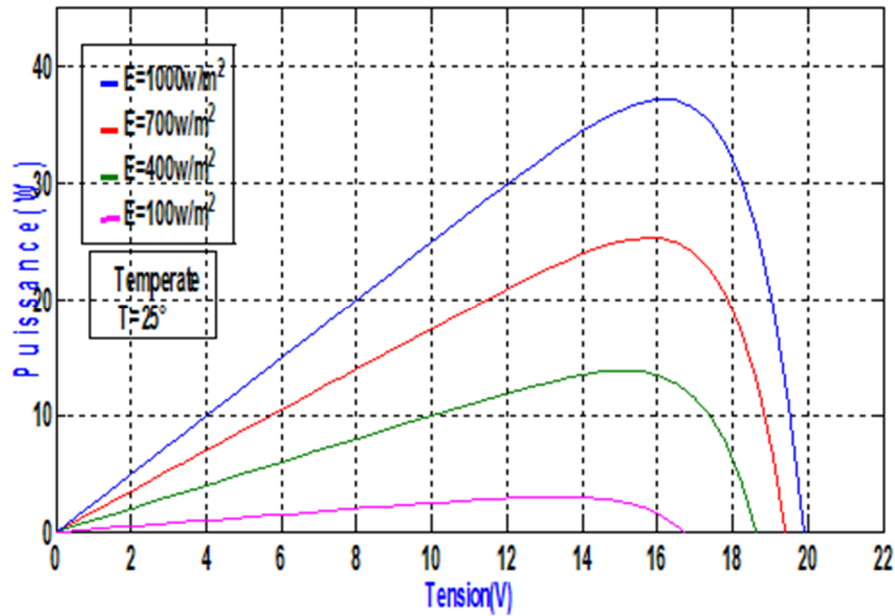


Figure III. 15: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

En se basant sur les résultats de notre simulation, nous pouvons calculés les valeurs de la tension et du courant au point de fonctionnement, la puissance maximale, facteur de forme ainsi que le rendement du module PV, les résultats trouvés sont reportés sur le tableau ci-dessous :

Eclairement (W/m ²)	V _m	I _m	P(w)	FF	η (%)
1000	16.10	2.30	37.03	0.70	13.71
700	15.8	1.57	24.80	0.54	13.12
400	15.3	0.88	13.46	0.25	12.46
100	14.8	0.22	3.256	0.061	12.05

Tableau III. 1: variation des paramètres de la caractéristique I (V) en fonction de l'éclairement

La variation du rendement du module en fonction de l'éclairement est schématisée sur la figure suivante. Une augmentation de l'éclairement résulte un rendement plus grand, les valeurs de rendements calculés sont dans la gamme pour un module à base de silicium

polycristallin. Ces résultats est en bon accord avec des résultats de d'autres simulations utilisant le même modèle de notre étude (SLKAR 36W) [39-43].

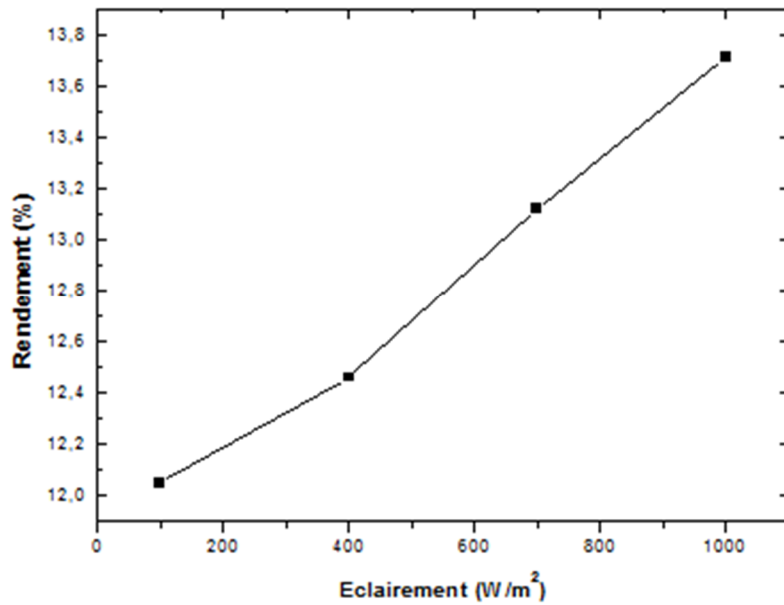


Figure III. 16: Variation du rendement du module en fonction de l'éclairement.

III.4.2.2. Influence de la température

La conversion photovoltaïque est une application fortement dépendante de la température, les paramètres caractéristiques des cellules solaires, à savoir le courant de court circuit (I_{cc}), la tension en circuit ouvert (V_{co}), le facteur de forme (FF) et le rendement de conversion PV (η) sont influencés par la température. La dépendance de ces paramètres à la température est étudiée dans la gamme (25-75°C) sous un éclairement constant (1000 W/m^2) (figures III.17 et III.18).

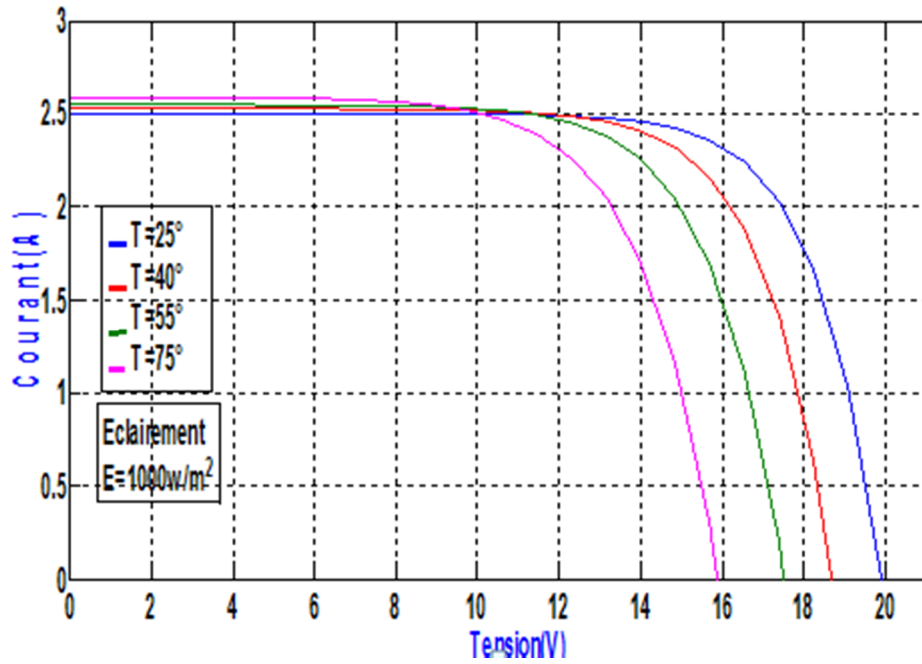


Figure III. 17: Influence de la température sur la caractéristique I(V)

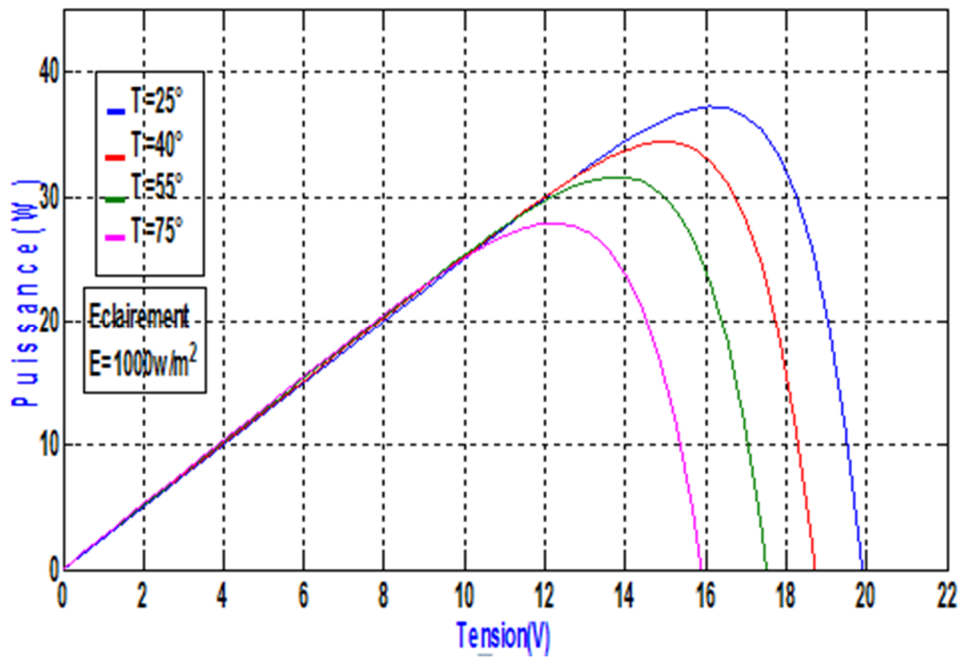


Figure III. 18: Influence de la température sur la caractéristique P(V)

On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court circuit (I_{cc}), cela résulte de l'augmentation du photo-courant I_{ph} due principalement à la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau, cette augmentation est de l'ordre de + 0,1 % par degré $^\circ\text{C}$. En même temps on assiste à une augmentation notable du courant direct de diode, entraînant une diminution nette de la tension de circuit ouvert (V_{co}) environ -2,47 mV par cellule.

L'augmentation de température se traduit au total par une baisse relative de la puissance disponible de $-0.35\% / ^\circ\text{K}$ et par une modification de la valeur de la charge permettant d'extraire cette puissance maximum. La diminution de la puissance fournie est estimée à environ de $0,2\%$ par degré pour le module.

Donc il faut impérativement prendre en compte la variation de la température du site lors du dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

De la même façon dans le cas variation de l'éclairement, nous pouvons le tableau correspondant eu changement de la température.

D'après la simulation nous avons trouvé les résultats suivants :

temperature	V_m	I_m	P(w)	FF	η (%)
298	16.8	2.303	37.03	0.68	13.51
313	15.6	1.583	24.69	0.47	13.06
328	14.6	0.957	13.98	0.26	12.94
348	14.7	0.23	3.381	0.064	12.52

Tableau III.2 : variation des paramètres de la caractéristique I(V) en fonction de température.

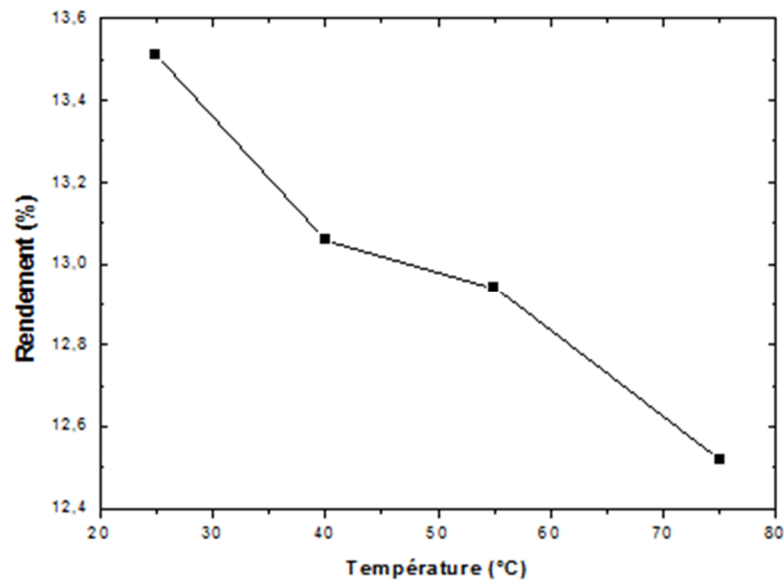


Figure III. 19: variation du rendement du module en fonction de la température.

La variation du rendement du module en fonction de température est illustrée sur la figure III.19. Nous observons que l'augmentation de la température induit une diminution du rendement, les valeurs de rendements calculés sont dans la gamme pour un module à base de silicium polycristallin. Ces résultats est en bon accord avec des résultats de simulation utilisant le même modèle de notre simulation [39-41].

III.4.2.3. Influence de la résistance série

Les figures III.20 et III.21 montrent l'influence de la résistance série sur les caractéristique I(V) et P(V) du module photovoltaïque.

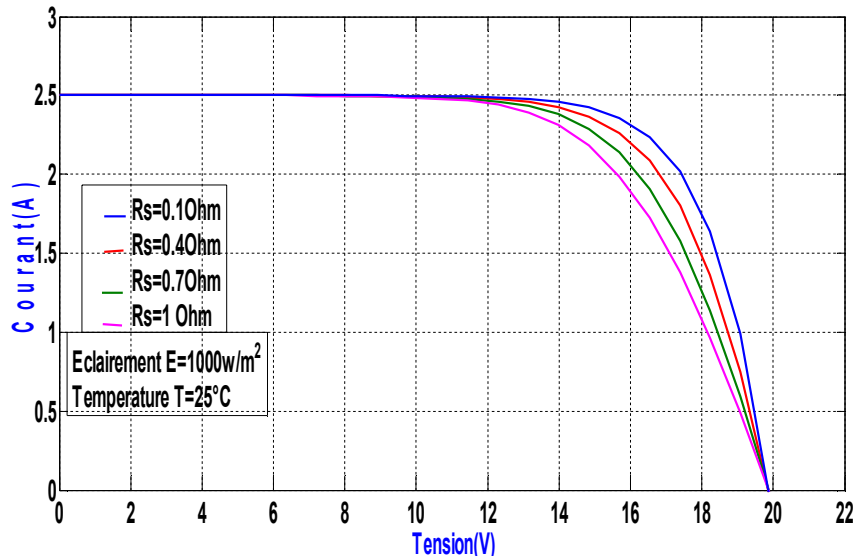


Figure III. 20: Influence de la résistance série R_s sur la caractéristique I(V)

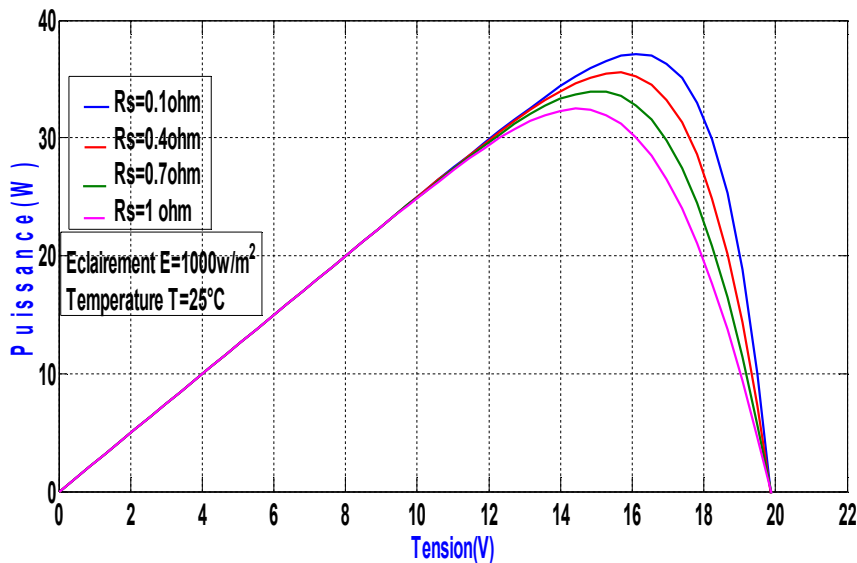


Figure III. 21: Influence de la résistance série R_s sur la caractéristique P(V)

On remarque que la tension de circuit ouvert (V_{co}) et le courant du court circuit (I_{cc}) ne sont pas modifiés, mais la caractéristique se déforme très rapidement sous l'effet de R_s . Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la caractéristique I(V) dans la zone où la cellule fonctionne comme une source de tension lorsque R_s augmente. De plus une diminution

de la pente de la courbe de puissance est observé lorsque la résistance série augmente, cette augmentation a un effet réductif considérable sur le point de fonctionnement.

III.4.2.4. Influence simultanée du rayonnement et de température

Dans les paragraphes précédents, on a étudiées l'effet des facteurs climatiques (éclairage et température) sur le comportement du module solaire choisi séparément, une étude de l'influence simultanée de ces facteurs est intéressante, elle est illustrée sur les figures III.22 et III.23.

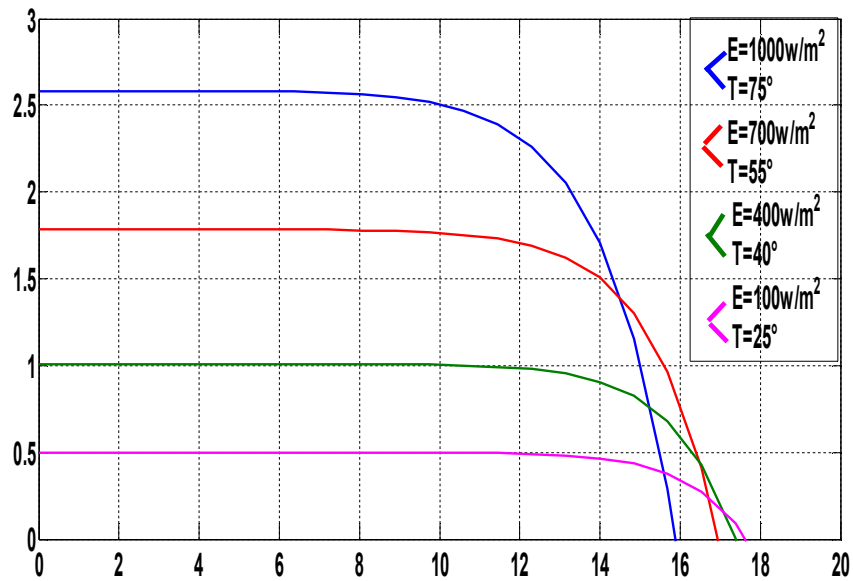


Figure III. 22: Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur caractéristique I(V).

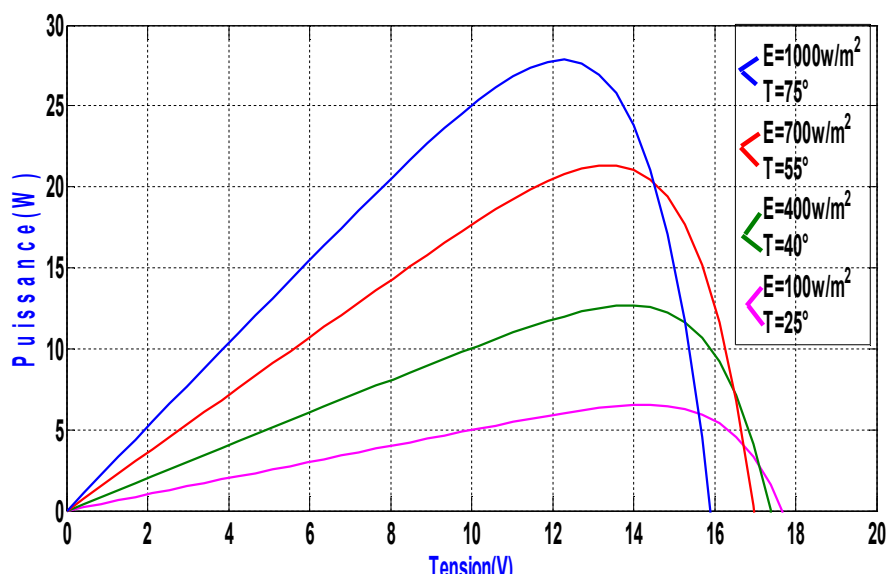


Figure III. 23: Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur caractéristique P(V).

Nous remarquons qu'une augmentation du rayonnement et de la température entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert (V_{co}) et une augmentation du courant du court circuit (I_{cc}). Donc on peut conclure que la température a un effet dominant par rapport à l'éclairement. En plus nous observons un décalage des coordonnées du point la puissance maximale vers les tensions plus élevées.

III.5. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, une simulation d'un module PV pour bien comprendre son fonctionnement électrique en fonction de différents facteurs. La simulation du module basée sur les équations mathématiques en utilisant Matlab/Simulink a démontré que les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension sont fortement influencé par la température et l'irradiation. Nous avons aussi calculé le rendement qui est compris entre 12-13%. Les résultats de cette simulation s'accordent avec des résultats publiés en littérature.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure ces dernières années. De nombreuses voies de recherches se sont donc orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire. Cette énergie est produite par un dispositif (cellule solaire photovoltaïque ou photopile) qui transforme l'énergie électromagnétique du rayonnement solaire en énergie électrique.

Généralement, les systèmes de conversion d'énergie renouvelable souffrent d'un manque d'optimisation et présentent des déficiences importantes.

L'étude que nous avons menée avait pour but de maîtriser le fonctionnement d'une cellule solaire et l'influence de plusieurs paramètres sur son comportement en se basant sur la caractéristique $I(V)$ dans le but d'optimiser les paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

La simulation numérique a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants sur le fonctionnement des cellules solaires. Nous avons utilisé un logiciel Matlab/Simulink pour simuler un modèle de cellule solaire à une diode, à base de silicium polycristallin. Ensuite, l'influence de la température et de l'éclairement sur le comportement de cette cellule solaire a été étudiée. Par la suite, nous avons déduit l'effet de trois facteurs sur le paramètre essentiel de la cellule solaire qui est le rendement de conversion.

Nos résultats obtenus ont été comparés avec d'autres travaux et ils sont en bon accord avec d'autres publiés dans la littérature.

Comme perspectives à ce travail, est la simulation de modèle solaire à deux diodes sous d'autres paramètres ainsi que l'étude de la perte.

Bibliographies

Références Bibliographiques

- [1] **Fatima Abdo**, "Croissance de couche minces de silicium par épitaxie en phase liquide ",Thèse de doctorat , Université de Lyon France ,2007.
- [2] **L.O Herweig** ,"Photovoltaic Technology advanced ,Industry progress and Market Promises ",Proc of the 1989 Annual conference , American solar Energy society ,1989.
- [3] **Ben HMED.A et Temim. M**,"Etude des propriétés électrique des cellules photovoltaïques organiques ", Mémoire de master ,Université Tlemcen ,2001.
- [4] **M, Angelaid Paster** ,"conception et réalisation de modules photovoltaïque électrique, "Thèse de doctorat l'institut National des science appliqués de Toulouse ,2006.
- [5] **Mlle ben haddouche nesrine Fatima**, "La commande d'un système photovoltaïque d'un satellite". diplôme de master, université Abou bekr belkaid , Tlemcen, 2013.
- [6] **A. Martin, Green .Solar cells: Operating principles, technology, and system applications** ,Prentice-Hall, Inc, 1982.
- [7] **T.Markvart and L.Castañer**, *Solar Cells: Materials Manufacture and Operation*, Elsevier,2005.
- [8] **Christian and Hèlèn**, " physique des semi-conducteurs" , 4ième édition, Dunod édition, 2014.
- [9] **Frédiiric Parret**, "méthode d'analyse sélective et quantitative d'un mélange gazeux à partir d'un micro capteur à oxyde métallique nano particulaire ", thèse de doctorat, institue national polytechnique, Toulouse, 2006.
- [10] **Vincent Froger** ,"Couches minces de chalgogénures de zinc déposés par spray –CVD assisté par rayonnement infrarouge pour des applications photovoltaïques", Thèse de doctorat Paris Tech,2012.
- [11] **Henry Mathieu**, " Physique des semi-conducteurs et des composants électronique », Masson, 1995.
- [12] **Fabrice Oehler**, " Croissance et Caractérisation de Nano fils de Silicium "la boratoire Silicium Nano électronique Photonique et Structure (CEA/DSM/ DRFMC/ SP2M/ SiNaPS)Ecole Normale Supérieure de Lyon université Claude Bernad Lyon 1,2007.
- [13] **[13] Philippe Leturcq et Gérard Rey**. *Physique des composants actifs à semi-conducteurs*. Dunod . 1978. ISBN 2-04-010385-6.
- [14] **J.-D. Chatelain**. *Dispositifs à semi-conducteurs. Traité 3E*. Dunod. 1979.
- [15] **A.L.Fahrench, R.H.Bube**, «*Fundamentals of solar cells* ", Acadimic press, New york, 1983.
- [16] **S.Astier, P.Chapoulie, D.Harribey**, " Modélisation et contrôle d'un système autonome à générateur photovoltaïque, application à l'energisation d'un véhicule électrique solaire ".
- [17] **S.M. Sze**, *Physics of semiconductor Devices, second edition*, Copyright. C.1981 by john ,Wiley and Son, Inc.
- [18] **Elsy MANSOUR**, " Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio", projet de fin d'études ingénieur. responsable de projet : Dr Georges salloum, Université Libanaise2012.
- [19] **Nichiporik oleksiy** ,"Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières inter digités",thèse de doctorat ,l'institut national des sciences appliquées de Lyon,2005.
- [20] **Helali Kamelia**, "Modélation d'une cellule photovoltaïque étude comparative" à L'UMM TO,2012.
- [21] **BOUKHERS Djamil**, " optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage" Université mentouri de Constantine Diplôme de magister, 2007.
- [22] **Yann Pankow**, "Etude de l'intégration de la production décentralise dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque", Thèse de doctorat centre de Lille 2004.
- [23] **B. Flèche - D. Delagnes**, "Energie solaire photovoltaïque ", juin 2007.
- [24] **L. protinand S. Astier**, "convertisseurs photovoltaïque" techniques d'ingénieure D3360.1996.
- [25] **Alain Bilbao Learreta**, "Réalisation de Technique MPPT numérique", Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Université Virgile.2006.

- [26] **Bendjellouli Zakaria**, "contribution à la modélisation d'une cellule solaire" ,thèse de Magistère, Université de Bechar, 2009.
- [27] **R. Khezzar et al.** "Comparaison entre les différents modèles électriques et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque". revue des Energie Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388, 2010.
- [28] **Photovoltaïque.info** ©2011, Toute l'information sur le photovoltaïque.
- [29] **Olivier GERGAUD**, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan 9 décembre 2002.
- [30] **M.S. Aït Cheikh et al**, " Mise au point d'une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3, pp 421-443,2010 .
- [31] **S.Nema,R.K.Nema .and G.Agnihotri**, "Matlab/simulink based study of photovoltaic cells /modules/ array and their experimental verification", International Journal of Energy and Environment ,pp.487-500,Volume 1,Issue 3,2010.
- [32] **Adel et Shahat** , "PV cell module modeling and simulation for smart grid applications ", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, JATIT All rights reserved, pp 9-20, 2010.
- [33] **B Addallah** " Développement de surface à base de dioxyde de titane par PVD pour une application aux cellules solaires ", Thèse de doctorat, Université de Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2008.
- [34] **R. Merahi, R. Chenni, M. Houbes** , " Modélisation et Simulation d'un module PV par Matlab » .Journal of Scientific Research N° 0 vol 1, 2010.
- [35] **G. Notton et al**," Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.
- [36] **Akassewa Tchapo Singo**,"Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome ", Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [37] **T.Pearson, S.Bhuvaneswari, S.Abish Samuel**, "Solar Radiation Prediction with Single Diode Photovoltaic Module", International Journal of Engineering And Computer Science, Volum4, Issue1, January 2015, Pp 9888-91.
- [38] **Seha Gupta, Rashmi Jain**, "Modeling and Simulation of Photovoltaic Module", International Conference on Role of Engineers as Entrepreneurs in Current Scenario, 2014.
- [39] **C. Chukwuka, K.A. Folly**, "Technical and Economic Modeling of the 2.5kW Grid-Tie Residential Photovoltaic System", International journal of Renewable Energy Research, Vol.3, No.2,Pp 412-419, 2013.
- [40] **Swati Singh, Lini Mathew, Shimi S.L**,"Design and Simulation of Intelligent Control MPPT Technique for PV Module Using MATLAB/ SIMSCAPE", International journal of advanced research in electrical electronics and instrumentation engineering, Vol.2, Issue 9, Pp 4545-4566, 2013.
- [41] **S. Wijewardana**, "Maximum Power Point Analysis Using Simulink/Matlab for a Hybrid Solar Photovoltaic/Battery Storage system", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Volume 3, Issue 11,Pp 18-26, 2013.
- [42] **Mohamed Ouled Salem**, "Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin », Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen ,2010.
- [43] **Hasan Mahamudul, Mekhilef Saad, and Metselaar Ibrahim Henk**, "Photovoltaic System Modeling with Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Algorithm", International Journal of Photoenergy, 2013.

Résumé

Le modèle électrique d'un module PV est présenté sur la base des diodes Shockley. Le modèle simple est une seule diode en série avec une résistance.

La simulation de ce modèle est une étape importante pour étudier et optimiser la cellule solaire et notamment l'étude de la variation de la puissance maximale et la caractéristique courant-tension avec la température et l'éclairement.

Une comparaison entre les résultats de simulation en utilisant le Matlab/simulink et d'autres cités dans la littérature est faite.

Mots clés: module photovoltaïque, cellule solaire, modèle à une diode, courant court-circuit

Abstract

The electrical model of PV module is presented on the basis Shockley diodes. The simple model is a one diode with a series resistance.

This model simulation is an important step in order to study and optimize the solar cell and mainly the study of maximum power variation and the current-tension characteristic with the illumination and temperature.

A comparison between simulation results using Matlab/Simulink along with already mentioned methods in the literature have been carried out.

Keywords: photovoltaic module, solar cell, a diode model, short circuit current.

المخلص

النموذج الكهربائي لوحدة كهرو ضوئية يعرض على أساس صمام ثنائي من نوع شوكللي. النموذج البسيط هو عبارة عن صمام ثنائي وحيد مربوط على التسلسل مع المقاومة .

محاكاة هذا النموذج هي مرحلة مهمة من أجل دراسة وتحسين الخلية الشمسية خصوصا لدراسة تغيرات الطاقة العظمى بدلالة الإضاءة والحرارة .

تم إجراء مقارنة بين نتائج المحاكاة باستخدام ماتلاب/سيميلينك وأخرى مذكورة في مؤلفات.

الكلمات المفتاحية: نظام كهرو ضوئية, الخلية الشمسية , نموذج أحادي الصمام الثنائي, وحدة ماس كهربائي
حالية.