UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies Filière : Génie électrique Spécialité : électrotechnique Industrielle Présenté par :

Arbouche Riadh

Aichi Mohieddine

Thème :

Identification des paramètres d'un module photovoltaïque

Soumis au jury composé de :

M ^r Louazene Lakhdar	MCA	Président	UKM Quergle
M ^r Djafour Ahmed	Professeur	Encadreur/rapporteur	UKM
M ^m Khelfaoui Narimane	Docteur	CO-Encadreur	UKM
M ^r Bouhafs Ali	MAA	Examinateur	Ouargla UKM Ouargla

Année universitaire 2021/2022

Remercîments

Nous remercions ALLAH le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à notre encadreur le Professeur Djafour Ahmed. Et notre co-encadreur M^{elle} Khelfaoui Narimane. Nous les remercions de nous avoir encadrés, orienté, aidé et conseillé. Elle qui nous a guidés avec ses orientations, ses conseils et ses critiques tout au long de ce travail de recherche. On ne peut que lui être reconnaissant surtout pour ses qualités intellectuelles et humaines.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion et ont accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions durant notre recherche.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements à nos familles qui ont toujours été là pour nous. Nous remercions nos ami(e)s pour leur encouragement, pour leur sincère amitié et confiance. À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive et nous remercions tous ceux et celles qui nous connaissent et qui nous permettent de nous sentir en vie...

Merci à toutes et à tous.

À MES CHERS PARENTS

Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À MES CHERS FRERES (Hamza, Yacine, Anes), pour leur appui et leur encouragement.

À MES CHERS COUSINES COUSINS (Ouissem, Hanane, Nourhane, Mohamed, Amira).

À toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mon encadreur Mm Khalfaoui.N.

À mon cher binôme, Mohieddine

A toute mes amies,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

<u>RIADH</u>

Dédicace

À ma chère mère, À mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

À mes frères, Taha amine

À ma chère sœur et son mari, et son fils

Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études. Qui je souhaite une bonne santé.

> À mon cher binôme, Riad Pour son entente et sa sympathie.

À mon encadreur Mm Khalfaoui.N. Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

À mes chères amis, Haythem, Amine, Mehdi, l'équipe Profoot & Mevlana Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

À khalti Zohra et khalti Dalila rabi yjiblha chfa inshallah.

À ami Ahmed et ami Aboubaker À toute ma famille,

À tous mes autres ami(e)s, À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment

Mohieddine

Listes des acronymes et abréviations

R_s	Résistance série (Rs)				
R_{sh}	Résistance shunt (Rp)				
I _{ph}	Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (A)				
n_s	Nombre de cellules en série				
n_p	Nombre de cellules en parallèle				
V _{co}	La tension de circuit ouvert (V)				
I _{cc}	Le courant de court-circuit (A)				
I _{mpp}	Le courant au point de puissance maximale (A)				
V_{mpp}	La tension au point de puissance maximale (V)				
P _{max}	La Puissance maximale (W)				
PV	<i>PV</i> Panneau photovoltaïque				
I_D	Courant de la diode (A)				
V_D	Tension de la diode (V)				
V_t	Tension thermique				
RMSE	L'erreur quadratique moyenne				
MAE	L'erreur absolue moyenne				

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur les modules photovoltaïques					
Figure (I. 1) : Energie renouvelable.					
Figure (I. 2) : Énergie solaire.					
Figure (I. 3) : Semi-conducteur intrinsèque.					
Figure (I. 4) : Semi-conducteur extrinsèque.					
Figure (I. 5) : Silicium de type N.					
Figure (I. 6) : Silicium de type P.					
Figure (I. 7) : Dopage des semi-conducteurs.					
Figure (I. 8) : Mouvement des électrons et des trous.					
Figure (I. 9) : La jonction P-N.					
Figure (I. 10) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.					
Figure (I. 11) : cellule photovoltaïque.	10				
Figure (I. 12) : Cellule photovoltaïque monocristallin.					
Figure (I. 13) : Cellule photovoltaïque poly cristalline.	13				

Figure (I. 14) : Cellule photovoltaïque amorphe.		
Figure (I. 15) : Cellule photovoltaïque multi-jonction.		
Figure (I. 16) : Modules photovoltaïques.		
Figure (I. 17) : Association es série.		
Figure (I. 18) : Association es parallèle.	18	
Figure (I. 19) : Caractéristique résultante d'un groupement Mixte de (nP+ nS) cellules identiques.		
Chapitre II Modélisation d'un module photovoltaïque		
Figure (II. 1) : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal.	24	
Figure (II. 2) : Circuit équivalent d'une cellule PV Modèle une diode.	25	
Figure (II. 3) : Circuit équivalent d'une cellule PV modèle avec $R_{sh}=\infty$.		
Figure (II. 4) : Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque.	27	
Figure (II. 5) : Caractéristiques électrique courant– tension I-V.		
Figure (II.6) : Facteur de forme pour une cellule PV.		
Figure (II. 7) : Influence des résistances Rs et Rsh sur la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.		
Figure (II. 8) : Diode anti retour.		
Figure (II. 9) : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V		

Figure (II. 10) : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.		
Figure (II. 11) : Volée d'Anser en formation en V.		
Chapitre III Résultats et discussions		
Figure. (III. 1) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	44	
Figure. (III. 2) : Caractéristique I-V expérimentale et simulé de module 200 Wc.		
Figure. (III. 3) : Caractéristique P-V expérimentale et simulé de module 200 Wc.		
Figure. (III. 4) : Organigramme de la méthode des essaims particulaires .	50	
Figure. (III. 5) : Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode PSO pour T=40°C.	51	
Figure. (III. 6) : L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés par la méthode à T=40°C.	51	

Liste des tableaux

Chapitre I Généralités sur les modules photovoltaïques					
Tableau (I. 1) : Caractéristiques du silicium.					
Chapitre III Résultats et discussions					
Tableau (III. 1) : Spécification de Module 200 W à la condition STC.	43				
Tableau (III. 2) : Résultats Comparatifs Selon le Modèle de Simulation et les Mesures.	48				
Tableau (III. 3) : Les erreurs calculée et mesurée par jour.					
Tableau (III. 4) : Résultats de la méthode conventionnel l'éclairementconstant.					
Tableau (III. 5) : Résultats de la méthode PSO l'éclairement constant.					
Tableau (III. 6) : Résultats de la méthode conventionnel température constant.					
Tableau (III. 7) : Résultats de la méthode PSO température constant.					
Tableau (III. 8) : Résultats Comparatifs Selon le Modèle conventionnel/ laméthode PSO.					
Tableau (III. 9) : l'erreur relative entre le modèle conventionnel/ la méthode PSO.					

Sommaire

Remerciementsi
Dédicaceii
Liste des acronymes et des abréviationsiv
Liste des figuresvi
Liste des tableauxix
Introduction générale
Chapitre I Généralités sur les modules photovoltaïques
I.1 Introduction :
I.2 Conversion photovoltaïque :
I.2.1 L'effet photovoltaïque
I.2.2 Dispositifs à semi-conducteurs
I.2.3 Dopage des semi-conducteurs
I.2.3.1 Dopage de type N
I.2.3.2 Dopage de type P
I.2.4 La jonction P-N7
I.3 Principes de fonctionnement
I.4 cellule photovoltaïque
I.5 Différentes technologie de la cellule photovoltaïque
I.5.1 Le silicium
I.5.1.1 Silicium monocristallin
I.5.1.2 Silicium polycristallin
I.5.1.3 Silicium amorphe
I.5.1.4 Multi-jonction
I.5.1.5 Cellules organiques
I.5.1.6 Cellules nanocristallines
I.6 Les modules photovoltaïques
I.7 Association des cellules photovoltaïque
I.7.1 Association en série
I.7.2 Association en parallèle
I.7.3 Association Mixte (en série et en parallèle)
I.8 La durée de vie du panneau solaire photovoltaïque

I.9 Les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques19
I.9.1 Les avantages des panneaux photovoltaïques19
I.9.2 Les inconvénients des panneaux photovoltaïques
I.10 Conclusion
Chapitre II Modélisation d'un module photovoltaïque
II.1 Introduction
II.2 Modélisation de panneau solaire
II.2.1 Modèle idéal
II.2.2 Modèle réel à une diode
II.2.3 Modèle réel à une diode avec $R_{sh} = \infty$
II.3 Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque
II.3.1 Les caractéristique courant– tension (I-V)
II.4 Les paramètres d'un panneau photovoltaïque
II.5 L'influence des paramètres extérieurs
II.5.1 Paramètres climatiques
II.5.1.1 Effet d'humidité
II.5.1.2 Effet poussière
II.5.2 Paramètres de fabrication
II.5.2.1 Résistance série (R _s)
II.5.2.2 Résistance shunt (R _p)
II.6 Protection des modules PV
II.6.1 Diodes bypass
II.6.2 Les diodes anti retour
II.7 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V
II.8 Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V
II.9 Influence de la résistance série et parallèle sur les caractéristiques I-V et P-V 35
II.10 Présentation de la méthode P.S.O
II.10.1 Motivation de la P.S.O
II.10.2 Les éléments de la P.S.O
II.10.3 La P.S.O. pour l'optimisation continue
II.10.3.1 Principe fondamental
II.10.3.2 Algorithme de principe
II.11 Conclusion

Chapitre III Résultats et discussions

III.1	Introduction	42				
III.2	Procédure d'installation					
III.3	Caractéristique d'une Cellules mono- cristallines					
III.4	Modalisation de panneau solaire44					
III.5	Validation de modèle de translation de la caractéristique (I-V)	46				
III.:	5.1 Présentation des résultats	47				
II C	II.5.1.1 Translation des courants de courts circuits et des tensions de circuits Duverts	48				
II P	II.5.1.2 Comparaison des caractéristiques expérimentales et simulées de sortie	e 47				
III.6	Le principe de l'algorithme de PSO	49				
III.7	Estimation des cinq paramètres	52				
III.	7.1 Résultats de la méthode conventionnel et la méthode PSO	52				
III.8	Conclusion	56				
Conc	lusion générale5	58				

Introduction Générale

Introduction Générale

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

Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours et sachant que la quasitotalité de production mondiale d'énergie provient de sources fossiles, la consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. En plus la consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Le rayonnement solaire quant à lui est reparti sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole, d'où l'idée de convertir cette énergie solaire en énergie électrique grâce au système photovoltaïques.

L'énergie photovoltaïque est devenue une source alternative d'énergie de grande importance.

Pour cela plusieurs efforts et recherches ont été concentrés sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV).

Ce travail est divisé en trois chapitres :

- * Le premier chapitre présente des généralités sur les modules photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation et la présentation de la méthode de PSO (l'optimisation par l'essaim particulaire).
- Le troisième chapitre présente l'étude, la modélisation et une simulation de méthode PSO pour notre module, avec une comparaison entre les Résultats obtenus.

Chapitres I

Généralités sur le module photovoltaïque

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies dont le renouvellement est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. L'expression énergie renouvelable est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique. L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.



Figure (I. 1) : Energie renouvelable.

I.2 Conversion photovoltaïque

En effet le mot "photovoltaïque" vient du mot grec « photo » qui signifie lumière et de « voltaïque » qui tire son origine du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [1].

Le soleil est une source d'énergie qui. Cette énergie permet de produit de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires [1]. La possibilité de transformer directement l'énergie lumineuse, et en particulier le rayonnement solaire en énergie électrique est apparu en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Cet effet utilise les propriétés quantiques de la lumière permettant la transformation de

l'énergie incidente en courant électrique dont la cellule solaire ou photopile, est l'élément de base de cette conversion photovoltaïque [2,3].

I.2.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semiconducteur appelé cellule solaire [4,3].

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives [5,3]. Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.



Figure (I. 2) : Énergie solaire.

I.2.2 Dispositifs à semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées. A la température de 0 K (-273°C) chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal. Dans la figure (I.3), les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible. Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou. Par exemple, à la température de 300 K (27°C), il y a $1,45 \times 10^{10}$ paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur [6].



Figure (I. 3) : Semi-conducteur intrinsèque.



Figure (I. 4) : Semi-conducteur extrinsèque.

I.2.3 Dopage des semi-conducteurs

Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes de matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial.

Dans un semi-conducteur intrinsèque, ou pur, il n'y a aucun atome dopant. Tous les électrons présents dans la bande de conduction proviennent donc de la bande de valence. Il y a donc autant d'électrons que de trous : n = p = ni; ni : est la concentration intrinsèque. Tout dopage sert à modifier cet équilibre entre les électrons et les trous, pour favoriser la conduction électrique par l'un des deux types de porteurs [7].

Il existe deux types de dopage :

I.2.3.1 Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

(- (3		Si	-	Si	-	Si	
		.*			1			
Si	- (P	-	Si		St	-	Si	
	1				1		1	
6	- 🛯	-	Si	•	si	-	Si	
Si	- (5	-	Si		Si		Si	

Figure (I. 5) : Silicium de type N.

I.2.3.2 Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.



Figure (I. 6) : Silicium de type P.

I.2.4 La jonction P-N

Une jonction P-N est créé en juxtaposant un semi-conducteur dopé P avec un semiconducteur dopé N. On l'utilise dans de nombreux dispositifs électroniques.



Figure (I. 7) : Dopage des semi-conducteurs.

Les électrons en excès de la région dopée N ont tendance à diffuser vers la région P (où ils sont minoritaires). Il en est de même pour les trous en sens inverse.



Figure (I. 8) : Mouvement des électrons et des trous.

Les électrons et les trous se concentrent alors au niveau de l'interface entre les deux tranches.



Figure (I. 9) : La jonction P-N.

Cela a pour effet de créer un champ électrique créant une barrière de potentiel au niveau de la zone centrale. Cette zone devient un isolant et s'appelle la jonction P-N. Le champ électrique ainsi créé a tendance à repousser les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. De ce fait, lorsque la zone dopé N est exposée au rayonnement lumineux, un électron de la couche de valence du silicium est arraché, laissant parallèlement un trou. Sous l'effet de champ électrique créé par la jonction P-N, l'électron diffuse à l'extrémité de la zone N, et le trou se déplace à l'extrémité de la zone P. Lorsque les deux faces de ces deux zones sont reliées par un conducteur, un courant se créé, car l'électron va combler le trou. Une cellule photovoltaïque est constituée d'une tranche dopée N posée sur une tranche dopée P. L'interface entre les deux tranches s'appelle la jonction P-N. La tranche dopée N correspondra à la partie de la cellule exposée au rayonnement solaire [8].

I.3 Principe de fonctionnement

Cellule photovoltaïque est le suivant : les « grains » de lumière qu'on appelle photons, en pénétrant très légèrement dans le silicium, déplacent quelques électrons du métal. Le métal semi-conducteur ne permettant le déplacement des électrons que dans un sens, les électrons déplacés par la lumière doivent passer par le circuit extérieur pour revenir à leur place, ce qui engendre un courant. Les cellules produisent de l'électricité chaque jour même si le ciel est nuageux : dans ce cas, le rendement est simplement moins élevé. Les cellules sont assemblées sous forme de panneaux photovoltaïques, panneaux qui sont encastrés sur ou dans la toiture des habitations. La fabrication complexe demande une excellente maîtrise technique pour assurer dans la durée le meilleur rendement. L'assemblage de ces cellules solaires reliées les unes aux autres forme un module solaire (panneau solaire ou panneau photovoltaïque). Quelques installateurs proposent depuis le 1 janvier 2022 plusieurs systèmes pour les particuliers (mixte énergétique, système intelligent, autoconsommation, batteries virtuelles ...) Pour bénéficier de cette promotion spéciale et pour en savoir plus un spécialiste vous contactera [9].

LE PRINCIPE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE





I.4 Cellule photovoltaïque

La cellule PV, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique : diodes, transistors et circuits intégrés.



Figure (I. 11) : Cellule PV

I.5 Différentes technologies de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux semi-conducteurs. Le matériau semi-conducteur utilisé presque universellement aujourd'hui est le silicium, cela est principalement dû à sa disponibilité illimitée sur terre. C'est un matériau extrêmement abondant, non toxique et stable, il y a plusieurs technologies distinctes de la part de la nature du silicium employé et sa méthode de fabrication.

I.5.1 Le silicium

Le silicium se trouve en très grande quantité sur notre planète puisqu'il constitue environ 28% de l'écorce terrestre. En fait on le trouve surtout sous forme de dioxyde de silicium (Sio2) qui est le constituant principal du sable. Il est donc abondant est peu coûteux. Quelques-unes de ces propriétés sont données au tableau ci-dessous :

Symbole	Propriété	Valeur
	Nombre atomique	14
	Masse atomique	28.086
N •	Masse volumique	2330 kg/m ³
SI	Température de fusion	1683 k
~ –	Température d'ébullition	2628 k
	Coefficient de dilatation thermique	4,2 .10 ⁻⁶ /k

Tableau (I. 1) : Caractéristiques du silicium.

Cependant, pour être utilisable en électronique, le silicium doit être très pur. Il suffit d'un atome d'impureté sur un million pour multiplier les porteurs de charge par dix millions. Cette pureté coûte très cher à obtenir. Il existe plusieurs types de cellules en fonction de la structure microscopique du silicium :

I.5.1.1 Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est la base de ce type de cellule. La fabrication de cellule de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifie et solidifie. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99% ce qui permet un rendement énergétique fort. Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupe en fine tranches d'environ 300 μ m. Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduite via un processus de diffusion contrôlée : les tranches de silicium sont exposées à des vapeurs de phosphore dans un four ou la température varie de 800 à 1000°C [10].





a. Les avantages

 \blacktriangleright Très bon rendement (17.2%).

b. Les inconvénients

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairement.

I.5.1.2 Silicium poly-cristallin

Le processus de production est semblable à celui présente précédemment dans le cas de la fabrication de cellule en silicium mais avec un contrôle moins rigoureux. Il en résulte que les cellules obtenues sont moins couteuses mais aussi moins efficace (12,5% de rendement en moyenne).

Leur intérêt réside dans la multiplicité des formes sous laquelle le revêtement peut se présenter : lingots à découper, ruban ou fil à déposer, chaque technique permet de produire des cristaux ayant des caractéristiques spécifiques, y compris la taille, la morphologie et la concentration des impuretés [10].



Figure (I. 11) : Cellule photovoltaïque poly cristalline.

a. Les avantages

- > Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin ;
- > Moins cher que le monocristallin.

b. Inconvénients

- Les mêmes que le monocristallin.
- Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix).

I.5.1.3 Silicium amorphe

Les cellules de silicium amorphe différent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages à la fois au niveau des propriétés électriques et le processus de fabrication (processus simple, faible consommation d'énergie, peu couteux, possibilité de produire des cellules avec grands secteurs.

Mais, même avec un cout réduit pour la production, l'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients : le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules de mono et poly cristallin de silicium. Le deuxième est le fait que les cellules sont affectées par un processus de dégradation dans les premiers mois d'opération, réduisant ainsi leur durabilité [10].



Figure (I. 12) : Cellule photovoltaïque amorphe.

a. Les avantages

- Fonctionnement avec un éclairement faible ;
- Moins chères que les autres.

b. Les inconvénients

- Rendement faible en plein soleil (environ 7%);
- > Performances diminuent sensiblement avec le temps.

I.5.1.4 Multi-jonction

Les cellules multi-jonction différent des cellules présentées précédemment, car leur structure possède une meilleure absorption du spectre solaire, grâce à leur constitution de plusieurs couches de nature déférente (utilisant de différents matériaux semi-conducteurs de gaps déférente). Elles ayant une grande efficacité, donc présentent des rendements plus élevés. La figureI.15 montre une cellule multi-jonction.



Figure (I. 13) : Cellule photovoltaïque multi-jonction.

a. Les avantages

Les cellules à jonction simple traditionnelles ont une efficacité théorique maximale de 33,16%

- Le meilleur rapport rendement/masse du marché ;
- Un record de rendement pour des cellules photovoltaïques en utilisation commerciale.

b. Les inconvénients

- Un coût de fabrication très élevé.
- > Une technologie de pointe pour le moment réservé à l'industrie spatiale.

I.5.1.5 Cellules organiques

Des cellules souples peuvent être réalisées à base de « sandwichs » de semiconducteurs en polymère organique (des macromolécules naturelles). Elles fonctionnent sur le même principe que les cellules de silicium amorphe : un photon traversant une jonction entre zones de densités électriques différentes, entraîne un courant électrique.

Souples et légères, les cellules organiques peuvent être déposées sur des surfaces souples et déformables (comme les plastiques, les tissus) afin de répondre à certaines applications spécifiques. Les cellules photovoltaïques organiques avaient le potentiel d'obtenir une efficacité énergétique de 10 %.

a. Les avantages

- Elles correspondent à de faibles coûts financiers et énergétiques.
- > Elles ont un faible impact environnemental.
- Elles peuvent s'intégrer facilement à des structures souples ; on cite par exemple fréquemment la possibilité de les intégrer à des toiles de tentes, structures placées généralement au soleil, qui développent une grande surface et qui perm

b. Les inconvénients

- > Un taux de conversion (et donc un rendement) plus faible que les autres ;
- Une baisse de stabilité et de solidité causée par les changements de température cycliques qui affectent les cellules exposées au Soleil.

I.5.1.6 Cellules nanocristallines

Appelée Cellule de Graetzel3, elle s'inspire du processus de photosynthèse chlorophyllienne pour produire de l'électricité. Elle se compose d'une couche de dioxyde de titane TiO2 recouverte d'un côté d'un colorant sensibilisateur et de l'autre d'un gel électrolytique. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter une grande pureté des matériaux la constituant, à l'opposé des cellules photovoltaïques à semi-conducteur. Son

inconvénient reste la relative instabilité thermique et chimique de ses constituants. Son rendement actuel dépasse les 15%.

a. Les avantages

- En étendant la bande interdite des cellules solaires afin qu'elles absorbent une plus grande partie du spectre solaire.
- > En produisant plus d'excitons à partir d'un seul photon.

b. Les inconvénients

> Entraîner la formation d'autres paires électron-trou.

I.6 Les modules photovoltaïques

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un string. Un module est composé de plusieurs strings. L'association des modules permet :

- D'obtenir une tension suffisante.
- De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité...).



• De protéger mécaniquement les cellules (chocs...).

Figure (I. 14) : Modules photovoltaïques.

I.7 Association des cellules photovoltaïque

Dans le cas d'une association en série, les cellules délivrent le même courant mais elles peuvent fonctionner avec des tensions différentes. Si on assemble en parallèle m cellules, le courant aux bornes de l'assemblage est égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

I.7.1 Association en série

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, (Figure I.17). L'équation (I.11) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules.

$$V_{co,ns} = n_s. V_{co}$$
 avec $I_{cc,ns} = I_{cc}$ (I.1)

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{co,ns} = 0.6V \times 36 = 21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau proche de celle d'une tension de batterie de 12V.



Figure (I. 15) : Association es série.

I.7.2 Association en parallèle

Une association parallèle de n_P cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, (Figure I.18). L'équation (I.12) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_P cellules.

$$I_{cc,np} = n_p I_{cc} \quad avec \quad V_{co,np} = V_{co} \tag{I.2}$$



Figure (I. 16) : Association es parallèle.

I.7.3 Association mixte (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 :

$$I_{cc}{}^t = n_p . I_{cc} \tag{I.3}$$

$$V_{co}{}^t = n_s . V_{co} \tag{I.4}$$

Avec :

n_p: nombre des cellule en parallèle,

n_s : nombre des cellule en série.

La figure (I.19) montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.



Figure (I. 17) : Caractéristique résultante d'un groupement mixte de (n_P+ n_S) cellules identiques.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de courtcircuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} sont plus ou moins importantes. 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 (irradiation et température uniformes).

I.8 La durée de vie du panneau solaire photovoltaïque

La durée de vie des panneaux solaires photovoltaïques est la caractéristique d'un panneau solaire la moins médiatisée. Pourtant, l'effet direct est de réduire sa capacité à créer de l'énergie électrique. Les études prouvent qu'au-delà de 40 ans, la capacité maximale à fournir de l'énergie électrique des panneaux solaires diminue.

La durée de vie des panneaux solaires qui fait consensus se situe aux alentours de 30 années. Tout au long de cette durée, le potentiel de l'installation solaire à créer de l'électricité diminue de 100 à 80 %. La caractéristique d'un panneau solaire la plus fiable est cette longévité. [11]

I.9 Les avantages et les inconvénients des panneaux photovoltaïques

I.9.1 Les avantages des panneaux photovoltaïques

 ✓ Le panneau photovoltaïque contribue à la réduction des émissions de CO2, à la réduction des rejets polluants et à la préservation des ressources naturelles.

- ✓ Le panneau photovoltaïque contribue à l'évolution des consciences vers la préservation de la nature.
- ✓ Les panneaux photovoltaïques sont recyclables.
- ✓ Des systèmes de panneaux solaires simples et rapides à installer.
- ✓ Pas de combustion peu d'usure thermique des composants.
- ✓ Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- ✓ Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.
- ✓ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé [11].

I.9.2 Les inconvénients des panneaux photovoltaïques

Comme pour toutes les solutions énergétiques, il existe quelques inconvénients :

- Le principal inconvénient étant que la production d'énergie photovoltaïque peut être périodiquement insuffisant pour alimenter un foyer en totalité.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions de base de domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leurs rendements, puis nous avons abordé l'influence de ces paramètres sur la caractéristique des cellules solaires, ainsi que l'architecture classique d'un générateur photovoltaïque, finalement, nous avons présenté les modules photovoltaïques. Dans le chapitre suivant nous aborderons l'aspect lié à la modélisation de la cellule ou du module solaire photovoltaïque (PV).

Chapitres II

Modélisation d'un module photovoltaïque

II.1 Introduction

La modélisation d'un module photovoltaïque passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent. 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.

La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la relation non linéaire du courant en fonction de la tension (I-V). La détermination des paramètres joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires.

Ce chapitre aborde la modélisation des cellules photovoltaïques tout en focalisant sur la présentation de la méthode de PSO.

II.2 Modélisation de panneau solaire

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, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs 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 intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. On présenter a deux modèles du GPV :

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

II.2.1 Modèle idéal

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le
circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source du courant produit le photon courant I_{ph} qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G. [12]



Figure (II. 1) : Circuit équivalent d'une cellule PV – Model idéal.

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit :

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{n V_t}} - 1 \right) \tag{II.1}$$

Où

- V_D : Différence du potentiel électrique entre les deux extrémités de la diode.
- I_s : Courant de saturation inverse de la diode.
- *n* : Facteur d'idéalité de la diode.

 V_t : Tension thermique en fonction de la température T donnée par l'équation suivante :

$$V_t = \frac{k * T}{q} \tag{II.2}$$

Où

k et *q* représentent respectivement la constante de Boltzmann (1.3806503 * $10^{-23} J/K$) et la charge d'électrons (1,602176 * $10^{-19} C$).[13][14]

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme suit :

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{V_D}{n V_t}} - 1 \right) \tag{II.3}$$

II.2.2 Modèle réel à une diode

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data Sheet).il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires.[12]



Figure (II. 2) : Circuit équivalent d'une cellule PV Modèle une diode.

Ce modèle est appelé modèle à une diode et sa valeur de courant est donnée par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[exp\left(\frac{q\left(V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)\right)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (I_{pv} \times R_s)}{R_{sh}}$$
(II. 4)

Avec :

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température.

Is : courant de saturation inverse de la diode.

n : facteur d'idéalité de la diode.

II.2.3 Modèle réel à une diode avec $R_{sh}=\infty$

Modèle réal à une diode avec $(R_{sh}=\infty)$ pour les modules dépouver de feuit R_{sh} infinité on peut représenter le module par le schema suivant :



Figure (II. 3) : Circuit équivalent d'une cellule PV modèle avec $R_{sh} = \infty$.

Après analyse du circuit, [15] l'équation courant- tension est donnée comme suit [16] :

$$I = I_{pv} - I_s \left(e^{\frac{V + IR_s}{n V_t}} - 1 \right)$$
(II. 5)

II.3 Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [|17] :

- Sa tension à vide : V_{co}. Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit : I_{cc} cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal : M_{pp} (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt}, I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp}, I_{mpp}).





II.3.1 Les caractéristiques courant-tension (I-V)

La puissance électrique délivrée par une cellule photovoltaïque est le produit de la tension par le courant qu'elle génère. Ces deux grandeurs, courant et tension, dépendent à la fois des propriétés électriques de la cellule mais aussi de la charge électrique à ses bornes.

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension. Tout dipôle électrique est entièrement défini par sa caractéristique courant-tension, qui lui est propre [18].

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous :



Figure (II. 5) : Caractéristiques électrique courant-tension I-V.

Cette caractéristique courant-tension est une relation entre la tension et le courant délivrés par la cellule photovoltaïque.

II.4 Les paramètres d'un panneau photovoltaïque

Les paramètres essentiels d'un panneau PV sont cités comme suit :

a La tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'irradiation. Elle est obtenue quand le courant de la cellule est nul [19].

b Le courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant I_{pv} .

c La puissance maximale P_{max}

La puissance maximale P_{max} délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au maximum du produit de la tension maximale appliquée par le courant maximale mesuré aux bornes de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E.S} \tag{II.6}$$

La puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 W/m² et à la température de 25 °C

d Le rendement

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale générée P_{max} et la puissance du rayonnement solaire, qui arrive sur la cellule photovoltaïque [19].

Où

- η : Rendement énergétique.
- E: Éclairement (W/m^2).
- S : Surface active de la cellule (m^2) .

 P_{max} : Puissance maximale(W).

e La réponse spectrale de la cellule PV

La réponse spectrale est l'une des méthodes de caractérisation utilisée pour la détermination des paramètres du dispositif durant l'étape recherche et développement et durant la production des cellules solaires. La distribution spectrale du courant est sensible à la variation des Spectres solaires.

f Le facteur de forme

Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$ comme le montre la figure (II.8). Ce facteur est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{co}} \tag{II.7}$$



Figure (II. 6) : Facteur de forme pour une cellule PV.

II.5 L'influence des paramètres extérieurs

II.5.1 Paramètres climatiques

II.5.1.1 Effet d'humidité

Au brouillard, à la rosée ou simplement à l'air ambiant, l'humidité est facteur de stress déterminant dans les mécanismes de corrosion et de délamination. Ainsi la présence d'eau dans les boites de jonctions des modules PV classiques peut entraines des court-circuit.

II.5.1.2 Effet poussière

La poussière est une poudre très fine composée de particules de diamètre inférieur à 500 µm et qui varie d'une localité à une autre en fonction de la nature du sol et de l'activité humaine. On distingue les poussières artificielles et les poussières naturelles. Les poussières artificielles sont d'origines non atmosphériques causées par l'activité de l'être humaine tels que la construction des routes, la circulation des véhicules et les poussières naturelles sont d'origine atmosphériques et liées au climat. Les expériences ont montré que, la poussière a un effet négatif sur la puissance maximal et courant de court-circuit de module photovoltaïque.

II.5.2 Paramètres de fabrication

II.5.2.1 Résistance série (R_s)

La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces partes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent représenté ci-dessous :

II.5.2.2 Résistance shunt (R_{sh})

La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.



Figure (II. 7) : Influence des résistances Rs et Rsh sur la caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.

II.6 Protection des modules PV

II.6.1 Diodes bypass

Les « diodes by passe » sont des composants électroniques permettant d'éviter les problèmes liés à l'ombrage. Ils s'associent à des réseaux de cellules photovoltaïques au sein d'un même panneau et permettent au courant de circuler en isolant la cellule ombragée afin d'éviter les baisses de production [21].

Le rôle des diodes by-pass est double :

- Protéger les cellules contre le phénomène de point chaud (hot spot) ;
- > Améliorer la performance des modules soumis à l'ombrage.

II.6.2 Les diodes anti retour

Un string présent dans un champ PV peut délivrer une tension dirent de celle des autres. Le string ayant la tension la plus faiblement produite peut nuancer les autres strings en absorbant leurs courants inverses. Cela peut conduire à une diminution du rendement et engendrer des défauts liés au passage du courant inverse dans les modules du string. Pour empêcher le passage du courant dans le chemin inverse dans le string, il est nécessaire d'ajouter des diodes [21] antiretours. Malgré leurs avantages, leur présence au niveau du système PV a pour conséquence une perte de tension qui elle-même engendre une chute de la production. D'un autre côté, ces diodes peuvent être à l'origine des défauts et exigent donc un suivi régulier. Une autre solution envisageable consiste à remplacer la diode antiretour par un fusible. Cette substitution ne permet néanmoins pas de protéger le string contre le passage du courant inverse. De plus, un dimensionnement du fusible est nécessaire si l'on souhaite que les composants du string puissent supporter le courant inverse.



Figure (II.8) : Diode anti retour.

II.7 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V

Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différents éclairements :

Sur la courbe I(V) On remarque que la valeur du courant (I_{cc}) est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

Sur la courbe P(V), on remarque que la puissance maximum délivrée par la cellule augmente avec l'éclairement.



Figure (II.9) : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V.

II.8 Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V

Les figures représentent un exemple de la courbe I(V) et P(V) d'un panneau pour différentes températures [22].

Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres.

La tension à vide et la puissance maximum diminuent très faiblement lorsque la température augmente.



Figure (II.10) : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V.

II.9 Influence de la résistance série et parallèle sur les caractéristiques I-V et P-V

Les performances des cellules photovoltaïques sont limitées pour différentes pertes d'énergie, ces pertes sont liées aux paramètres physiques et technologiques de la cellule PV, elles sont assimilables à deux résistances série et parallèle[24]. La résistance série et la résistance parallèle de cellule solaire est un paramètre parasite qui dégrade l'efficacité d'une bonne cellule, elle effectue non seulement les caractéristiques lumineuses, mais le courant dans les sombres caractéristiques est également considérablement réduit [23].

L'influence de la résistance série R_s et la résistance parallèle R_{sh} sur la caractéristique I=f(V) et P=f(V), cette influence est très importante aux forts niveaux de polarisation au voisinage de V_{co} .

II.10 Présentation de la méthode P.S.O.

L'optimisation est une branche des mathématiques qui permet de résoudre des problèmes en déterminant le meilleur élément d'un ensemble selon certains critères prédéfinis. De ce fait, l'optimisation est omniprésente dans tous les domaines et évolue sans cesse depuis Euclide.

En 1995, Russel Eberhart, ingénieur en électricité et James Kennedy, sociopsychologue, s'inspirent du monde du vivant pour mettre en place une méta-heuristique : l'optimisation par essaim particulaire. Cette méthode se base sur la collaboration des individus entre eux : chaque particule se déplace et à chaque itération, la plus proche de l'optimum communique aux autres sa position pour qu'elles modifient leur trajectoire. Cette idée veut qu'un groupe d'individus peu intelligents puisse posséder une organisation globale complexe [24].

De par sa récence, de nombreuses recherches sont faites sur la P.S.O, mais la plus efficace jusqu'à maintenant est l'élargissement au cadre de l'optimisation combinatoire. En effet, en 2000, Maurice Clerc, un chercheur de France Telecom met en place la D.P.S.O (Discrète Particule Swarm Optimization), en remplaçant les points par des ordonnancements et les fonctions continues par des fonctions d'évaluation.

Nous avons donc, afin de comprendre l'efficacité et les limites de cette approche, appliqué cette méthode au Problème du Voyageur de Commerce, un problème d'optimisation combinatoire, qui, à priori, est très mauvais pour ce genre d'heuristique d'optimisation.

Tout d'abord, nous allons vous présenter l'optimisation par essaim particulaire en continu et en discret, puis comment nous l'avons appliqué au problème du voyageur de commerce et enfin nous discuterons des résultats trouvés après avoir soumis notre algorithme à une série de tests.

II.10.1 Motivation de la P.S.O.

Pour de nombreux problèmes, il n'existe pas de solution déterministe qui donne le résultat en un temps raisonnable, et ceci malgré la création d'ordinateurs de plus en plus performants. Pour pallier à ce problème, on a recours à des méthodes dites heuristiques, c'est-à-dire des méthodes qui fournissent une solution approchée. Toutefois, il faut reproduire le processus sur plusieurs itérations pour tendre vers une solution acceptable.

On retrouve parmi ces heuristiques, certains algorithmes qui possèdent un principe générique adaptable et qui s'applique donc à plusieurs problèmes d'optimisation. On les appelle des méta-heuristiques.

La plus courante est la descente stochastique : on part d'une solution initiale, on la compare à tous ses voisins en conservant à chaque fois le meilleur résultat. L'optimisation par essaim particulaire, qui dérive de la descente stochastique, entre dans cette famille d'algorithmes. Elle s'inspire fortement des relations grégaires des oiseaux migrateurs qui doivent parcourir des longues distances et qui doivent donc optimiser leurs déplacements en termes d'énergie dépensée, comme par exemple la formation en V.



Figure (II. 11) : Volée d'Anser en formation en V.

II.10.2 Les éléments de la P.S.O

Pour appliquer la PSO il faut définir un espace de recherche constitué de particules et une fonction objective à optimiser. Le principe de l'algorithme est de déplacer ces particules afin qu'elles trouvent l'optimum.

Chacune de ces particules est dotée :

• D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition ;

- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale ;
- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère .

A tout instant, chaque particule connait :

- Sa meilleure position visitée. On retient essentiellement la valeur du critère calculée ainsi que ses coordonnées ;
- La position du meilleur voisin de l'essaim qui correspond à l'ordonnancement optimal ;
- La valeur qu'elle donne à la fonction objective car à chaque itération il faut une comparaison.

Entre la valeur du critère donnée par la particule courante et la valeur optimale.

On se rend compte, en accord avec Maurice Clerc et Patrick Siarry, que l'évolution d'une particule est finalement une combinaison de trois types de comportements : égoïste (suivre sa voie suivant sa vitesse actuelle), conservateur (revenir en arrière en prenant en compte sa meilleure performance) et panurgien (suivre aveuglement le meilleur de tous en considérant sa performance).

On voit alors que la bio-inspiration à l'origine de l'optimisation par essaim particulaire ressort dans l'algorithme sous la forme d'une intelligence collective : coordination du groupe, instinct individuel et interaction locale entre les individus (grognements, phéromones...).

On observe donc un compromis psycho-social entre confiance en soi et influence des relations sociales [25].

II.10.3 La P.S.O. pour l'optimisation continue

II.10.3.1 Principe fondamental

Nous allons donc nous intéresser à cette méta-heuristique dans le cadre où elle a, avant tout, été définie à savoir l'optimisation de fonctions continues, telle qu'elle est définie dans les travaux de Michel Gourgand et Sylverin Kemmoé Tchomté [26].

L'algorithme de base de la P.S.O. travaille sur une population appelée essaim de solutions possibles, elles-mêmes appelées particules. Ces particules sont placées aléatoirement dans l'espace de recherche de la fonction objectif. A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure position (déplacement égoïste) mais aussi la meilleure position de son voisinage (déplacement panurgien). Dans les faits, on calcule la nouvelle vitesse à partir de la formule suivante [27] :

$$V_{k+1} = c1 * Vk + c2 * (best_{particule} - position_{particule}) + c3 * (best_{voisin} - position_{particule})$$
(II.8)

Où : V_{k+1} et V_k sont les vitesses de la particule aux itérations k et k+1.

Best particule est la meilleure position de la particule

Best voisin est la meilleure position de son voisinage à l'itération k

Position particule est la position de la particule à l'itération k

c1, c2, c3 sont des coefficients fixés, c2 est généré aléatoirement à chaque itération et, en

Général, c3 = c2

On peut ensuite déterminer la position suivante de la particule grâce à la vitesse que l'on vient de calculer :

$$X_{k+1} = X_k + V_{k+1}$$
 (II.9)

Où : Xk est la position de la particule à l'itération k

On génère X0 et V_0 au début de notre algorithme.

II.10.3.2 Algorithme de principe

L'algorithme de base est très simple :

On note g la meilleure position connue de l'essaim et f(x) la fonction qui calcule le critère de x.

Pour chaque particule :

On initialise sa position

On initialise sa meilleure position p connue comme étant sa position initiale

Si f(p) < f(g), on met à jour la meilleure position de l'essaim

On initialise la vitesse de la particule.

Tant que l'on n'a pas atteint l'itération maximum ou une certaine valeur du critère :

Pour chaque particule i :

On tire aléatoire c_2 et c_3

On met à jour la vitesse de la particule suivant la formule vue précédemment

On met à jour la position xi

Si f(xi) < f(pi),

On met à jour la meilleure position de la particule

Si f(pi) < f(g), on met à jour la meilleure position de l'essaim

g est l'optimum.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons également présenté la modélisation des panneaux photovoltaïques et présente la technique PSO (l'optimisation par l'essaim particulaire). L'algorithme de PSO utilisé pour extraire les cinq paramètres électriques d'un module PV tel que : I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh} et n.

Chapitres III

Résultats et Discussions

III.1 Introduction

La cellule solaire est l'un des composants essentiels des systèmes photovoltaïques. Les modules solaires au silicium sont largement utilisés dans l'industrie photovoltaïque. La performance électrique du silicium photovoltaïque est décrite par sa caractéristique courant – tension (I – V), fonction du dispositif utilisé et des propriétés du matériau. Ce travail a porté sur la caractérisation électrique d'un panneau solaire en silicium (type monocristalline) dans des conditions externes climatique de la région de OUARGLA, pour comparer les résultats pratiques avec les performances fournies par le fabricant et pour déterminer et analyser les différents facteurs qui influent sur les performances du panneau. D'autre part, ce travail propose l'application de l'essaim de particules (PSO) pour l'identification précise de ces cinq paramètres inconnus du PV de manière à résoudre efficacement le problème de modélisation. En particulier, premièrement, nous avons modulé le module PV en utilisant l'ancienne méthode et en résolvant l'équation mathématique par la méthode newton raphson, puis nous avons estimé les cinq paramètres PV électriques par la méthode de PSO dans le but de comparer les résultats des deux méthodes.

III.2 Procédure d'installation

Les équipements expérimentaux sont situés à l'université d'Ouargla, le type de module photovoltaïque est monocristallin, en autre part pour obtenir les caractéristiques de module photovoltaïques et connaître les performances du panneau dans les conditions extérieures de la région. Pour cela, il faut connaître certains paramètres spécifiques, tels que le niveau d'irradiance solaire et la variation de la température. Les appareilles utilisés sont le solarimètre de type MGE mode est utilisé pour mesurer l'intensité des radiations solaires, ce capteur est installé sur la surface de module et le couple thermique. En outre, pour obtenir les caractéristiques des modules PV dans des conditions extérieures, on utilisé un voltmètre (MULTIMETER GDM 356) et un ampèremètre (MULTIMETER GDM 357) avec un résistance variable pour obtenir la tension et le courant du module. Dans le tableau.01 données de performance de panneau utiliser dans cette étude. La figure 1 illustre la connexion schématique PV et la configuration expérimentale utilisée pour mesurer les caractéristiques I = F (V) dans les deux cas.

Module photovoltalque monocristamin (vvc 200)					
Puissance	200 (W)				
Courant de courts circuits Icc	4.6 (A)				
Tension de circuit ouvert V_{co}	57 (V)				
Courant maximal Imax	4.3 (A)				
Tension maximal V max	47 (V)				
Longueur	1.60 m				
Largeur	1.06 m				
Dimension	1060*1620*100 mm				
Nombre des cellules solaire	96				
Type de cellule	Monocristallin				

Tableau (III. 1) : Spécification de Module 200 W à la condition STC.

Module photovoltaïque monocristallin (Wc 200)

III.3 Caractéristique d'une Cellules mono- cristallines

D'une manière générale, les panneaux monocristallins dispose d'un rendement de conversion plus élevé. Ainsi, à surface égale, un panneau mono peut produire plus qu'un panneau poly de 1% à 3%. De plus, sur un panneau Mono, la production démarre légèrement plus tôt dans la journée et s'arrête légèrement plus tard dans la soirée. C'est en fait dû à la caractéristique physique du cristal de silicium. La tension d'une cellule monocristalline sera plus élevée en comparaison avec les autres cellules à ensoleillement égal. C'est donc un choix particulièrement intéressant pour les besoins importants sur une surface plus réduite [28].

- Rendement électrique des panneaux : 15 à 20 % STC ;
- ➢ Puissance des panneaux : 5 à 300 W ;
- ➢ Gamme d'éclairement : 100 à 1 000 W/m2 ;
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance : télécoms, habitat, centrales et toits solaires [29].

III.4 Modélisation de panneau solaire

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle. On présente le schéma du circuit électrique par la Figure (III.4) :



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

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabriquant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[exp\left(\frac{q\left(V_{pv} + \left(I_{pv} \times R_s \right) \right)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + \left(I_{pv} \times R_s \right)}{R_{sh}}$$
(III. 1)

Où V_{pv} , I_{PV} sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau, I_{ph} est la photo courant en ampère, I_s Courant dans la diode en ampère, R_s est la résistance série en ohm, R_{sh} est la résistance shunt en ohm, q est la charge de l'électron $q = 1.602. 10^{-19}$ coulomb, k est la constante de Boltzmann $K = 1.381. 10^{-23}$ est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2 [30].

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie ($R = \infty$), l'équation (III.1) devienne

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s} \left[exp\left(\frac{q\left(V_{pv} + \left(I_{pv} \times R_{s} \right) \right)}{nKT} \right) - 1 \right]$$
(III.2)

Où

I_{pv} le courant fourni par la cellule PV et V_{pv} est la tension aux bornes de la cellule PV. Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différentes éclairements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements. L'équation d'I_{cc} et I_s précédentes sont valables pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser les calculs pour différentes éclairements et températures, nous utilisons les équations suivantes [31]:

$$I_{cc} = I_{cc}(T_{ref}) [1 + \alpha (T - T_{ref})]$$
 (III.3)

$$I_0(T) = I_0(T_{\text{ref}}) \cdot \left(\frac{T}{T_{\text{ref}}}\right)^3 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot E_g}{nk}\right) \cdot + \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\text{Tref}}\right)\right]$$
(III.4)

$$I_0(T_{\text{ref}}) = \frac{I_{cc}(T_{\text{ref}})}{\exp\left(\frac{V_{co}}{N * V_T}\right) - 1}$$
(III.5)

Le courant de photopile devient [32]:

$$I_{\rm ph} = I_{\rm cc} \left(\frac{\rm G}{1000}\right) \tag{III.6}$$

Où α est le coefficient de variation du courant en fonction de la température, Tref est la température de référence, 298k (25°C) et G est l'irradiation solaire. L'équation de la caractéristique I=f(V) (III.1) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(Xn)}{f'(Xn)}$$
(III.7)

Où f'(Xn)est la dérivée de la fonction f'(Xn), Xn est la présente itération et X_{n+1} est l'itération suivante.

La réécriture de l'équation (III.7) donne la fonction suivante :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_s \left(exp\left(\frac{q\left(V_{pv} + \left(R_{ser} * I_{pv}\right)\right)}{nVT}\right) - 1\right) = 0 \quad (III.8)$$

En remplaçant dans l'équation (III.7), on calcule le courant (I) par les itérations :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_s(exp\left(\frac{q\left(V_{pv} + \left(R_{ser} * I_{pv}\right)\right)}{nVT}\right) - 1) - In}{-1 - I_s\left(\frac{Rser}{nVT}exp\left(\frac{q\left(V_{pv} + \left(R_{ser} * I_{pv}\right)\right)}{nVT}\right)\right)}$$
(III.9)

III.5 Validation de modèle de translation de la caractéristique (I-V)

Pour valider le modèle mathématique de translation des caractéristiques (I-V) que nous avons présenté, nous avons simulé les caractéristiques (I-V) pour les différentes valeurs d'éclairement et de température par l'utilisation de notre organigramme exécuté sous Matlab [33].

Présentation des résultats

III.5.1.1 Comparaison des caractéristiques expérimentales et simulées de sortie PV

Les caractéristiques (I-V) et (P-V) du panneau 200 Wc expérimentales et simulés et les points des puissances maximales correspondantes dans les figures (III.3) et (III.4). Les résultats expérimentaux et simulé montrent qu'au point de puissance maximale la tension était de 42 V et le courant était de 4.5A [35].



Figure. (III. 2) : Caractéristique I-V expérimentale et simulé de module 200 Wc.



Figure. (III. 3) : Caractéristique P-V expérimentale et simulé de module 200 Wc.

III.5.1.2 Translation des courants de courts circuits et des tensions de circuits Ouvert

Nous présentons les résultats des mesures sur un module solaire type 200Wc installé dans notre site d'expérimentation et les résultats de simulation avec notre modèle. Le tableau (III.2) donne les résultats des translations lorsque en appliquant la méthode de translation.

L'erreur relative est calculée par la relation suivante :

Er, x(%) =
$$\frac{X_{cal} - X_{mes}}{X_{mes}} * 100$$
 (III.10)

Avec X: Icc, Vco.

 X_{mes} : La valeur mesurée

X_{cal} : La valeur calculée ;

Er, x: L'erreur ;

Tableau (III. 2) : Résultats Comparatifs Selon le Modèle de Simulation et les Mesures.

$E (W/m^2)$	960	960	1000	850	900
T_{mod} (•C)	45	36	38	44	49
$I_{cc\ cal}$ (A)	5.15	5.17	5.49	4.45	4.95
Icc mes (A)	4.91	4.91	5.5	4.41	5.28
V _{comes} (V)	50	53	49.7	50.9	56.31
$V_{co\ cal}$ (V)	49.2	53.2	50.8	49.4	56.4
E _{r Icc} (%)	0.04	0.05	-0.18	0.01	-1.98
Er Vco (%)	-0.02	0.004	1.66	-0.03	0.15

Les indicateurs statistiques utilisés sont la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) donnés par les équations (III.11) et (III.12) respectivement.

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\sum_{1}^{N} \frac{1}{N} (\mathbf{X}_{cal} - \mathbf{X}_{mes})^2}$$
(III.11)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (X_{cal} - X_{mes})$$
(III.12)

Où I_{cal} et I_{exp} sont respectivement les courants calculés et mesurés et N : nombres des points mesurés. En comparant les valeurs simulées avec les valeurs mesurées, on constate que les résultats sont pratiquement identiques. Le RMSE maximum entre les valeurs simulées et observées, fourni par le mesuré, a été présenté ci-dessous. Ceci indique que le modèle utilisé pour la simulation des quatre modules photovoltaïques est valide [34].

Erreur (%)	RMSE	MAE
Tension de circuit ouvert V_{co}	0.3300	-0.0073
Courant de court-circuit I _{cc}	0.0787	0.0016

Tableau (III. 3) : Les erreurs calculée et mesurée par jour.

III.6 Le principe de l'algorithme de PSO

Dans cette section, l'objectif recherché est l'amélioration de la précision de l'identification des paramètres de panneau photovoltaïque.

Le but de l'algorithme de PSO est de trouver une solution pour la fonction à minimiser dite fonction objective, dont le but est de minimiser l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui calculé à partir du modèle adopté du PV.

Le principe de l'algorithme peut être plus facilement visualisé grâce à la figure suivante :



Figure. (III. 4) : Organigramme de la méthode des essaims particulaires [36].

L'algorithme de PSO a été codé dans l'environnement MATLAB pour extraire les paramètres du module PV à l'aide de données réelles I-V. Afin de vérifier l'efficacité de l'extraction des paramètres obtenus par l'application de cet algorithme, les données de mesure collectées à partir du module ont été utilisées.





Figure. (III. 5) : Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode PSO pour T=40°C.



Figure. (III. 6) : L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés par la méthode à T=40°C.

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques théoriques (I_V) et (P_V) sont très proches des caractéristiques expérimentales mesurées (I_V) et (P_V) respectivement. Les résultats prouvent l'efficacité de la technique proposée pour extraire avec une bonne précision les paramètres du modèle de circuit équivalent.

III.7 Estimation des cinq paramètres

III.7.1 Résultats de la méthode conventionnel et la méthode PSO

Afin de valider la méthode d'identification par la méthode conventionnelle et la méthode PSO, nous allons l'appliquer sur les caractéristiques I-V et P-V d'un PV du modèle à une diode.

Les tableaux (III-4), (III-5), (III-6) et (III-7) montrent les paramètres identifiés du panneau photovoltaïque pour les températures et éclairements différentes suivantes

a. 1^{er} Cas variation de température

Dans le but d'avoir l'effet de température sur les cinq paramètres électriques d'un panneau photovoltaïque. Les paramètres électriques extraits dans les tableaux (III.5) (III.6) à l'aide de l'expression du modèle à une diode à la variation de température. Ces tableaux présentent une comparaison entre les paramètres (I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh}, n) électriques d'un module PV simulées avec la méthode conventionnelle et les mêmes paramètres électriques d'un module PV estimé par la méthode PSO.

	Méthode conventionnelle							
E=950 W/m ²	I _{ph} (A)	I _s (A)	R _s	R _{sh}	n			
T=36°C	4.3700	9.5896e-07	0.3509	139.4785	1.3			
T=44°C	4.3700	5.3087e-06	0.3838	137.7585	1.3			
T=49°C	4.3700	1.4682e-05	0.4364	134.5709	1.3			

Tableau (III. 4): Résultats de la méthode conventionnel l'éclairement constant.

Tableau (III. 5) : Résultats de la méthode PSO l'éclairement constant.

	Méthode de PSO							
E=950 W/m ²	I _{ph} (A)	I _s (A)	R _s	R _{sh}	n			
T=36°C	4.6503	5.0500e-06	0.1000	955	1.5720			
T=44°C	4.6800	5.5450e-06	0.1500	950	1.4250			
T=49°C	4.7000	5.5750e-06	0.4000	730	1.3733			

Les tableaux (III.4), (III.5) montrent les cinq paramètres d'un module PV type monocristallin sous un éclairement fixe ($E=950 \text{ w/m}^2$) et des températures variables (36°C, 44°C, et 49°C) pour les deux différentes méthodes (Méthode conventionnelle et

méthode de PSO). On remarque que le courant de photon (I_{ph}) d'une cellule solaire augmente généralement légèrement avec l'augmentation de la température.

Cette augmentation est due à la décroissance de la largeur de la bande interdite (Eg) du matériau semi-conducteur ; ce qui permet d'utiliser un peu plus de photons de basse énergie. En conséquence, le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule augmente [37]. Sous un éclairement constant la variation de (I_{cc}) en fonction de la température dans une gamme thermique étroite pour les cellules solaires au silicium est très petite et peut être insignifiante.

La dépendance de I_s avec la température est montrée sur les tableaux (III.4) et (III.6), on constate que l'augmentation de la température dans la gamme concernée (288-323 K) mène à une augmentation du courant de saturation d'une manière exponentielle traduit par la relation :

$$I_{s} = (I_{cc} + a_{i} * dT) / (exp((V_{co} + a_{v} * dT) / V_{t}) - 1)$$
(III.14)

L'allure de n en fonction de la température est illustrée dans les tableaux III.5 et III.7. On peut voir que l'augmentation de la température mène à une diminution de n; il diminue de 1.2918 à 1.8322 dans l'intervalle de température considéré, i.e. T=288-323 K, soit une petite variation relative Ce résultat est en bon accord avec ceux obtenus dans la littérature [42, 43, 44, 45].

b. 2^{eme} Cas variation d'éclairement

Dans le but d'avoir l'effet de niveau de l'éclairement sur les cinq paramètres électriques d'un panneau photovoltaïque. Les paramètres électriques extraits dans les tableaux (III.6) et (III.7) à l'aide de l'expression du modèle à une diode à la variation de l'éclairement. Ces tableaux présentent une comparaison entre les cinq paramètres (I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh}, n) électriques d'un module PV simulées avec la méthode conventionnelle et les mêmes paramètres électriques d'un module PV estimé par la méthode PSO.

Méthode conventionnelle							
T=49 °C	I _{ph} (A)	I _s (A)	$\mathbf{R}_{\mathbf{s}}\left(\Omega\right)$	$\mathbf{R_{sh}}\left(\Omega ight)$	n		
E=800	3.6800	1.4682e-05	0.3509	153.8683	1.3		
E=900	4.1400	1.4682e-05	0.3509	142.0209	1.3		
E=1000	4.6000	1.4682e-05	0.3509	138.5202	1.3		

Tableau (III. 6) : Résultats de la méthode conventionnel température constant.

Tableau (III. 7): Résultats de la méthode PSO température constant.

	Méthode de PSO						
T=49°C	I _{ph} (A)	I _s (A)	$\mathbf{R}_{\mathbf{s}}\left(\Omega\right)$	$\mathbf{R_{sh}}\left(\Omega \right)$	n		
E=800	4.5000	4.1806e-05	0.6041	910	1.4921		
E=900	4.6500	9.01000e-05	0.5000	595	1.2707		
E=1000	4.7000	5.6484e-05	0.4042	370	1.3575		

Les tableaux (III.6), (III.7) présent les cinq paramètres (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , n) d'un module PV monocristalline sous une température fixe ($T=49^{\circ}C$) et des éclairements variable (1000, 900 et 800 W/m²), On remarque que l'augmentation de l'intensité solaire a causé une augmentation remarquable de la valeur de courant I_{ph} du panneau photovoltaïque. Alors on constate que la courant I_{ph} délivrée est proportionnelle à celle du rayonnement reçu. Lorsque l'intensité solaire est élevée, elle conduit à augmenter à la fois de la production d'énergie électrique et de chaleur. Pour les deux méthodes utilisé (la méthode conventionnelle et la méthode PSO), Tandis que la résistance R_{sh} diminue dans le cas de la méthode de PSO, et il reste presque constant pour le cas de la méthode conventionnelle. On observe aussi que le courant Is, la résistance Rs, le facteur d'idéalité n reste constant malgré la variation de l'éclairement,

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi-conducteurs électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. Les résultats montrent le comportement de R_s en fonction de la

température. On constate que l'augmentation de la température mène à une augmentation de R_s ; c'est le résultat obtenu par plusieurs auteurs [38, 39, 40].

La résistance parallèle (shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau, épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace. L'existence de fissures et de défauts de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle [37]. Ainsi qu'au non idéalité de la jonction PN [41] les résultats montrent le comportement de R_{sh} en fonction de la température. On constate que l'augmentation de la température mène à une diminution de R_{sh} c'est le résultat obtenu par plusieurs auteurs [38, 39].

 Tableau (III. 8) : Résultats Comparatifs Selon le Modèle conventionnel/ la méthode PSO.

	T(°c)	$E(W/m^2)$	I_{cc}	$V_{\text{co cal}}$	P _{maxca}	I_{cc}	V_{comes}	P Max, mes
			cal	(V)	(W)	mes	(V)	(W)
			(A)			(A)		
Méthode Conventionn el Méthode PSO	40	820	4.27	48.5	151.66	4.48	50.9	172.54
	49	1000	5.1	47.6	176.92	5.48	<i>49.7</i>	173.94
	40	820	4.50	50.8	172.5	4.48	50.9	172.54
	49	1000	5.49	<i>49.7</i>	176.9	5.48	<i>49.7</i>	173.94

Tableau (III. 9) : l'erreur relative entre le modèle conventionnel/ la méthode PSO.

	Métho Convent	ode ionnel	Méthode PSO		
	T=40°C et E=820 W/m ²	T=49°C et E=1000 W/m ²	T=40°C et T=49°C E=820W/m² E=1000W		
$E_{r\ Icc}$	-0.04	-0.06	0.004	0.0018	
E_{rVco}	-0.047	-0.042	-0.00196	0.00182	
Er Pmax	-0.12	0.017	-0.0002	0.01	

Dans le tableau (III.9) on remarque que l'erreur relative calculé de module PV par la technique PSO avait un bon comportement et un résultat acceptable avec une faible erreur. Dans le but de comparer la méthode PSO et la technique conventionnelle, il a calculé l'erreur de la dernière technique pour pouvoir la comparaison avec la méthode AI (méthode de PSO), alors le comportement de l'IA a un meilleur comportement et moins d'erreurs que la technique conventionnelle.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le panneau solaire type monocristallin, on a utilisé le modèle d'une seule diode pour calculer les cinq paramètres électriques (I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh}, n) et tracer les caractéristiques (I-V), d'autre part nous avons appliqué la méthode d'optimisation qui est les essaims de particules pour l'extraction des paramètres électriques de la cellule PV. Le modèle à cinq paramètres est considéré. L'optimisation par essaim de particules est utilisée comme outil d'optimisation pour augmenter la probabilité d'atteindre les solutions minimales globales en peu de temps avec une très bonne précision basée sur la minimisation de l'erreur quadratique entre les caractéristiques expérimentales et théoriques. Les résultats de la simulation montrent que la précision de l'approche heuristique est efficace pour la modélisation dans le cas des modules solaires.

Conclusion Générale

L'énergie solaire a l'avantage d'être une énergie propre non polluante pour l'environnement et inépuisable. L'effet photovoltaïque (PV) est un des manières d'exploitation de l'énergie en transformant l'énergie des photons en électricité au moyen des cellules solaires. Les performances d'un système PV dépendent fortement des conditions climatiques, telles que l'ensoleillement et la température. Le dimensionnement correct d'un système PV est important pour assurer une fourniture l'énergie continuellement durant toute l'année. Une étude profonde et rigoureuse est exigée dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Malheureusement les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV

La possibilité de prédire les performances d'un générateur photovoltaïque dans diverses conditions d'éclairement solaire et de température est très importante pour le dimensionnement des générateurs photovoltaïques ainsi que pour la conception des stratégies de suivi et de régulation du point de puissance maximale. À cette fin, plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à la modélisation et à l'extraction des paramètres des modules PV car c'est l'élément clé de la chaîne de production d'énergie, non seulement pour accroître leurs performances, mais également pour simuler leur comportement et optimiser leurs différentes caractéristiques.

La détermination des paramètres de cette équation caractéristique joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Après la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique de la cellule ainsi que le générateur photovoltaïque sous l'influence de la température, l'éclairement et la résistance série/parallèle. Ce travail propose l'application de l'algorithme de PSO pour extraire les cinq paramètres électriques d'un module PV tel que : Iph, Is, Rs, Rsh et n. L'algorithme proposé a été appliqué au module type monocristallin de puissance 200W. Les paramètres extraits ont été intégrés dans l'équation caractéristique, puis testés par rapport aux mesures de courbes I-V. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de la méthode PSO proposé pour extraire les paramètres du module PV. Enfin, une étude comparative avec la méthode conventionnelle a montré les bons résultats s'est avéré être un bon optimiseur pour la détermination des paramètres électriques des modules. D'après les résultats obtenus de la simulation Matlab, on peut dire que : La température et l'éclairement ont un impact important sur les performances des modules, et donc sur la conception et la production de générateur PV. Un bon modèle de prédiction est basé directement sur l'identification précise des paramètres inconnus du modèle, qui régissent la relation de courant-tension de module photovoltaïque.
[1] : D. Boukheres, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.

[2] : B. Chaouki, B.Tarek, « Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau », Mémoire Ingénieur, Université de Biskra, 2007.

[3] : http://www.thermesciel.Fr.

[4] : R. Chenni, « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire », Thèse Doctorat, Université de Constantine, 2007.

[5] : B. Omar, C. Idris, « L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspectives », Mémoire Ingénieur, Université de Biskra, 2006.

[6] : R. Maouedj, « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah ». Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2005.

[7] : C. Tranain, « Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques », Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur D.U.T. Mesures Physiques Mai 2006/Juillet 2006, Université Paris VII.

[8] : <u>www.hallou-solaire.com.consulté</u> le 13/04/2022

[9] : <u>https://www.les-energies-renouvelables.eu.consulté</u> le 14/03/2022

[10]: O. Otsmane, Y. Diboune, « Identifiction des paramètres d'un panneau photovoltaïque à l'aide d'un algorithme de colonies de fourmis », Mémoire de Master en Electrotechnique, option : machine électrique, 2020.

[11] : <u>https://www.jade-technologie.com.consulté</u> le 21/03/2022

[12] : F. Lasnier, TC. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », Institute of Physics Publishing, 1990.

[13]: L. Castañer, S. Silvestre, « Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice ».John Wiley & Sons Ltd., 2002.

[14] : Y. Mahmoud, W. Xiao, et H. Zeineldin, « A Simple Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Modules ». IEEE Transactions on Sustainable Energy,vol 3, N° 1, pages 185-186, 2012.

[15]: F. Giamarchi. « Cellule Solaire : Modèle Spice », Fiche technique, I.U.T. de Nîmes,Départ GE2I, 2008.

[16] : MG. Villalva, JR. Gazoli, and ER. Filho ,« Comprehensive approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays », IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.

[17]: https://energieplus-lesite.be.consulté le 15/04/2022

[18] : <u>http://www.photovoltaique.guidenr.fr.consulté</u> le 15/04/2022

[19] : H. Yatimi, E. Aroudam, et M. Louzazni, « Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK ». MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, pages 1-5, 2014.

[20] : I. zait, N. medjahed, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master en Génie mecanique ,universitaire Belhadj Bouchaib , 2019.

[21] : <u>https://www.energreen.be.consulté</u> le 16/04/2022

[22] : M. telidjaine, « Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic », Thèse de doctorat de l'université de lyon, Spécialite traitement de signal, 2017.

[23] : JD. Arora, AV. Verma et M. Bhatnagar. « Variation of series resistance with temperature and illumination level in diffused junction poly-and single-crystalline silicon solar cells ». Journal of materials science letters, vol. 5, pages 1210-1212, 1986.

[24] : FZ. Zerhouni. « Etude de l'influence de différents agents sur les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque ». Revue Technologique et Scientifique 'COST', ENSET, N°4, pages 39-44, Oran, 2006.

[25] : M. BOMBRUN, A. SENE, « L'optimisation par essaim particulaire pour des problèmes d'ordonnancement », Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de leurs Applications, France, 2011.

[26]: M. CLERC, P. SIARRY. « Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile :la méthode des essaims particulaires », Journal sur l'enseignement des sciences et technologiesde l'information et des systèmes, Vol. 3, NO° 07, 2004.

[27] : M. GOURGAND et SK. TCHOMTE. « Particle Swarm Optimization: A study of particle displacement for solving continuous and combinatorial optimization problems », International Journal of Production Economics, Vol. 121, Pages 57-67, 2009

[28] : https://www.myshop-solaire.com/quelle-difference-entre-des-panneaux-solairesmonoet-poly--_r_80_a_182.html.

[29] : A. LABOURET, P. CUMUNEL, J. PAUL BRAUN et B. FARAGGI, « Cellules Solaires-Les bases de l'énergie photovoltaïque- ». 5e édition, Paris, 2010.

[30] : A. Rouabah, F. Hananou, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque »,Mémoire de Master en Electrotechnique industrielle, Université de Ouargla, 2014.

[31]: Khezzar, R., M. Zereg, and A. Khezzar. "Comparative study of mathematical methods for parameters calculation of current-voltage characteristic of photovoltaic module." 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009. IEEE, 2009.
[32]: K. Kachhiya, M. Lokhande, M. Patel. « MATLAB/Simulink Model of Solar PV Module and MPPT Algorithm », National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, 2011.

[33] : abd. e. Mouly et M. Hamdou, « Etude et modélisation d'un module photovoltaïque installé à ouargla », Mémoire de master, Université de Ouargla, 2018.

[34] : I.H. MAHAMMED, A. HADJ ARAB, S. BERRAH et S. HAMID OUDJANA.
« Modélisation du générateur photovoltaïque par réseau de neurone sur site de Ghardaia ». Le
2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables(URAER), Ghardaïa
– Algérie, 2012.

[35] : I. Hadj Mahammed, Y. Bakelli, S. Hamid Oudjana, A. Hadj Arab, S. Berrah. « Selection of a proper model based on PV modules under outdoor characteristics ». IEEE 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, Italy, 2012.

[36] : BOUZID Allal El Moubarek. « Optimisation par la méthode des essaims particulaires d'une fonction trigonométrique ». Article universitaire, Ecole Normale Supérieurs d'Enseignement Technique -ORAN-, 2009.

[37] : Th. DJELLOUT et S. MAKOUR. « Etude de l'effet de la température et de l'éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe ». Mémoire de Master, Université de MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU, 2017.

[38] : J. Ding, X. Cheng, T. Fu. « Analysis of Series Resistance and P-T Characteristics of the Solar Cell ». Vacuum, Vol. 77, N° 2, pages 163–167, 2005.

[39]: P. Singh, S.N.Singh, M. Lal, M.Husain. « Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell ». Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 92, N°12, pages 1611–1616, 2008.

[40] : E. Radziemska. « Dark I–U–T Measurements of Single Crystalline Silicon Solar Cells ». Energy Conversion and Management, Vol. 46, N°9-10, pages 1485–1494, 2005.

[41] : L. BOUCERREDJ. « MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE PAR LA COMMANDE MPPT ». Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism Vol. 5, N° 5, pages 197-205, 2021.

[42] : J. Verschraegen, M. Burgelman, J Penndorf, Thin Solid Films 480-481 (2005) 307-311

[43]: U. Rau, H.W. Schock. « Electronic properties of Cu(In,Ga)Se2 heterojunction solar cells–recent achievements, current understanding, and future challenges ». Applied Physics A, Vol. 69, N°2, pages 131–147, 1999.

[44] : P. Würfel et U. Würfel. « Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts ». 3e edition, WILEY-VCH, 2005.

[45] : S. BENSALEM. « Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires ». Mémoire de MAGISTER, Université de FERHAT ABBAS – SETIF, SETIF, 2011.

Résumé :

ملخص:

يقدم هذا العمل نمذجة البار امتري للوحة الكهروضوئية (PV) يتم إعطاء نظرة عامة على النمذجة الكهروضوئية. يسمح نهج بتحديد المعلمات الكهربائية لـ PV باستخدام metaheuristic يسمى خوارزمية سرب الطيور. تم تطوير خوارزمية سرب الطيور لتقليل الوظيفة الموضوعية التي يتم تقديمها كجذر متوسط الخطأ التربيعي بين التيار المقاس وتلك المحسوبة من النموذج المعتمد من PV. تم الوظيفة الموضوعية التي يتم تقديمها كجذر متوسط الخطأ التربيعي بين التيار المقاس وتلك المحسوبة من النموذج المعتمد من PV. تم الوظيفة الموضوعية التي يتم تقديمها كجذر متوسط الخطأ التربيعي بين التيار المقاس وتلك المحسوبة من النموذج المعتمد من PV. تم الحصول على النتائج في درجات حرارة مختلفة (36 درجة مئوية و 40 درجة مئوية و 49 درجة مئوية و 99 درجة مئوية و 99 درجة ملوية و 99 درجة ملوية) وإضاءة ثابتة (950 = 200 والح / م²) ، وكذلك عند الإضاءة المختلفة (100 و 900 و 800 والح / م²) و درجة حرارة ثابتة (94 = 1000 و 900 والح / م²) و درجة حرارة ثابتة (94 = 1000 والح العوامل المختلفة التي تؤثر على أداء اللوحة. يتم تأكيد النتائج من خلال التراكب الجيد للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد من PX. تم معني تؤثر على أداء اللوحة. يتم تأكيد النتائج من خلال التراكب الجيد للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد من PX. مع مد الختلفة التي تؤثر على أداء اللوحة. يتم تأكيد النتائج من خلال التراكب الجيد للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد المختلفة التي تؤثر على أداء اللوحة. يتم تأكيد النتائج من خلال التراكب الجيد للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد المختلفة التي تؤثر على أداء اللوحة. يتم تأكيد النتائج من خلال التراكب الجيد التيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد المختلفة التي التواحة المولي التراكب الجيد التيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد المختلفة التي تؤثر على أداء اللوحة. يتم تأكيد النتائج من خلال التراكب الجيد التيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد المحسوبة بولي المولي التواحة المولي المولي ملولي المولي المولي المولي المولي ملولي المولي مالي من PV.

كلمات المفاتيح: الوحة الكهروضوئية ، خوارزمية سرب الطيور ، المعايير الكهربائية، نمذجة

Résumé :

Ce mémoire présente la modélisation d'un panneau photovoltaïque (PV). Un aperçu sur la modélisation de PV est donné. L'approche d'identification permet de déterminer les paramètres électriques d'un PV à l'aide d'une métaheuristique nommée l'algorithme de l'essaim de particules (PSO). L'algorithme de PSO est développé pour la minimisation de la fonction objective définie par la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre le courant mesuré et celui calculé à partir du modèle adopté du PV. Les résultats sont obtenus à des températures différentes (36°C, 40°C et 49°C) et un éclairement fixe (E= 950 w/m²), ainsi à des éclairements différentes (1000, 900 et 800 W/m²) et une température fixe (T= 49°C), pour analyser les différents facteurs qui influent sur les performances du panneau. Les résultats sont confirmés par la bonne superposition des courants mesurés et ceux calculés par le modèle adopté du PV.

Mots clés : Identification, panneau photovoltaïque, modélisation, algorithme PSO.

Abstract :

This work presents the photovoltaic panel (PV) modulization. An overview on PV modeling is given. The PV identification approach allows the electrical parameters to be determined using a metaheuristic called Particle swarm optimization (PSO). The PSO algorithm is developed for the minimization of the objective function which is presented as the root mean square error between the measured current and that calculated from the PV adopted model. The results are obtained at different temperatures (36°C, 40°C et 49°C) and fixed illumination (E= 950 w/m²), as well as at different illuminations (1000, 900 and 800 W/m²) and a fixed temperature (T= 49°C), to analyze the different factors that influence the performance of the panel. The results are confirmed by the correct superposition of the measured currents and those calculated by the adopted model of the PV.

Keywords : Identification, photovoltaic panel, modelisation, Particle swarm optimization, PSO algorithm.