REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : 03/2019

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : MICRO ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

BAADJI Ahlam CHERGUI Imane

Intitulé

Extraction des Paramètres du Module Photovoltaïque

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. BOUCHAMA Idris	Université de M'Sila	Président
Dr. OUDIRA Houcine	Université de M'Sila	Rapporteur
Mme. CHABAN Rayan	Université de M'Sila	Examinateur

Année universitaire : 2018/2019

Résumé

La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la relation courant tension (IV). La détermination des paramètres, de cette dernière, joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Ce travail présente une application de la méthode de simplex de Nelder_Mead pour identifier les paramètres inconnus du modèle qui régissent la relation courant-tension d'une cellule solaire. Afin d'évaluer l'efficacité des paramètres extraits, un modèle d'une diode (ODM) a été utilisé et comparé aux données mesures d'un système connecté au réseau situé dans le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) à Alger. Les paramètres extraits ont été testés par rapport à plusieurs caractéristiques IV statiques du module PV collectées dans différentes conditions de fonctionnement. Une étude comparative entre différentes techniques d'estimation de paramètres est présentée pour démontrer l'efficacité de l'approche proposée.

Mots clés : Cellules Solaires, Modélisation, Nelder_Mead, Extraction, ODM.

Abstract

Solar cell modeling primarily involves the formulation of the non-linear current versus voltage (IV) relation. Determination of parameters plays an important role in solar cell accurate modeling. This work presents an application of the Nelder_Mead simplex search method for identifying the unknown model parameters that govern the current-voltage relationship of a solar cell. In order to assess the effectiveness of the extracted parameters, one diode model has been used and compared to real measurements data of a grid connected system located in the Centre de Developpement des Energies Renouvelables (CDER) in Algiers. The extracted parameters have been tested against several static IV characteristics of the PV module collected at different operating condition. Comparative study among different parameter estimation techniques is presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Keys words: Solar cell, Modeling, Nelder_Mead, Extraction, and ODM.

الملخص :

يتضمن نمذجة الخلايا الشمسية بشكل أساسي صياغة علاقة الجهد الحالي(IV). يلعب تحديد معايير الأخير دورا مهما في النمذجة الدقيقة للخلايا الشمسية. يقدم هذا العمل تطبيقا للأسلوب البسيط نلدر ميد لتحديد معلمات النموذج غير المعروفة التي تحكم علاقة الجهد الحالي للخلية الشمسية.

لتقييم كفاءة المعلمات المستخرجة, ثم استخدام نموذج من الصمام الثنائي(ODM) و مقارنته مع بيانات القياس لنظام متصل بالشبكة الموجودة في مركز تطوير الطاقة المتجددة (CDER) في الجزائر العاصمة.

تم اختبار المعلمات المستخرجة مقابل عدة خصائص(IV) ثابتة من وحدة الكهروضوئية التي تم جمعها في ظل ظروف التشغيل المختلفة.

تم تقديم دراسة مقارنة بين أساليب تقدير المعلمة المختلفة لإثبات فعالية النهج المقترح.

الكلمات المفتاحية الخلايا الشمسية, النمذجة, نلدر ميد, استخراج, ODM.

REMERCIEMENTS

Remerciements

Nous remercions tout d'abord dieu pour nos 'avoir donné le courage et la force de mener à bien ce travail.

Nous remercions particulièrement notre encadreur monsieur **HOUCINE OUDIRA** pour sa patience, sa confiance, ses remarques, ses conseils, sa disponibilité et sa bien vaillance. Qu'il trouve ici le témoignage de notre profonde gratitude.

Nous voulons aussi à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous remercie tous nos enseignants du département d'électronique en particulier ceux de la filière Micro électronique pour leur orientation pendant notre formation pour toutes leurs remarques et critiques constructives.

Nous remercions également toutes les personnes présentes dans la salle.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICASES

Dédicaces

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents DJAMILA et ABD ERRAHMANE, que dieu les garde et les Protège pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères WISSAM EDDINE et MOHAMMED AMINE

Et mes sœurs IBTISSAM, WIAM et MARIEM que dieu Protège

A toutes familles BAADJI,

Aux chers amis (es)

A que j'aime et qui m'aime

A tous mes collègues d'études surtout ceux De Micro électronique

AHLAM

Dédicaces

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail à ceux que sont Les plus chers À mon cœur, mes parents : Lakhdar et Dalila qui m'ont encouragé au cours de ma formation.

A mes très chers frères Aymen et Ahmed, mes sœurs Amira et Kholoud et a toutes la famille CHERGUI.

Tous mes amis Tous mes collègues d'étude. Toute la promotion de 2éme année Master

IMANE

SOMMAIRE

Sommaire

Résumé ……i

Remerciements ……ii

Dédicaces ……iii

Sommaire ……x

Abréviation et symboles ……xiv

Liste des figures et liste des tableaux ……xvii

Introduction générale …… ……1

Chapitre I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction ……5

I.2 Energie solaire ……5

I.2.1 L'énergie solaire thermique ……6

I.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque ……6

I.3 Effet Photovoltaïque ……6

I.4 Rayonnement solaire ……8

I.4.1 Différents types de rayonnement …… ……9

I.4.1.1 Rayonnement direct ……9

I.4.1.2 Rayonnement diffus ……10

I.4.1.3 Rayonnement réfléchi ……10

I.4.1.4 Rayonnement global ……11

I.5 Le gisement solaire en Algérie ……11

I.6 Cellule photovoltaïque ……12

I.6.1 Principe de fonctionnement ……13

I.7 Différentes technologies de la cellule photovoltaïque ……...…..13

I.7.1 Les cellule Multi-jonction ……...……14

I.7.2 les Cellules monocristalline ……...……..14

I.7.3 Cellules polycristalline……...……..15

I.7.4 Cellule amorphe ……..……15

I.8 Générateur photovoltaïque ……....15

I.8.1 Groupement des cellules ……..……....16

I.8.1.1 Groupement en série …….……...….16

I.8.1.2 Groupement en parallèle ……...…16

I.8.1.3 Groupement (série et parallèle) ……16

I.8.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque …….…..…17

I.8.3 Facteur de forme FF……..18

I.8.4 Le rendement ɳ …….……..……...…18

I.9 Avantages et inconvénients de la photovoltaïques ……19

I.9.1 Avantages ……...…..19

I.9.2 Inconvénients ……...……...……19

I.10 Conclusion ……..…….……...20

Chapitre II : modélisation de générateur photovoltaïque

II .1 Introduction ……..……..……..…22

II.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire …….…..…22

II.2.1 Cas d'une cellule idéale ……....…22

II.2.2 Cas d'une cellule réelle ……..23

II.3 Module photovoltaïque GPV et ses performances ……...……26

II.3.1 Groupement de Cellules Photovoltaïques ……..…..26

II.3.2 Influence de l'association série des cellules PV ……...….26

II.3.3 Influence de l'association parallèle des cellules PV ……..…27

II.3.4 Association série-parallèle ……..…...…28

II.4 Simulation d'une cellule photovoltaïque ……..……...……29

II.4.1 Caractéristiques I(V) et P(V) ……..……...29

II.5 Simulation d'un générateur Photovoltaïque ……..……31

II.5.1 Caractéristique (I_V) (P_V) ……...…..…….31

II.6 Influence de paramètres climatiques sur un générateur photovoltaïque …..……32

II.6.1 Influence de l'éclairement sur le générateur ……...……..31

II .6.2 Influence de la température sur le générateur ……...……..33

II.7 Influence de paramètre électrique sur un générateur photovoltaïque ……..…34

II.7.1 Influence de la résistance série sur un générateur photovoltaïque ……...…..35

II.7.2 Influence de la résistance shunt sur le générateur photovoltaïque ……35

II.8 Conclusion ……...……...……..36

Chapitre III : Extraction des paramètres par l'algorithme proposé

III.1 Introduction ……..……..38

III.2 Modélisation de module photovoltaïque ……...…..……..38

III.3 Principe d'optimisation ……...……..……40

III.4 L'algorithme de Nelder_Mead ……..……...42

III.4.1 L'organigramme de Nelder_Mead ……..……...……44

III.5 L'algorithme génétique ……..……..…….45

III.5.1 L'organigramme L'algorithme génétique ……..……46

III.6 Résultat de la simulation ……..…….46

III.6.1 Comparaison de la méthode Nelder_Mead avec l'algorithme génétique…51

III.7 Conclusion ……...……...…54

Conclusion générale ……...56

Bibliographies……..58

Liste des symboles et des abréviations

Ev	Energie de la bonde de valence
Iph	Courant photo généré ou photo courant
V	Tension
Vco	Tension de circuit ouvert
Icc	Courant de court-circuit
Iobsc	Courant d'obscurité
Is	Courant de saturation de la diode
VT	Potentiel thermique
K	Constante de Boltzmann
T	Température effective des cellules en Kelvin (K)
Rs	La résistance série
Rsh	La résistance shunt
Ta	La température absolue
q	La charge de l'électron
hv	L'énergie du photon
h	La constante de Planck
c	La vitesse de la lumière
λ	Longueur d'onde
Si	Silicium
Ge	Le germanium
Se	Le sélénium
GaAs	L'arséniure de gallium

CdTe	Tellurure de cadmium
P	La puissance
Imp	Courant à la puissance maximale
Vmp	Tension à la puissance maximale
FF	Facteur de forme
VcoNs	La somme des tensions en circuit ouvert de (Ns) cellules en série
IccNs	Courant de court-circuit de (Ns) cellules en série
IccNp	La somme des courants de court circuit de (Np) cellule en parallèle
Icc	Courant de court circuit
Vco	Tensions en circuit ouvert
VcoNp	Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle
Ns	Nombre des cellules en série
Np	Nombre des cellules en parallèle
PV	Photovoltaïque
A	Facteur d'idéalité de la jonction
Pmax	Puissance maximale
Pi	La puissance d'éclairement reçue par unité de surface (W)
S	La surface de la cellule photovoltaïque (m^2)
η	Le rendement
Igl	Le rayonnement global
Idir	Le rayonnement direct
Idif	Le rayonnement diffus
ρ	L'albédo du sol

a et **b** Coefficients traduisant les troubles atmosphérique

τdir Étant la transmissive totale de la couche atmosphérique pour le flux Solaire incident direct

ev Electron volt

I Courant délivré par la cellule (A)

Id Courant dans la diode (A)

A Le facteur d'idéalité de la jonction

Tj La température de la jonction

Is Le Courant de saturation de la diode

E_g L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé

I_{rs} Le courant de saturation inverse

I_{pv} Le courant fourni par cellule lorsqu' elle fonctionne en générateur

V_{cell} La tension aux bornes de cette même cellule

GPV Générateur photovoltaïque

G Irradiation sur la surface de la cellule

N_M Nelder_Mead

DE Evolution différentielle

PSO Optimisation des essaims de particules

ABC Colonie d'abeilles

ODM modèle d'une diode

RMSE L'erreur quadratique moyenne

Liste des Figures

Chapitre I

La Figure	Le Titre	Page
Figure (I.1)	L'énergie solaire	05
Figure (I.2)	L'effet photovoltaïque	06
Figure (I.3)	Spectre du rayonnement solaire	07
Figure (I.4)	Schéma d'une cellule photovoltaïque	08
Figure (I.5)	Rayonnement solaire transmis à la terre	08
Figure (I.6)	Différents composants de rayonnement	09
Figure (I.7)	Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel	11
Figure (I.8)	Cellule photovoltaïque	12
Figure (I.9)	Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire photovoltaïque	13
Figure (I.10)	cellule Multi-jonction	14
Figure (I.11)	cellule monocristalline	14
Figure (I.12)	cellule polycristalline	15
Figure (I.13)	cellule Amorphe	15
Figure (I.14)	Composant d'un générateur de module photovoltaïque	16
Figure (I.15)	Caractéristique I=f(V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule Photovoltaïque	17

Chapitre II

La Figure	Le Titre	Page
Figure (II.1)	Circuit équivalent d'une cellule idéale	22
Figure (II.2)	Circuit équivalent d'une cellule réelle	24
Figure (II.3)	Cellule, module et panneau PV	26
Figure (II.4)	Caractéristique courant tension de Ns cellule en série	27
Figure (II.5)	les caractéristiques électriques d'une association parallèle	22
Figure (II.6)	caractéristiques électriques d'une association parallèle-série	29
Figure (II.7)	Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²)	30
Figure (II.8)	Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²)	30
Figure (II.9)	Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m²).	31
Figure (II.10)	Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m²)	32
Figure (II.11)	Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C)	32
Figure (II.12)	Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C)	33
Figure (II.13)	Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²)	33
Figure (II.14)	Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²)	34
Figure (II.15)	Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série (T=25°C), et (G=1000W/m²)	34
Figure (II.16)	Caractéristique P(V) pour différentes valeur de résistance série (T=25°C), (G=1000W/m²)	35
Figure (II.17)	Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance shunt (T=25°C), (G=1000W/m²)	35
Figure (II.18)	Caractéristique P(V) pour différentes valeur de résistance shunt (T=25°C), (G=1000W/m²)	36

Chapitre III

La Figure	Le Titre	Page
Figure (III.1)	Schéma électrique équivalent du modèle à une diode	39
Figure (III.2)	La procédure d'extraction des paramètres ODM	42
Figure (III.3)	Description des étapes de l'algorithme de Nelder_Mead	43
Figure (III.4)	Organigramme de l'algorithme de Nelder_Mead	44
Figure (III.5)	Organigramme de l'algorithme génétique	46
Figure (III.6)	Courbe IV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 (G=959W/m², T=48.8C)	48
Figure (III.7)	Courbe PV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 (G=959W/m²,T=48.8C)	48
Figure (III.8)	Courbe IV mesurée et calculée du module ISOFOTON106/12 (G=923 W/m², T=30.9C)	49
Figure (III.9)	Courbe PV mesurée et calculée du module ISOFOTON106/12 (G=923 W/m², T=30.9C)	49
Figure (III.10)	Courbe IV mesurée et calculée du module ISOFOTON106/12 (G=968W /m^2, T=48.7C)	50
Figure (III.11)	Courbe PV mesuré et calculé du module ISOFOTON106/12 Pour (G=968W /m², T=48.7C)	50
Figure (III.12)	Vitesse de convergence de l'algorithme N-M pendant le processus d'extraction ISOFOTON106/12 (G=959W/m² T=48.8C)	51
Figure (III.13)	Courbe IV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 (G=959W/m², T=48.8 C)	52
Figure (III.14)	Courbe PV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 (G=959W/m², T=48.8 C)	52

Liste des tableaux

Chapitre I

Le Tableau	Le Titre	Page
Tableau(I.1)	Valeur des coefficients de trouble atmosphérique	09
Tableau(I.2)	Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude	09
Tableau(I.3)	Valeur de l'albédo du sol "ρ"	10
Tableau(I.4)	Potentiel d'Energie solaire en Algérie	12

Chapitre II

Le Tableau	Le Titre	Page
Tableau(II.1)	Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards<CST> T=25°C, G=1000W /m²	29
Tableau(II.2)	Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque	31

Chapitre III

Le Tableau	Le Titre	Page
Tableau (III.1)	Valeurs supérieures et inférieures du module PV ISOFOTON 106/12	47
Tableau (III.2)	Les paramètres extraits d'une module PV ISOFOTON106/12 par N_M (G=923W/m², T=30.9C)	47
Tableau (III.3)	Les paramètres extraits d'une module PV ISOFOTON106/12 par génétique G=923W/m², T=30.9C	47
Tableau (III.4)	Etude comparative avec l'algorithme Génétique	53
Tableau (III.5)	Etude comparative des algorithmes d'optimisation	53

Introduction Générale

Introduction générale

De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir 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, un bouleversement climatique et des catastrophes naturelles notables. Le recours au développement des énergies non polluantes est alors apparu comme l'ultime solution face à ce problème.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette transformation, qui est réalisé par le biais d'une cellule photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [1]. De plus, elles dépendent du niveau d'éclairement et de la température.

La possibilité de prédire les performances d'un générateur photovoltaïque dans diverses conditions d'irradiance 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 [1]. 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 [2-7]. Les méthodes employées pour résoudre le problème de l'identification des paramètres PV peuvent être divisées en deux groupes, approches déterministes et heuristiques [8]. Les algorithmes méta-heuristiques sont des choix appropriés pour résoudre ce problème en raison de leur puissance de recherche globale et de leur avantage sans dérivés.

Ce travail présente l'application de la méthode de recherche de Nelder_Mead à l'extraction des paramètres d'une cellule solaire et de modules photovoltaïques. La technique proposée est une méthode de recherche simple et directe qui ne nécessite aucun calcul de dérivé. Pour ces raisons, il est utilisé pour identifier les paramètres de modèle inconnu, à savoir le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série,

la résistance parallèle et le facteur d'idéalité qui régissent la relation courant-tension d'une cellule solaire. Les données réelles sont utilisées pour tester et vérifier la cohérence d'une estimation précise des paramètres inconnus.

Pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, qui résume notre étude, le présent travail est subdivisé en trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons vu des notions sur l'énergie et principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que les différents types de Cellule, Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules. (GPV) et défini son rendement et le Facteur de forme.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, En suite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour simuler dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque dans les conditions standards. Nous avons étudié aussi l'influence de la température, l'éclairement, la résistance série et la résistance parallèle sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi que l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite.

Dans le troisième chapitre, nous allons faire la simulation du comportement d'une cellule et d'un générateur PV sous MATLAB. La présentation des techniques d'optimisations proposées pour l'extraction des paramètres du modèle à une diode, du système photovoltaïque à base de silicium ainsi que les résultats obtenus seront présentés.

Généralités Sur L'énergie Photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW [9].

Ce chapitre donne des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques. Il présente le principe de la photovoltaïque, la chaine photovoltaïque et ses éléments, ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques.

I.2 Energie solaire

Principalement, le soleil est constitué de gaz, la production de quantité d'énergie se fait par la fusion du rayonnement solaire. Pour atteindre une température élevée, les atomes d'hydrogène sont fusionnés en atomes d'hélium, la température peut atteindre 20 millions de degrés Kelvin, et c'est une grande température. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes comprises entre 0.2 µm et 3 µm. Le rayonnement solaire est une source d'énergie renouvelable essentielle; une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour la production de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque [9].

Figure I.1 L'énergie solaire

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

I.2.1 L'énergie solaire thermique

Qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

I.2.2 L'énergie solaire photovoltaïque

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques tels que les hydrocarbures ou le charbon [10].

I.3 Effet Photovoltaïque

Il a été démontré que le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle-même, à la relation suivante [1] :

$$E_{ph}=h\times(c/\Lambda) \qquad (I.1)$$

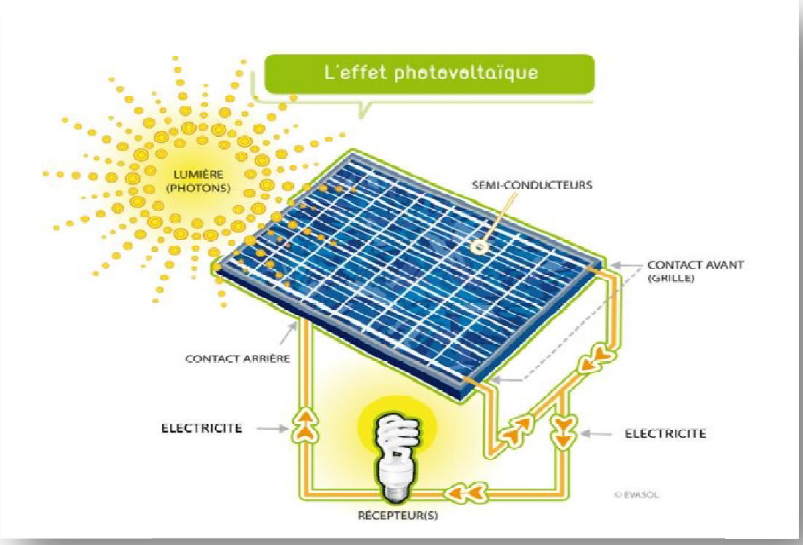


Figure I.2 L'effet photovoltaïque

D'après la relation (I.1), on voit que cette énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Le flux d'énergie solaire est alors transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont assez différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre ainsi que la montre la figure (I.3) [11].

Il a remarqué que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère.

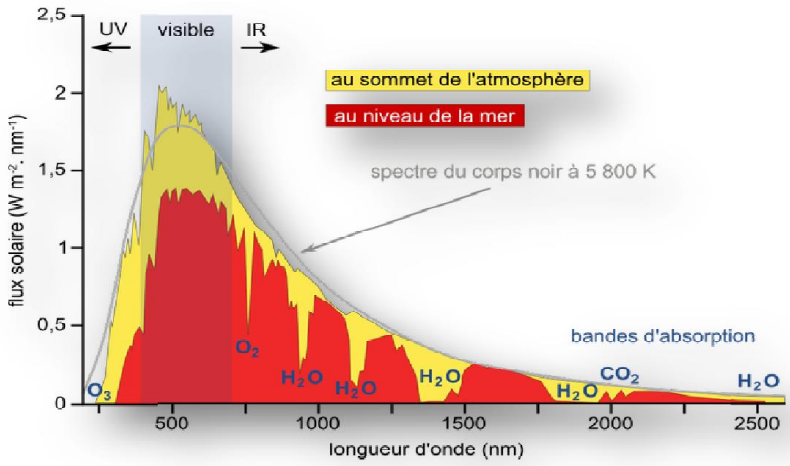


Figure I.3 Spectre du rayonnement solaire

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [12]. La figure (1.4) illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 %pour le silicium amorphe en films minces [13].

La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [14].

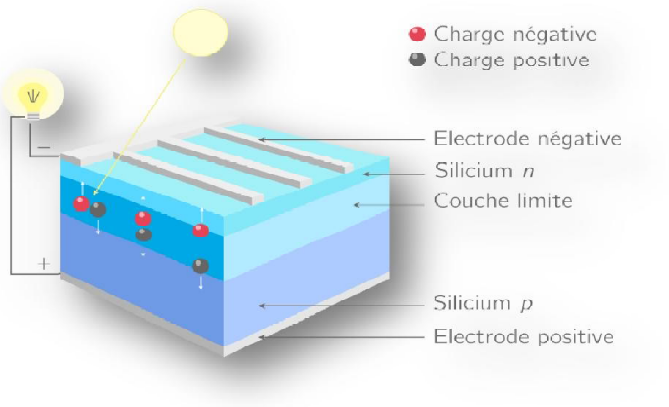


Figure 1.4 Schéma d'une cellule photovoltaïque

I.4 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2µm) à l'infrarouge lointain (3µm). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct.

L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairement de 340 $W.m^{-2}$ (Fig. I.5). Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre atmosphère, environ 100 $W.m^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace, seul le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre [15,16].

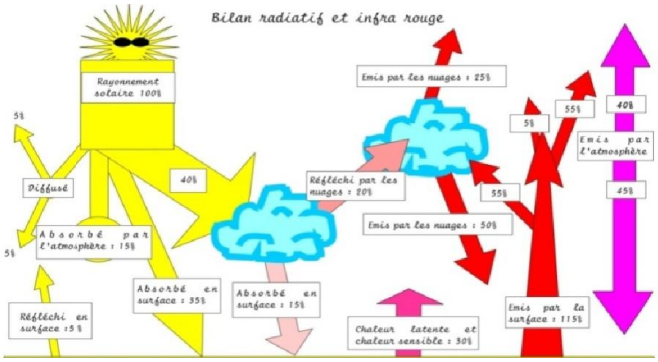


Figure I.5 Rayonnement solaire transmis à la terre

I.4.1 Différents types de rayonnement

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [14] :

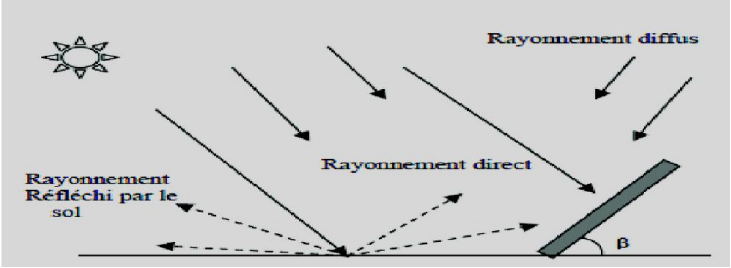


Figure I.6 Différents composants de rayonnement

I.4.1.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par le ciel clair.

Expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est :

$$I\,dir = IC \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin h} \times \frac{p}{1000}\right) \times \cos(i) \qquad \text{(I-2)}$$

a et **b** : Coefficients traduisant les troubles atmosphérique (tableau I.1)

P : la pression atmosphérique en fonction de l'altitude (tableau I.2) [17,18].

	Ciel pur	**Condition normale**	**Zone industrielles**
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Tableau I.1 Valeur des coefficients de trouble atmosphérique

Altitude (m)	**0**	**500**	**1000**	**1500**	**2000**	**5000**
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

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

I.4.1.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux diffus émis par la voûte céleste (φ_1), donné par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1+\cos(b)}{2} \quad (I.3)$$

- Le flux émis par le sol (φ_2), donné par l'expression :

$$\varphi_2 = \rho \frac{1+\cos(b)}{2} \times (Ic \times \boldsymbol{\tau}_{dir} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (I.4)$$

Avec: $$\varphi_0 = Ic \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \boldsymbol{\tau}_{dir}) \quad (I.5)$$

$\boldsymbol{\tau}_{dir}$: Étant la transmissive totale de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par [12] :

$$\boldsymbol{\tau}_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin h} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (I.6)$$

ρ : L'albédo du sol, les valeurs de ces coefficients sont données dans le tableau (I.3) :

Nature de sol	**Neige Fraiche**	**Neige ancienne**	**Sol Rocheux**	**Sol cultivé**	**Forêt**	**Etendue D'eau**
Valeur de ρ	0.8-0.9	0.5-0.7	0.15-0.25	0.07-0.14	0.06-0.20	0.05

Tableau I.3 Valeur de l'albédo du sol "ρ"

Le flux diffus s'écrit par conséquent de la manière suivante :

$$Idif = \varphi 1 + \varphi 2 \quad (I.7)$$

I.4.1.3 Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...).

Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ε) $0 \leq \varepsilon \leq 1$ [10].

I.4.1.4 Rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [14].

I.5 Le gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [19].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure (I.7) :

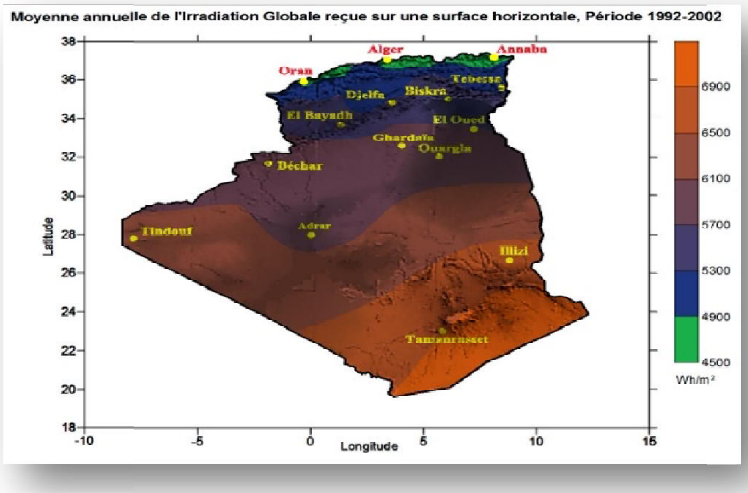


Figure I.7 Carte d'Algérie de l'ensoleillent moyen annuel

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau(I.4) selon l'ensoleillement reçu annuellement [20] :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moy. d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	26500

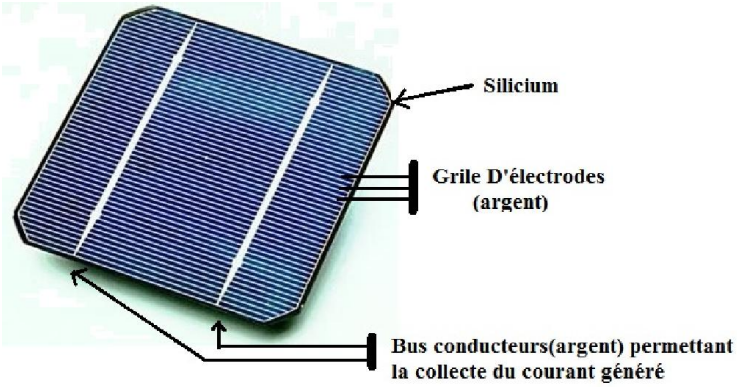
Tableau I.4 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

I.6 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique destine à transforme la lumière en électricité, sa structure est basé sur la jonction PN c'est-à-dire est composée de deux couches : une couche P et une couche N.

La cellule solaire est basée sur le semi-conducteur qui est en silicium, c'est un convertisseur instantané fournissent de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement.

Se comporte alors comme en génération de courant continue [21].



Dimantion Surface : 156mm×156mm

Epaisseur : 0.2mm

Figure I.8 Cellule photovoltaïque

I.6.1 Principe de fonctionnement

La transformation de la lumière en électricité est basée sur les trois mécanismes suivants

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [22]

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électron/trou créées est nécessaire. Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la figure [22].

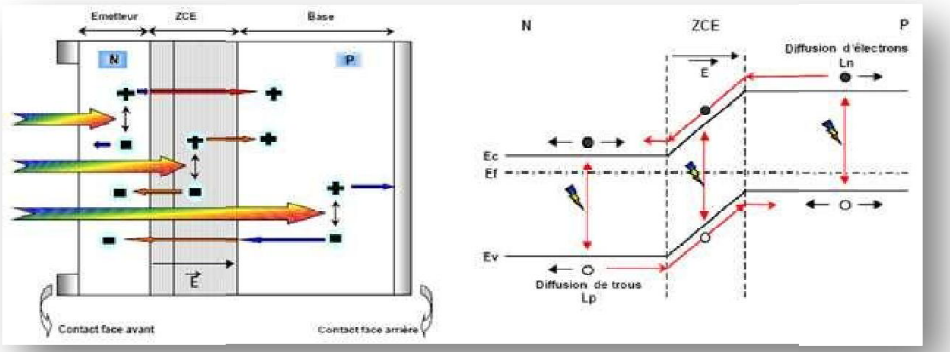


Figure I.9 Structure et diagramme de bande d'une cellule solaire photovoltaïque

I.7 Différentes technologies de la cellule photovoltaïque

Le silicium est un corps semi-conducteur représente l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. C'est un matériau extrêmement abondant, non toxique et stable, il y'a plusieurs technologies distinctes de part la nature du silicium employée, sa méthode de fabrication.

I.7.1 Les cellules Multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion [23].

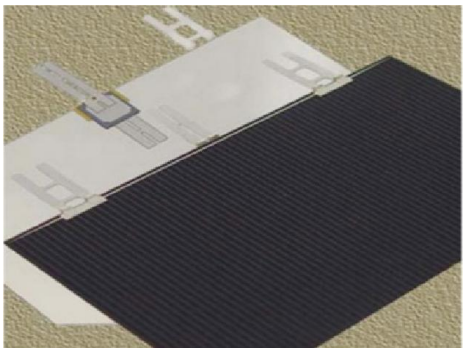


Figure I.10 cellule Multi-jonction

I.7.2 Les Cellules monocristalline

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16% [25].

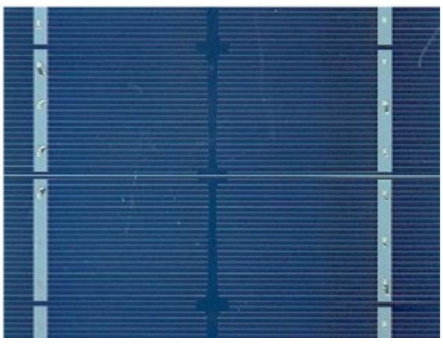


Figure I.11 cellule monocristalline

I.7.3 Cellules poly cristalline

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [20].

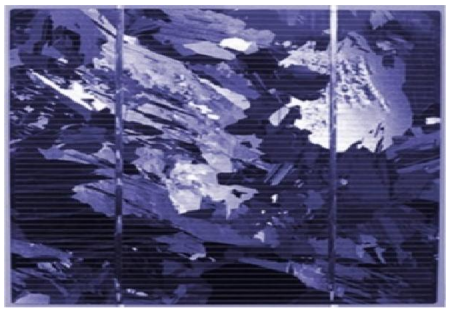


Figure I.12 cellule polycristalline

I.7.4 Cellule amorphe

Elle a une structure atomique désordonnée, non cristallisée, un rendement qui ne dépasse pas les 6% [25].

Il peut fonctionner à la présence d'un faible éclairement et son coût de production est le plus bas. La figure (I.13) montre une cellule en silicium amorphe [27].

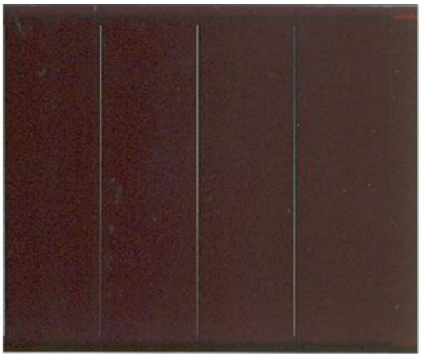


Figure I.13 cellule Amorphe

I.8 Générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [35].

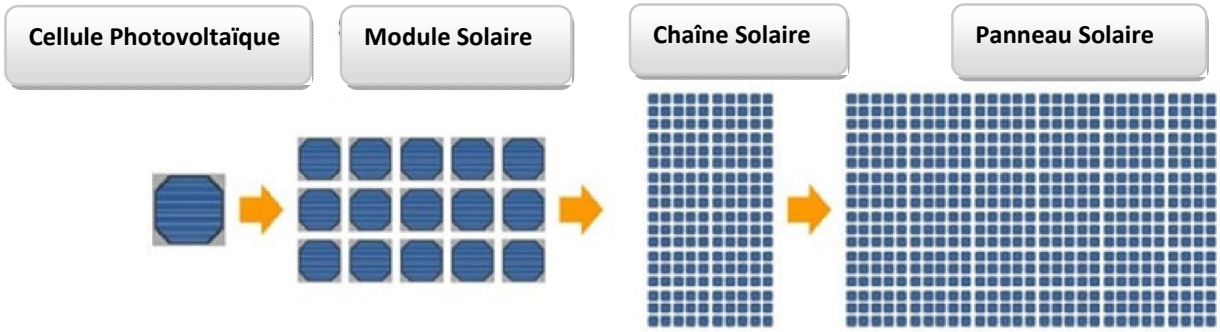


Figure I.14 Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques

I.8.1 Groupement des cellules

I.8.1.1 Groupement en série

Permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en série la tension de sortie Us a pour expression générale :

$$Us = n \times Uc \quad (I.8)$$

Avec Uc : tension fournie par une cellule

Pour ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules.

I.8.1.2 Groupement en parallèle

Permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules montées en parallèle, le courant de sortie Is a pour expression générale :

$$Is = n \times I \quad (I.9)$$

Avec I : courant fourni par une cellule.

I.8.1.3. Groupement série-parallèle

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en Parallèle, car une cellule ne suffit par pour alimenter une charge DC de la taille d'une station de pompage. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion du générateur photovoltaïque (GPV).

I.8.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = Iph - Iobsc \quad (I.10)$$

Avec :

Iobsc : courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation (I.11) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = Icc - Is\,(\exp(q \times V/A \times k \times Tj) - 1) \quad (I.11)$$

Avec :

Is : le courant de saturation de la diode (A).

K : la constante de Boltzmann est égale à 1.38 10^{-23} J/K

A : le facteur d'idéalité de la diode.

Tj : la température de jonction (°C).

q : la charge de l'électron (1.6 10^{-19}C)

Il y'a deux courant s'opposent dans une cellule photovoltaïque : le courant d'éclairement et le courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique a l'allure présentée sur la figure (I.18) [32].

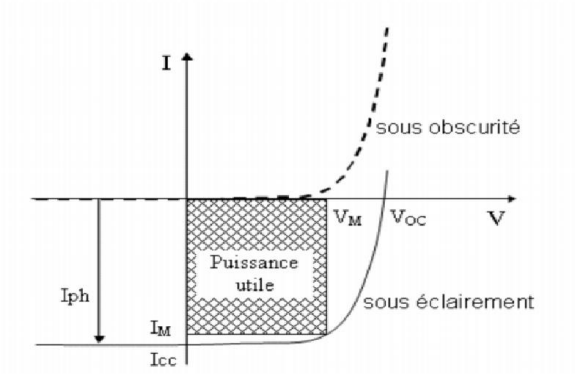


Figure I.15 Caractéristique I=f(V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule Photovoltaïque.

I.8.3 Facteur de forme FF

C'est un paramètre important, son utilisation c'est à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque, et représente aussi Le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée Pmax et la puissance formée par le rectangle (Icc× Vco).

Quand la puissance exploitable sera grande donc le facteur est grand. L'objet qui fait compromis technologie pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales c'est des meilleures cellules. Ce facteur est défini par la relation suivante [33]:

$$FF=\frac{Pmax}{Icc.Vco}=\frac{Vmp.Imp}{Icc.Vco} \quad \text{(I-12)}$$

Pmax : La puissance maximale (W).

Imp : Le courant à la puissance maximal de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (A)

Vmp : La tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule photovoltaïque (V)

I.8.4 Le rendement η

Le rendement des cellules photovoltaïques désigne le rendement de conversion en puissance, on le considère comme le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente Pi [35].

$$\eta=\frac{Pmax}{Pi.S}=\frac{FF.Vco.Icc}{Pi.S} \quad \text{(I.13)}$$

Pi : La puissance d'éclairement reçue par unité de surface (W)

S : la surface de la cellule photovoltaïque (m²)

Pour un bon rendement, en augmente le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. La seule connaissance de la valeur qui permet d'évaluer les performances de la cellule est le rendement de conversion qui est un paramètre essentiel.

I.9 Avantages et inconvénients de la photovoltaïques

I.9.1 Avantages

1. Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
2. Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
3. Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions[35].

I.9.2 Inconvénients

1. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
2. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
3. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
4. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [36].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire, le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium ainsi que le générateur (GPV), Ensuite, nous avons abordé les différents groupements possibles des cellules et défini son rendement et le Facteur de forme**.**

Le travail que nous avons présenté nous a permet de constater que nous pouvons améliorer le rendement du système, en choisissant d'une manière optimale le nombre des cellules et l'angle d'inclinaison mensuel. Dans ce contexte, nous allons présenterons dans le chapitre suivant la modélisation de la cellule photovoltaïque ainsi que du générateur photovoltaïque, en étudiant aussi l'influence de la température, l'éclairement sur le rendement.

SIMULATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAïQUE

II .1 Introduction

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. 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 [37].

Ce chapitre décrire les différents modèles électriques et mathématiques caractérisent les cellules ainsi que les générateurs photovoltaïques. Nous allons étudier la modélisation du générateur photovoltaïque ISOFOTON 106/12. Nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite, et on utilise l'outil MATLAB-SIMULINK pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV.

II.2 Circuit équivalent d'une cellule solaire

II.2.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant Iph en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (II.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale [38].

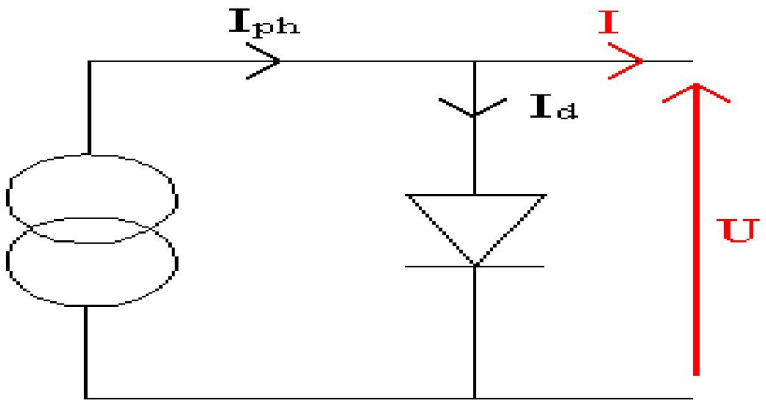


Figure II.1 Circuit équivalent d'une cellule idéale

$$I = I_{ph} - I_d \quad \text{(II.1)}$$

Avec :

I : Courant délivré par la cellule (A)

I_{ph} : Courant de court-circuit (A)

Id: courant dans la diode (A)

La caractéristique IV d'une diode est une caractéristique non linéaire donnée par la relation:

$$Id = Is(e^{\frac{Vd}{Vt}} - 1) \quad (II.2)$$

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - Is(e^{\frac{Vd}{Vt}} - 1) \quad (II.3)$$

Vt = A.K.Tj/q : potentiel thermique

K : la constante de Boltzmann est égale à 1.38e-38J/K

A : le facteur d'idéalité de la jonction

Tj : la température de jonction (°C)

Is : le Courant de saturation de la diode (A)

q : la charge de l'électron est égale à 1.610e-19

V : tension délivré par la cellule (V)

Vd : la tension aux bornes de la diode (V)

II.2.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dues à la fabrication et représenté sur la figure (II.2) Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [39].

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : Le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}).

Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I_V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [39].

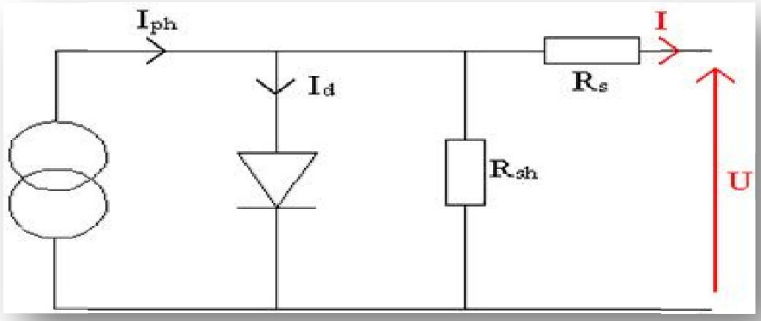


Figure II.2 Circuit équivalent d'une cellule réelle

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{(II.4)}$$

Avec :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V+RsI}{R_{sh}} \quad \text{(II.5)}$$

D'où l'équation du courant qui est donnée par l'expression suivant :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - Is\left(e^{\frac{Vd}{Vt}} - 1\right) - \frac{V+RsI}{R_{sh}} \quad \text{(II.6)}$$

Avec:

I_{ph}: Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement comme montré dans l'équation qui suit :

$$Iph = [Icc + Ki\,(T - Tref)] \times \frac{E}{1000} \quad \text{(II.7)}$$

I_{ph}: est en [A], calculé dans les conditions nominales (25°et 1000w/m^2)

K_i : est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017 A/K)

T_{ref} : Température de référence, égale à 25 C°

I_{cc} : courant de court-circuit

I_s : est le courant de saturation exprimé :

$$Is=Irs\times \left[\frac{T}{Tref}\right]^3 \exp\left[\frac{q.Eg}{A.k}\times \left(\frac{1}{Tref}-\frac{1}{T}\right)\right] \quad (II.8)$$

E_g: L'énergie de gap du semi-conducteur utilisé ($E_g \approx 1.1$eV) pour le silicium poly cristallin à 25 C°)

I_{rs} : le courant de saturation inverse, il est donné par :

$$I_{rs}=\frac{Icc}{\exp(q.Voc/K.A.T)-1} \quad (II.9)$$

q : La charge de l'électron, elle est égale à 1.6 *10^{-19} C

K : Constante de Boltzmann, elle est égale à 1.3805 * 10^{-23}j/k

A : Facteur d'idéalité, égale à 1.6

Si on veut calculer la tension de court-circuit on résout l'équation:

$$V_{oc}=\frac{K.T}{q}\ln\left(\frac{Icc}{Is}-1\right) \quad (II.10)$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$I_{PV}=N_pI_{ph}-N_pI_0\left[\exp\left(\frac{q(V_{cell}+R_sI_{cell})}{N_sAKT}\right)-1\right]-N_p\frac{V_{cell}+R_sI_{cell}}{R_{sh}} \quad (II.11)$$

Où

I_{pv} : est le courant fourni par cellule lorsqu' elle fonctionne en générateur

T : est la température effective des cellules en Kelvin (K)

V_{cell} : est la tension aux bornes de cette même cellule

R_{sh} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions.

II.3 Module photovoltaïque GPV et ses performances

Dans une centrale solaire photovoltaïque, Le champ photovoltaïque consiste de regroupement de plusieurs panneaux solaires (modules). Donc, le panneau solaire est composé de plusieurs cellules PV connectées en série, parallèles ou série parallèles pour former le module photovoltaïque. La figure II.3 donne des photos réelles d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque [40].

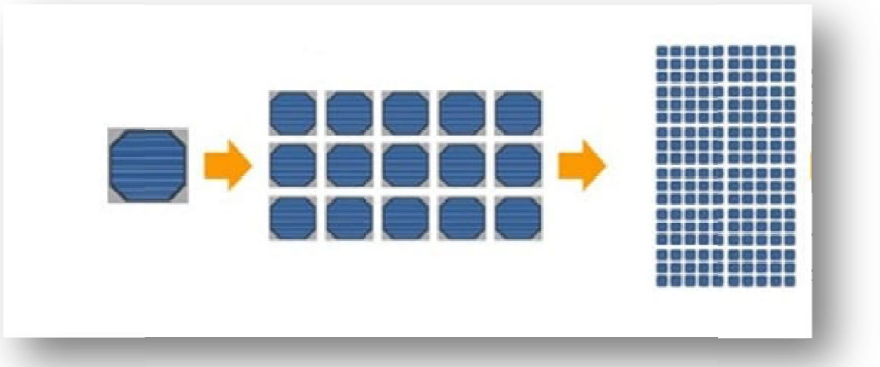


Figure II.3 Cellule, module et panneau PV

II.3.1 Groupement de Cellules Photovoltaïques

La puissance fournie par une seule cellule solaire étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées et encapsulées dans un plastique pour former un GPV pratique [41].

Dans ce qui suit, différents groupements possibles des cellules solaires sont présentés :

II.3.1.1 Influence de l'association série des cellules PV

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. Une association de (NS) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque [40].

Donc le courant de générateur PV est équivalente au courant d'une cellule unique, mais la tension de sortie a augmenté (une addition des tensions de toutes les cellules) :

$$VPV=NS\times Vco \quad \text{(II.12)}$$

$$IPV=Icc \quad \text{(II.13)}$$

Avec :

NS : nombre des cellules en série

Icc : courant de court-circuit (A)

Vco : Tension de circuit ouvert

La caractéristique d'un groupement de (Ns) modules solaires en série est représentée par la figure (II.4).

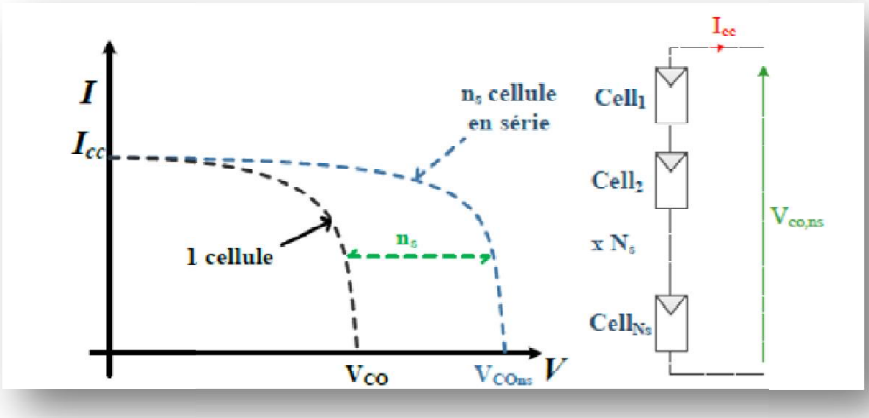


Figure II.4 Caractéristique courant tension de Ns cellule en série

II.3.1.2 Influence de l'association parallèle des cellules PV

Une association parallèle de (Np) cellules est possible et permet d'accroitre 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.

Les équations (II.14- II.15) et la figure (II.5) résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (Np) cellules [40].

$$IPV=NP\times Icc \quad \text{(II.14)}$$

$$VPV=Vco \quad \text{(II.15)}$$

Avec :

NP : nombre de cellule en parallèle

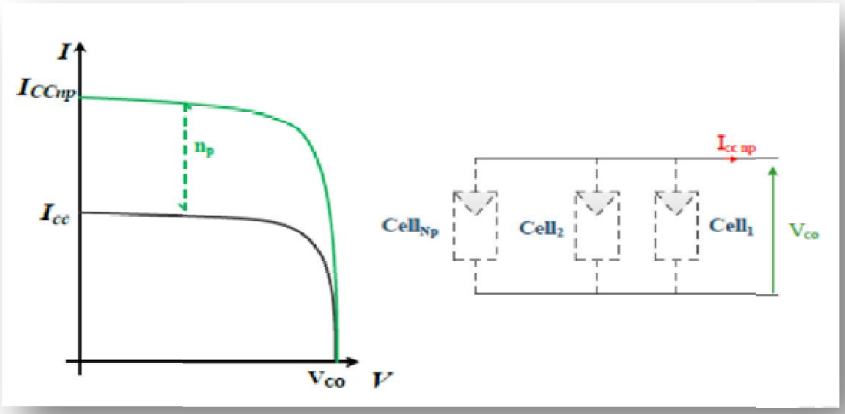


Figure (II.5) Les caractéristiques électriques d'une association parallèle

II.3.1.3 Association série-parallèle

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [42].

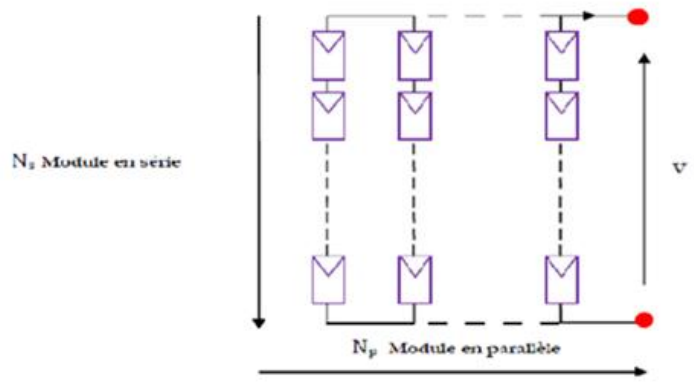


Figure II.6 Les caractéristiques électriques d'une association parallèle-série

II.4 Simulation d'une cellule photovoltaïque

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

Eclairement standard	**G=1000/m²**
Température standard	**T=25°C**
Facteur d'idéalité A	**A=1.3**
Energie de la bande interdite	**Eg= 1.12eV**
Courant de court-circuit Icc	**4. 096.10^{-6} A**
Tension a circuit ouvert Voc	**0.6V**

Tableau II.1 Caractéristique électrique de la cellule dans les conditions standards <CST> (T=25°C, G=1000W /m²)

II.4.1 Caractéristiques I(V) et P(V)

Les résultats obtenus de la simulation d'une caractéristique courant tension I(V) et puissance-tension P(V) de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards (T=25°C, G=1000 W/m²) sont représentés dans les figures (II.7) et (II.8).

La figure (II.7) représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire dans les conditions de G=1000 W/m² et T=25°C. Le courant de court circuit est égale 4.096A et la tension de circuit ouvert est 0.6 V.

On observe que la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P_N avec une polarisation inverse, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.

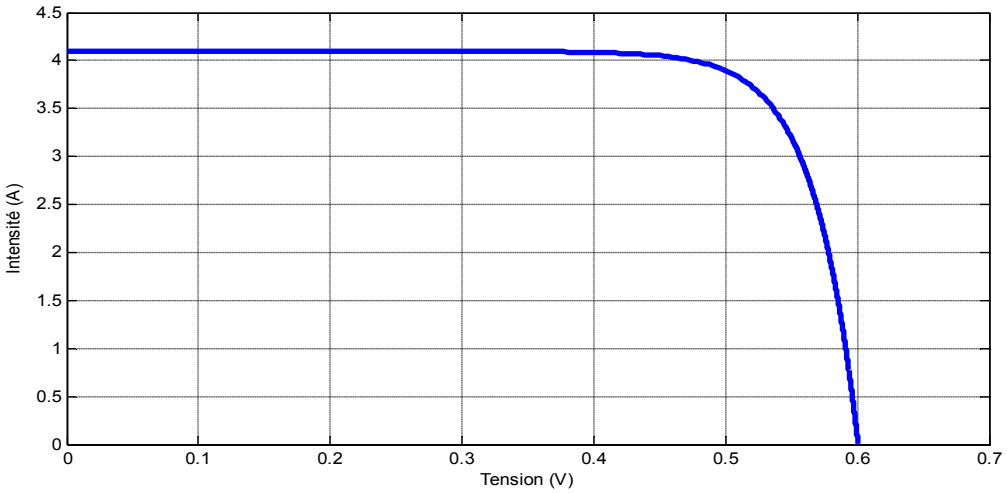


Figure II.7 Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²)

La figure (II.8) représente la caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire dans les conditions de G=1000 W/m² et T=25°C. On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (Pmax) ensuite elle décroit.

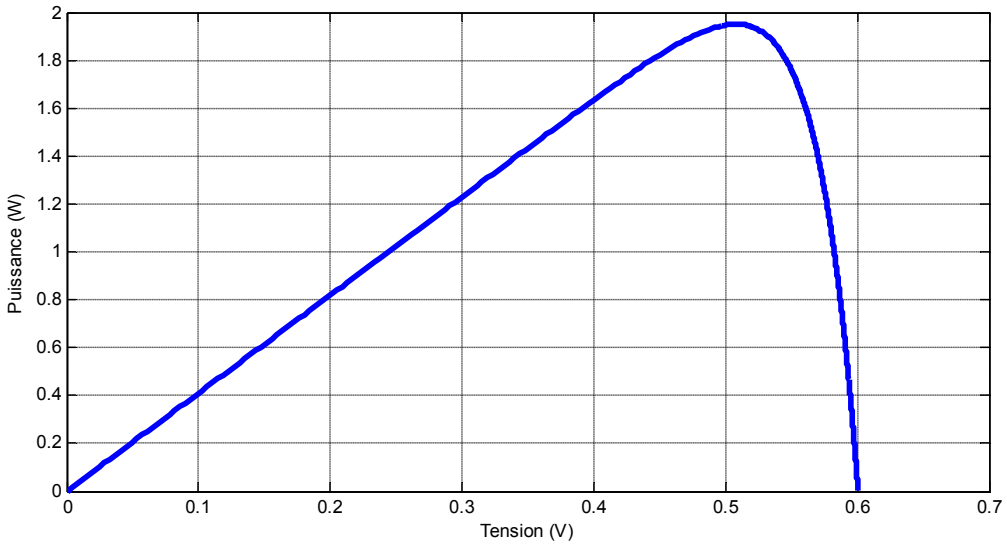


Figure II.8 Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²)

II.5 Simulation d'un générateur Photovoltaïque

Les caractéristiques électriques de générateur sont données :

Eclairement standard (W/m²)	G= [600, 800, 1000, 1200]
Température (°C)	T= [25, 35, 45, 55]
Facteur d'idéalité(A)	A= 1.2
Energie de la bande interdite ev	Eg= 1.12
Courant de court-circuit Icc(A)	Iph=4.0963.10^{-6}
Résistances en série (Ω)	Rs= [0.0041, 0.2, 0.5, 0.9]
Résistance en parallèles (Ω)	Rsh= [0.6265, 1, 4, 100]

Tableau II.2 Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque

Les figures (II.9) et (II.10) représente la caractéristique (I_V) et (P_V) d'un générateur photovoltaïque (GPV).

II.5.1 Caractéristique (I_V) (P_V)

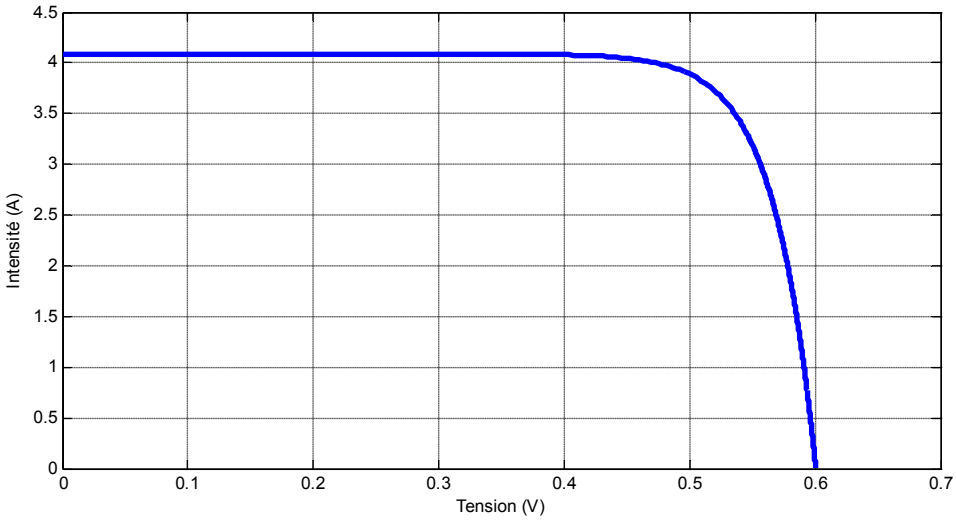


Figure II.9 Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m²)

Le courant de court-circuit est I_{cc}=4.096 A, la tension de circuit ouvert est V_{oc} =21.59V figure (II.9).

Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 36 cellules connectées en série ce qui donne : VocNcs =36*0.6=21.6V.

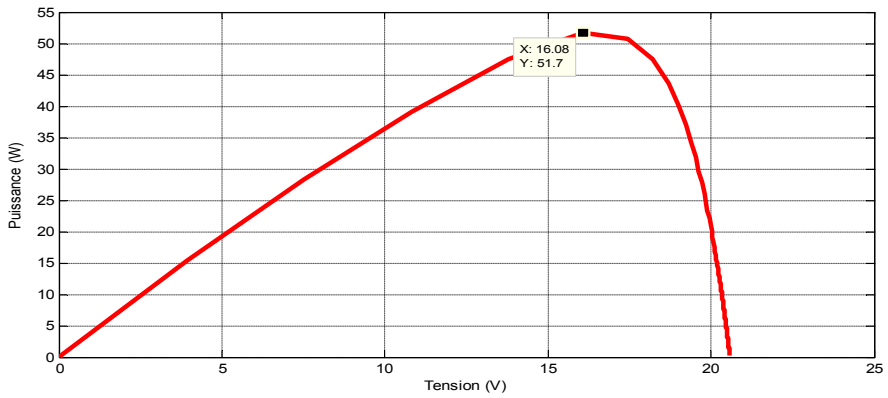


Figure II.10 Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m²)

La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépende du point de fonctionnement du générateur comme il a monté par la figure (II.10).

Le point << M >> représente la puissance maximale débitée par le générateur.

A ce point P_{max}=51.7 W, ce qui est vérifiée par P_{max}=16.08 V * 3.216A =51.71 W.

II.6 Influence de paramètres climatiques sur un générateur photovoltaïque

II.6.1 Influence de l'éclairement sur le générateur

En faisant varier l'éclairement entre 600 w/m² et 1200 w/m² avec un pas de 200, la caractéristique (I=f(V)) est donnée par les figures (II.11) On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

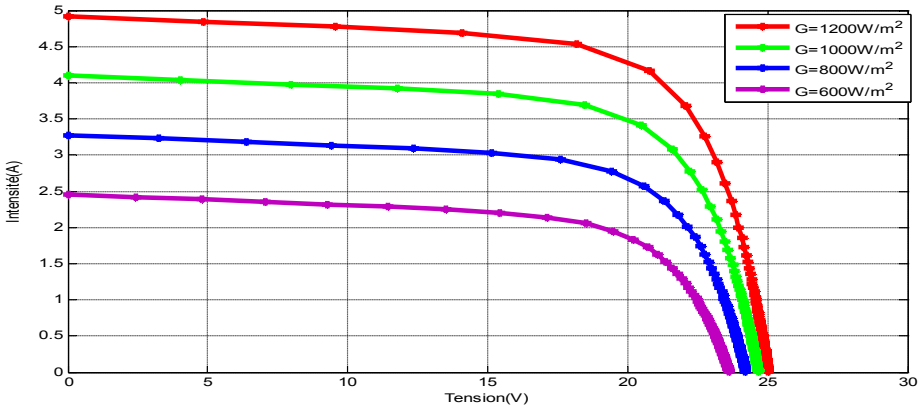


Figure II.11 Caractéristique I(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C)

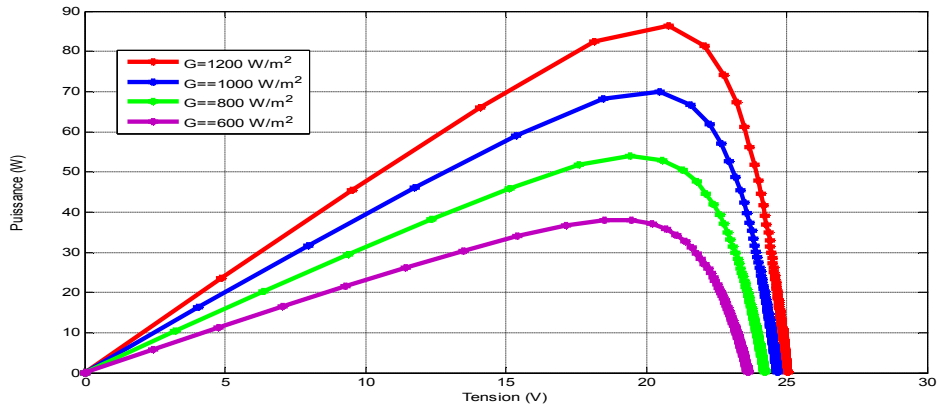


Figure II.12 Caractéristique P(V) pour différentes niveaux d'éclairement (T=25°C)

II.6.2 Influence de la température sur le générateur

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 55°C dans la même condition de l'éclairement G=1000 W/m², la caractéristique (I_{pv}=f(V_{pv})) est donnée par la figures (II.13) On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit.

Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue figures (II.14).

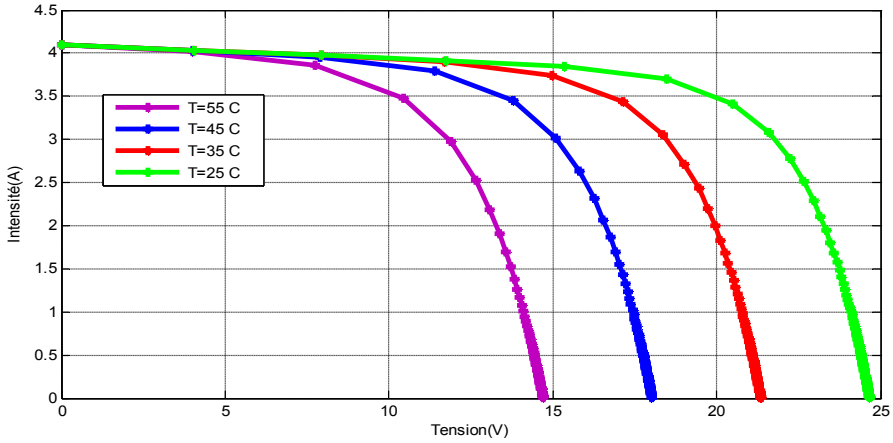


Figure II.13 Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²)

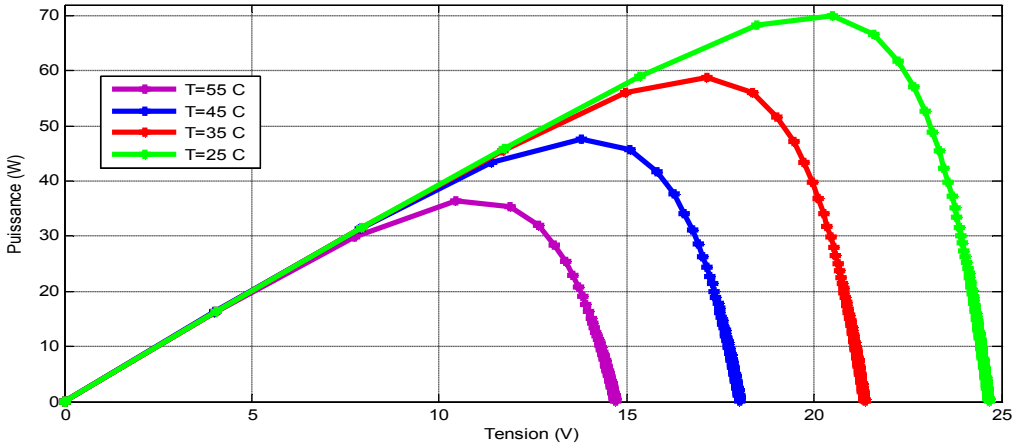


Figure II.14 Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²)

II.7 Influence de paramètre électrique sur un générateur photovoltaïque

II.7.1 Influence de la résistance série sur un générateur photovoltaïque

La figure (II.15) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I_V, cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe I=f(V) dans la zone où le panneau fonctionne comme source de tension, à droite du point de puissance maximum. Sur la figure (II.16) la valeur de Rs influe négativement sur la puissance. Quand la résistance série augmente la puissance diminue. Par conséquent la puissance maximale de la générateur PV subit une diminution.

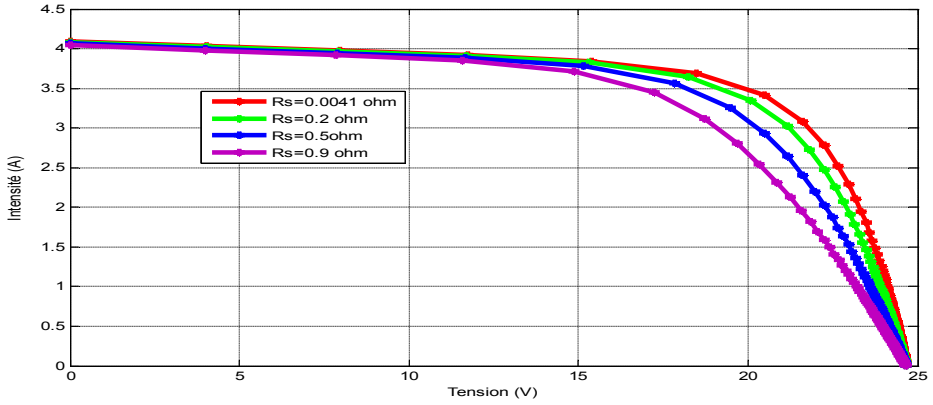


Figure II.15 Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série (T=25°C, G=1000W/m²)

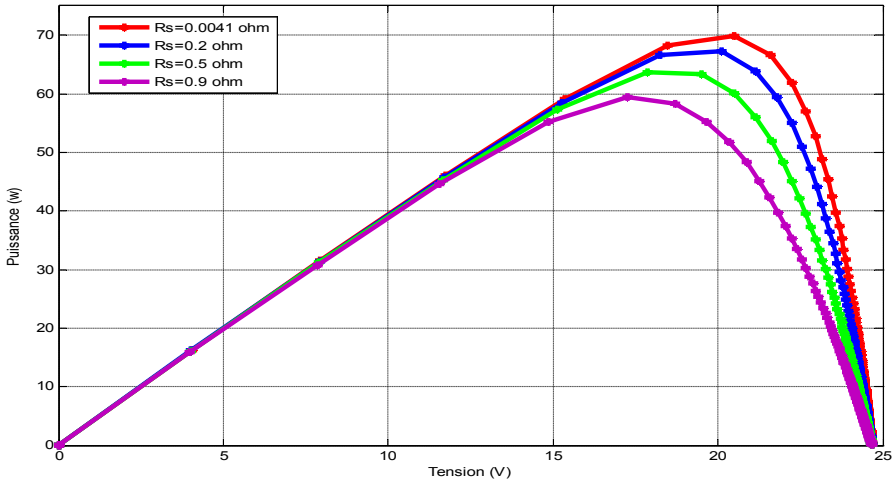


Figure II.16 Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de résistance série (T=25°C, G=1000W/m²)

II.7.2 influence de la résistance shunt sur le générateur photovoltaïque

Lorsque la résistance shunt diminue, la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit sont diminués. Lorsque la résistance shunt est très petite son influence est très remarquable, comme le montre la figure (II.17).

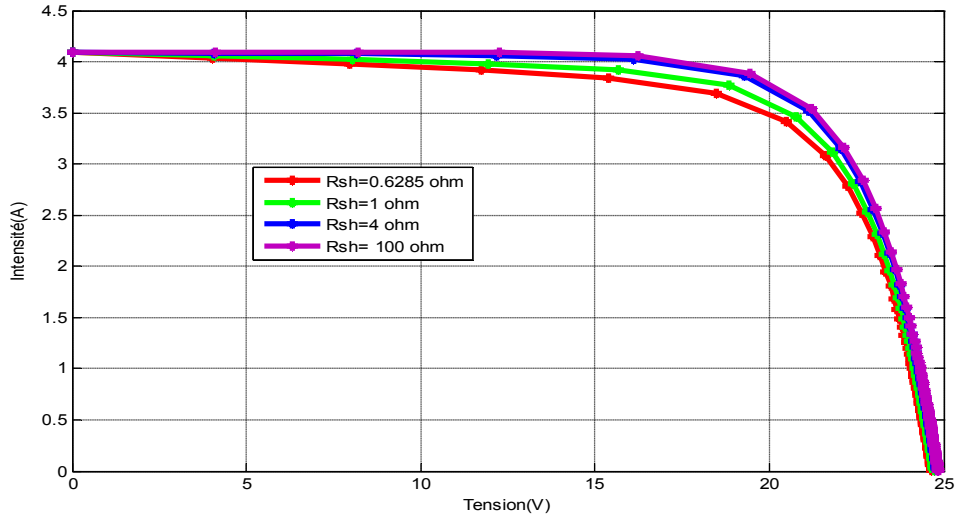


Figure II.17 Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de résistance shunt (T=25°C, G=1000W/m²)

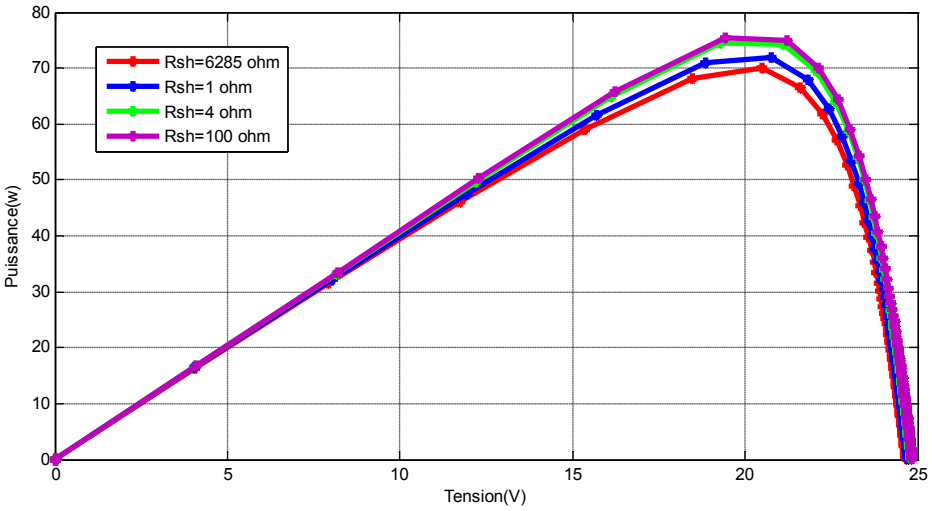


Figure II.18 Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de résistance shunt (T=25°C, G=1000W/m²)

II.8 conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule et le générateur photovoltaïque, Ensuite Nous avons utilisé le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'un générateur ISOFOTON 106/12. Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement et des paramètres électriques (résistance série et Resistance de shunte) sur l'énergie produite par le générateur PV.

La présentation des techniques d'optimisations proposées pour l'extraction des paramètres du modèle à 5 paramètres sera l'objet du chapitre suivant.

OPTIMISATION DES PARAMETRES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 Introduction

La modélisation des cellules solaires implique principalement la formulation de la relation non linéaire du courant en fonction de la tension (IV). La détermination des paramètres joue un rôle important dans la modélisation précise des cellules solaires. Ce chapitre présente une application de la méthode de Nelder_Mead méthode pour identifier les paramètres de modèles de cellules solaires et de modules photovoltaïques. La technique proposée est utilisée pour identifier les paramètres inconnus du modèle, à savoir le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série, la résistance shunt, et le facteur d'idéalité qui régissent la relation de courant-tension de la cellule solaire.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit: une brève description du modèle à une seule diode est fournie dans la section 2. La section 3 présente l'élection de la fonction de coût et le principe d'optimisation. Une brève description de l'algorithme d'optimisation Nelder_Mead est donnée dans la section 4, tandis que les résultats de la simulation et les discussions sont fournis dans la section 5. Enfin, la conclusion tirée de ce chapitre est présentée dans la section 6.

III.2 Modélisation de module photovoltaïque

Bien que divers modèles aient été développés dans la littérature pour décrire le comportement des cellules solaires et le module photovoltaïque, le modèle à une seule diode est couramment utilisé [43]. Comme le montre la figure (III.1), ce modèle est simple, facile à résoudre et convient aux applications de génie électrique.

Le comportement du module photovoltaïque est généralement décrit par sa caractéristique courant-tension, dans laquelle leur forme dépend de la valeur des cinq paramètres et de la dépendance à la lumière solaire et à la température du module.

Le modèle à une diode est le plus pratique dans littérateur, on ajoute deux résistances une en série (Rs) et l'autre en parallèle (Rsh) au modèle idéal. Une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite (voir figure (III.1)) [44]. Donc on modélise cette perte de tension par la résistance (Rs) et le courant de fuite par la résistance (Rsh) [45].

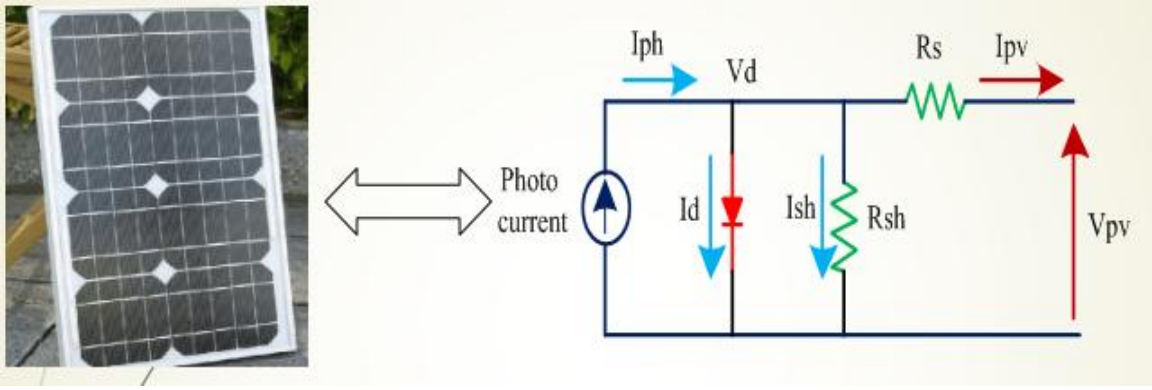


Figure III.1 Schéma électrique équivalent du modèle à une diode

Ce modèle comporte quatre variables. Les deux variables d'entrées sont :

Es: Ensoleillement incident (w/m^2)

Tj : Température de jonction de la cellule (°C)

Les deux variables de sortie sont :

Ipv : Courant fourni parla cellule(A)

Vpv : Tension aux bornes de la cellule (V)

On a:

$$Ipv = Iph - I_D - Ish \qquad (III.1)$$

Avec :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V+RsI}{R_{sh}} \qquad (III.2)$$

D'où l'équation du courant est donnée par l'expression suivante

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - Is\left(e^{\frac{Vd}{Vt}} - 1\right) - \frac{V+RsI}{R_{sh}} \qquad (III.3)$$

Avec:

I_{ph}: Le courant photonique, il dépend de la température et de l'ensoleillement comme montré dans l'équation qui suit :

$$Iph = [Icc + Ki\,(T - Tref)] * \frac{E}{1000} \qquad (III.4)$$

I_{ph}: Est en [A], calculé dans les conditions nominales (25°et 1000w/m^2)

K_i : est le rapport entre le courant de court-circuit et le coefficient de température (0.0017 A/K)

T_{ref} : Température de référence, égale à 25 C°

I_{cc} : Courant de court-circuit

I_s : Est le courant de saturation

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{cell}+R_S I_{cell})}{nKT}\right) - 1\right] - \frac{V_{cell}+R_S I_{cell}}{R_{sh}} \qquad \text{(III.5)}$$

Où

I_{pv} : est le courant fourni par cellule lorsqu' elle fonctionne en générateur

T : est la température effective des cellules en Kelvin (K)

V_{cell} : est la tension aux bornes de cette même cellule

R_{sh} : est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_s : est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions

K: Le constant de Boltzmann (1.38x10-23 JK-1)

q : La charge électrique (1.602 x10-19 C)

n : Le facteur d'idéalité

Les cinq paramètres de l'équation caractéristique sont généralement donnés par les fabricants de modules dans des conditions de fonctionnement nominales.

Cependant, l'expérience a montré que les valeurs réelles obtenues dans des conditions de travail réelles diffèrent des valeurs nominales. Par conséquent, la nécessité de faire correspondre le modèle de module PV donné par l'équation (III.5) avec des données expérimentales, à des fins de prédiction, passe inévitablement par la recherche des valeurs correctes des cinq paramètres.

III.3 Principe d'optimisation

Le processus d'extraction des paramètres peut être transformé en un problème d'optimisation pouvant être résolu par l'algorithme de Nelder_Mead. Dans ce chapitre,

l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est choisie comme un critère pour quantifier la différence entre les résultats du modèle basés sur les équations (III.5) et les données mesurés.

Le RMSE est évalué pour chaque paire de valeurs expérimentales (III.6) en tant que la différence entre le courant réel mesuré et le courant calculé basé sur l'utilisation de l'algorithme N_M, comme suit

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N}(f(V,I,x))^2\right)} \quad \text{(III.6)}$$

$$f(V,I,x) = I - \left(I_{ph} - I_0\left[\exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{nkT}\right) - 1\right] - \frac{V+R_sI}{R_{sh}}\right) \quad \text{(III.7)}$$

Où

x: Représente le vecteur des paramètres optimaux du courant calculé

I : Représente le courant mesuré

$x = [I_{ph}, I_0, R_{sh}, R_s, n]$, et N est le nombre de points de données

La figure (III.2) présente la procédure d'extraction des paramètres. Tout d'abord, on relie le traceur PVPM 40 IV avec le module ISFOTON 106/12 pour nous donne le courant mesuré pour chaque tension correspondante. A partir de cette dernière et la température du module, on calcule le courant. Ce dernier est comparé avec le courant mesuré pour déterminer notre fonction objective. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfis, on fait appel à l'algorithme de N_M pour nous donne les nouveaux paramètres qui seront injecté dans le circuit électrique proposé. Le même travail sera répété jusqu'a la fin de la procédure.

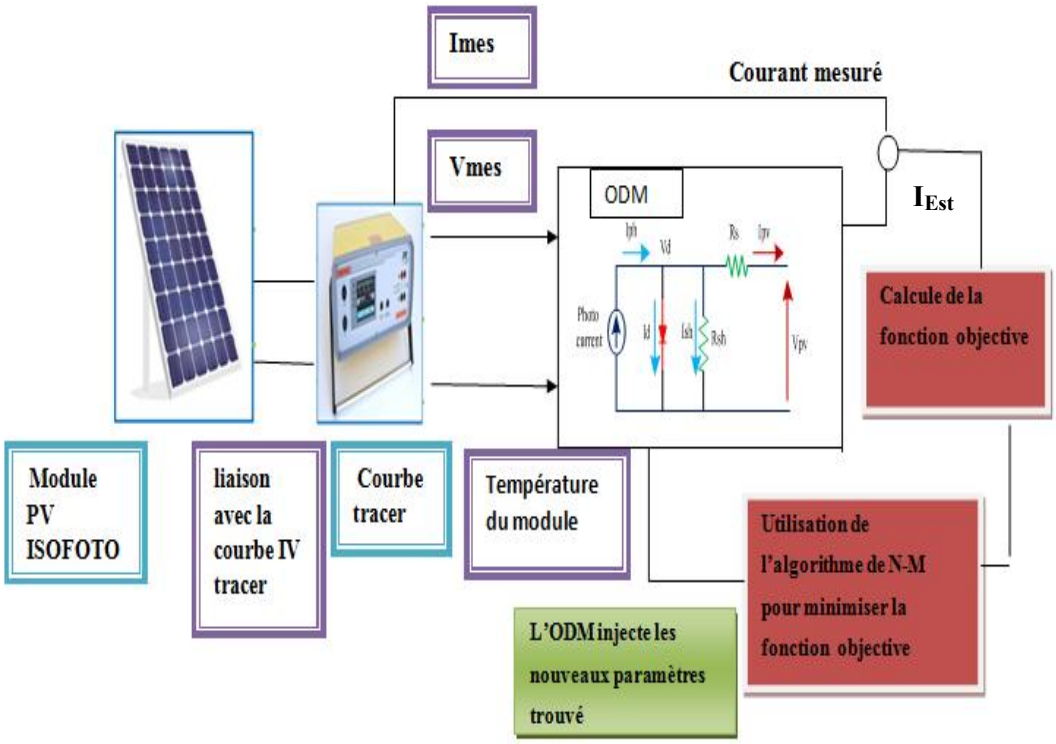


Figure III.2 Procédure d'extraction des paramètres ODM

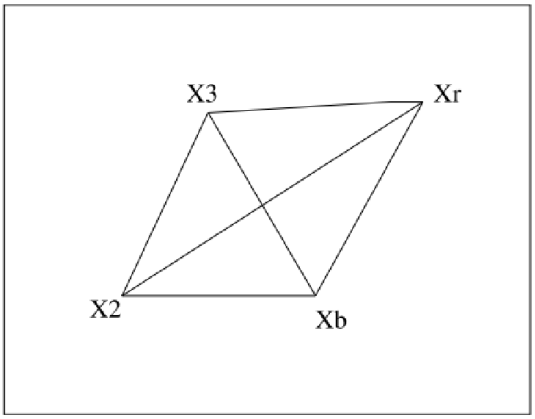
III.4 L'algorithme de Nelder_Mead

L'algorithme N_M a été proposé comme une méthode pour minimiser une fonction à valeur réelle $f(x)$ où $x \in \Re^n$. Quatre paramètres doivent être spécifiés pour définir une méthode complète : coefficients de réflexion (ρ), d'expansion (χ), de contraction (γ) et de réduction (σ).

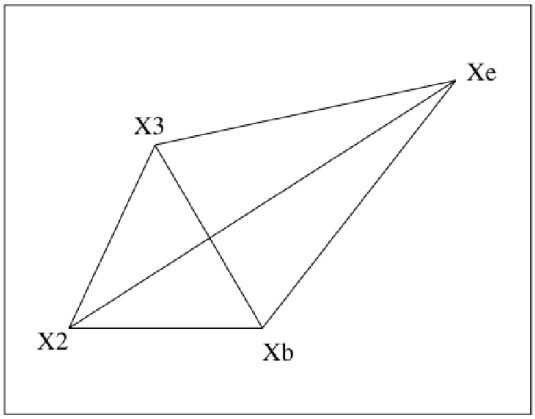
Ces paramètres sont fixés généralement comme suit : $\rho = 1$, $\chi = 2$, $\gamma = 1/2$ et $\sigma = 1/2$. Les étapes de base décrivant l'algorithme N_M sont données dans l'organigramme de la figure (III.3). Cette méthode est basée sur la comparaison des valeurs de la fonction dans les (n+1) sommets d'un simplexe général. Le simplexe se modifie à travers les opérations de réflexion, d'expansion, contraction et de réduction, en changeant le sommet avec la plus grande valeur de la fonction coût (fonction objective) par un autre point de valeur plus petite (Nelder et Mead, 1965) [45.46]. Le simplex s'adapte au en droit local et se contracte jusqu'au dernier minimum.

La méthode du simplexe de Nelder_Mead comporte les étapes suivantes figure (III.4) :

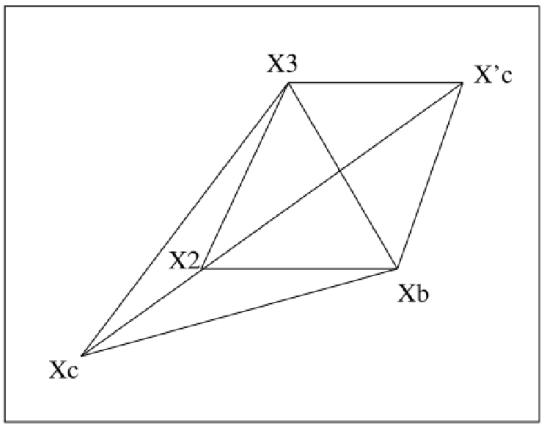
- Si $f(x1) \leq f(x_R) \leq f(x_N)$, réflexion : $x_{N+1} = x_R$
- Si $f(x_E) < f(x_R) < f(x_1)$, expansion : $x_{N+1} = x_E$
- Si $f(x_R) < f(x_1)$ et $f(x_E) \geq f(x_R)$, réflexion : $x_{N+1} = x_R$
- Si $f(x_N) \leq f(x_R) < f(x_{N+1})$ et $f(x_{CE}) \leq f(x_R)$, contraction externe : $x_{N+1} = x_{CE}$
- Si $f(x_R) \geq f(x_{N+1})$et $f(x_{CI}) < f(x_{N+1})$, contraction interne : $x_{N+1} = x_{CI}$
- Sinon rétrécissement : pour i = {2,...,n}, $x_i = x1 - (x_i - x1)/2$



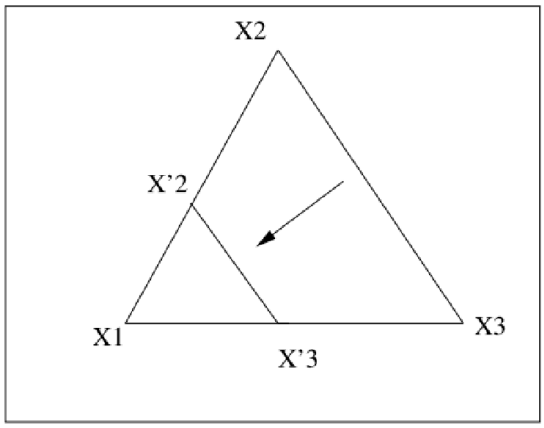
(a) Réflexion



(b) Expansion



(c) Contraction (interne ou externe)



(d) Rétrécissement

Figure III.3 Description des étapes de l'algorithme de Nelder_Mead

III.4.1 L'organigramme de Nelder_Mead

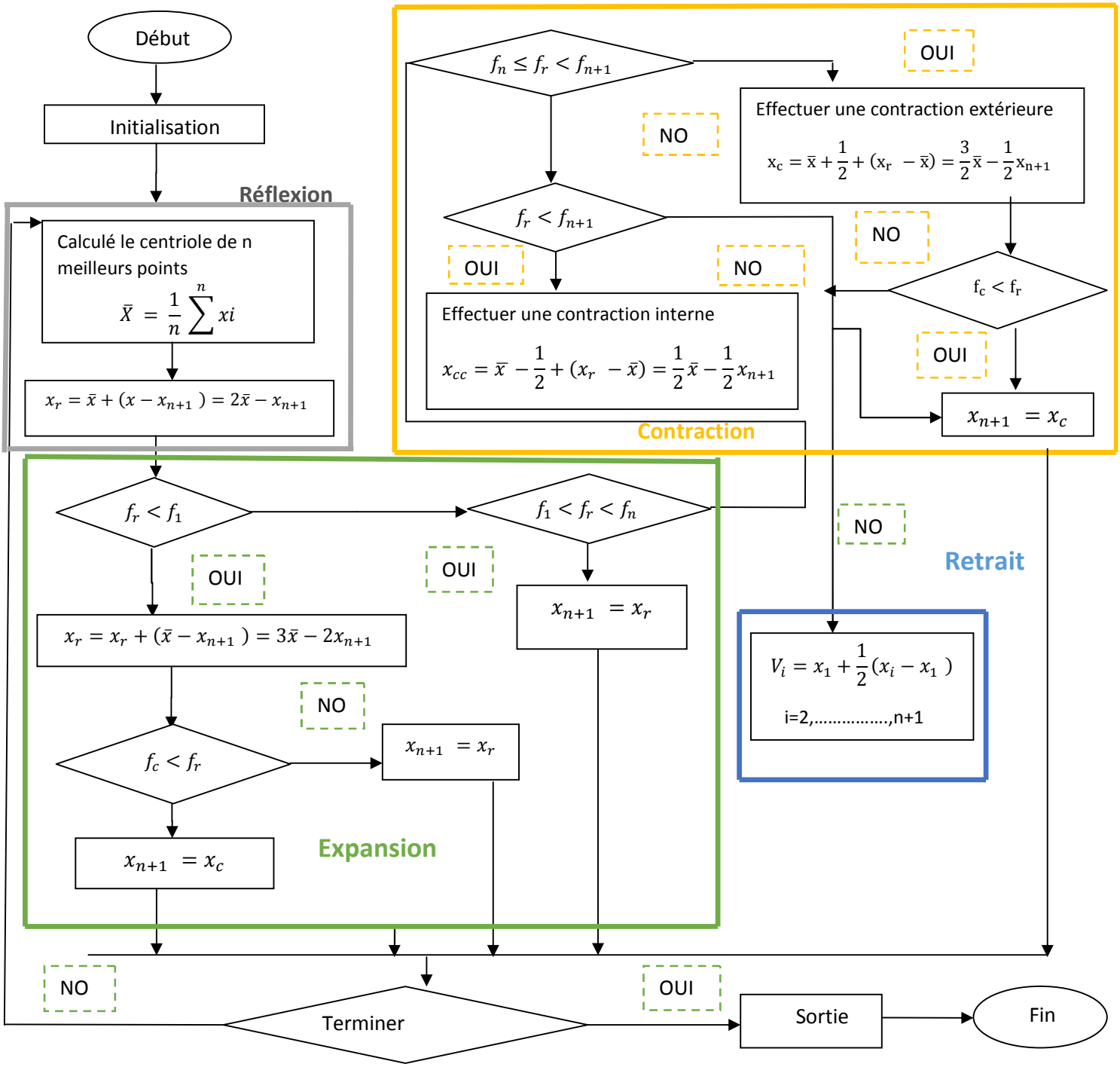


Figure III.4 Organigramme de l'algorithme de Nelder_Mead

III.5 L'algorithme génétique

L'algorithme génétique est une heuristique de recherche qui imite le processus de sélection naturelle. L'idée avec GA est d'utiliser ce pouvoir d'évolution pour résoudre des problèmes d'optimisation. Le père de l'algorithme génétique original était John Holland qui l'a inventé au début des années 1970 [47]. Son élève D.E. Goldberg s'est occupé de sa mise en œuvre dans les années 80 [48]. En général, les algorithmes génétiques ont cinq composants de base, résumés par Michalewicz [49] :

- Une représentation génétique de la solution au problème
- Un moyen de créer une population initiale de solutions
- Une fonction d'évaluation des solutions d'évaluation en fonction de leur aptitude
- Les opérateurs génétiques qui modifient la composition génétique des enfants pendant la reproduction
- Valeur pour les paramètres des algorithmes génétiques

L'algorithme génétique maintient une population d'individus, pour la génération t. Chaque individu représente une solution potentielle au problème. Chaque individu est évalué pour donner une mesure de son aptitude. Certains individus subissent des transformations stochastiques au moyen de tests génétiques. Opérations pour former les nouveaux individus. Après plusieurs générations, l'algorithme converge vers le meilleur individu, ce qui représente, espérons-le, une solution optimale ou sous-optimale au problème.

D'une façon simplifié le mécanisme au niveau moléculaire est le suivant : deux chromosomes se réunissent, et un échange d'information génétique est effectué. Ce dernier processus est appelé le croisement, puisque les composantes génétiques sont croisées d'un chromosome à l'autre. L'opération de croisement se passe dans un environnement dans lequel le choix d'un partenaire ou l'opération de sélection est une fonction de correspondance, par exemple on choisit le plus compétitif dans son environnement.

Les deux processus qui contribuent le plus à l'évolution sont le croisement et la correspondance basée sur la sélection / reproduction. Il y a eu des preuves mathématiques qui montrent que le processus de reproduction basé sur la correspondance est en fait sous-optimal. La mutation joue aussi un rôle dans le

processus de l'évolution, La figure (III.5) présente l'organigramme de l'algorithme génétique.

III.5.1 L'organigramme l'algorithme génétique

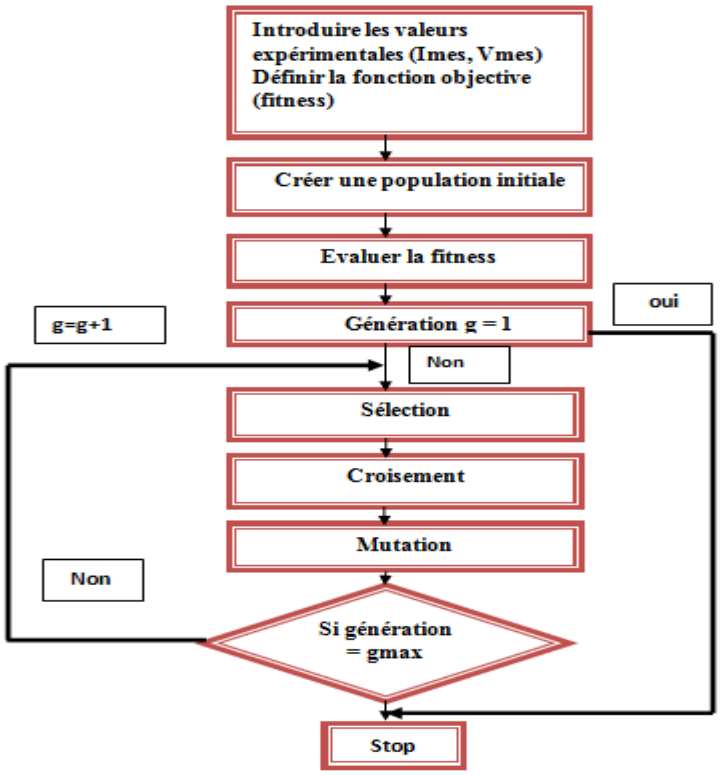


Figure III.5 Organigramme de l'algorithme génétique

III.6 Résultat de la simulation

L'algorithme de Nelder_Mead 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 ISOFOTON 106/12 ont été utilisées. Le tableau (III.1) résume sa caractéristique. Le tableau (III.2) récapitule les bandes supérieure et inférieure du module PV.

Dans le tableau (III.3), les paramètres extraits utilisant l'algorithme N_M sont décrits. Une comparaison entre les caractéristiques mesurées (I_V), (P_V) et celles estimées à l'aide des paramètres extraits du modèle à cinq paramètres donné par (III.11) est présentée dans la figure (III.6), et la figure (III.7). Le test de validation utilisant différentes conditions météorologiques est présenté aux figures (III.8), (III.9), (III.10) et

(III.11). Enfin, lors du processus d'extraction, la vitesse de convergence de l'algorithme N_M est illustrée par la figure (III.2).

Caractéristique électriques	ISOFOTON 106/12
P_{mp}(W)	106
V_{oc}(V)	21.6
I_{sc}(A)	6.54
V_{mp}(V)	17.4
I_{mp}(A)	6.10
αI_{sc} (%/°C)	0.060
βV_{oc} (%/°C)	-0.36

Tableau III.1 Caractéristique électriques de module ISOFOTON 106/12

Les paramètres	ISOFOTON 106/12
Io (A)	$[10^{-7}_\ 10^{-4}]$
Iph (A)	[0_10]
Rs (Ω)	[0_1]
Rsh (Ω)	[0_100]
n	[0_75]

Tableau III.2 Valeurs supérieures et inférieures du module PV ISOFOTON 106/12

Isat (A)	4.6365e-006
Rs (Ω)	0.4380
Rp (Ω)	66.6252
Iph (A)	4.0963
n	51.1791
RMSE	0.0130

Tableau III.3 Les paramètres extraits de module PV ISOFOTON106/12

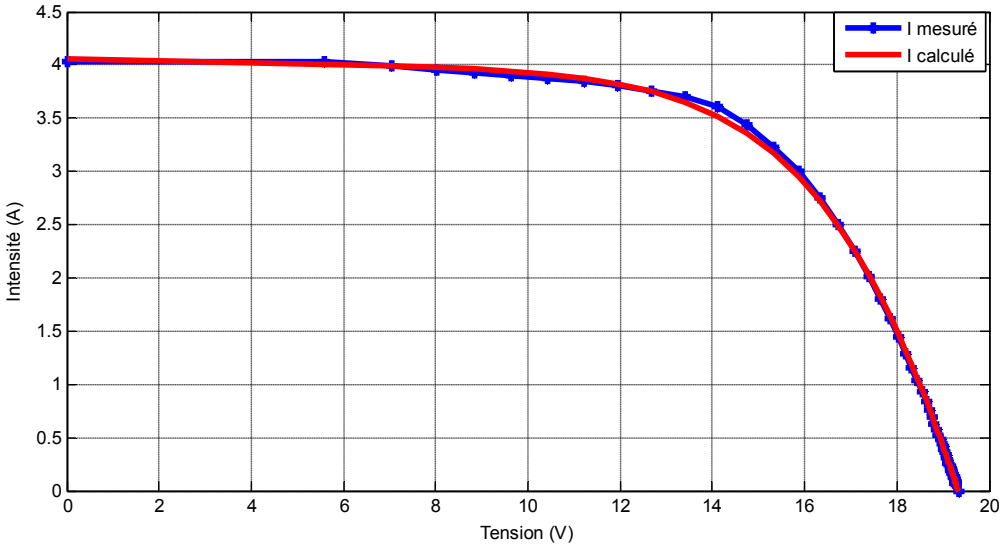


Figure III.6 Courbe de I-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour (G=959W/m², T=48.8°C)

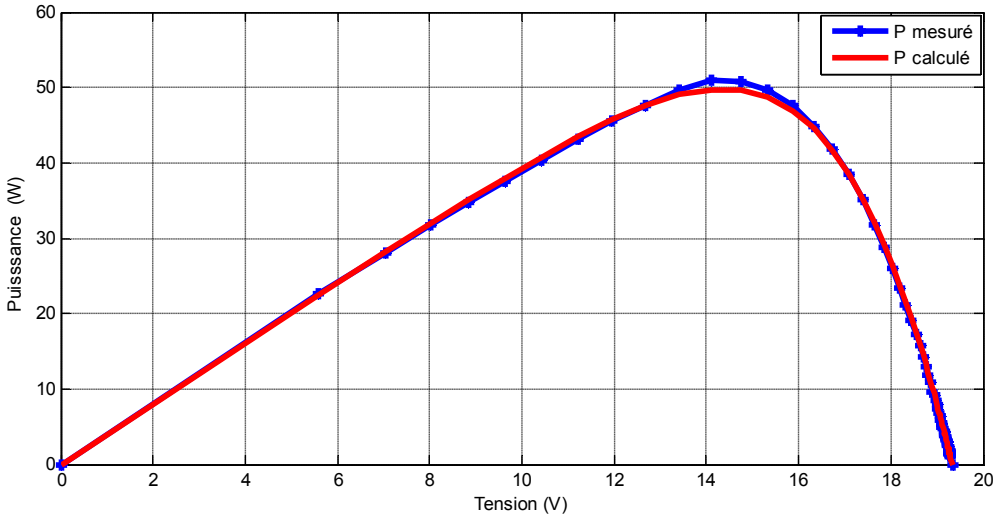


Figure III.7 Courbe de P-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour (G=959W/m², T=48.8°C)

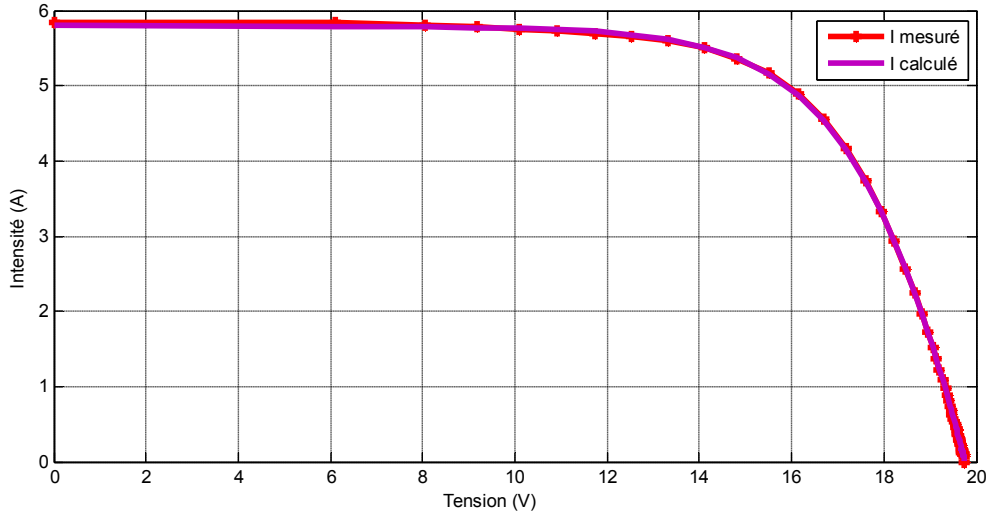


Figure III.8 Courbe IV mesurée et calculée du module ISOFOTON106/12 (G=923 W/m², T=30.9°C)

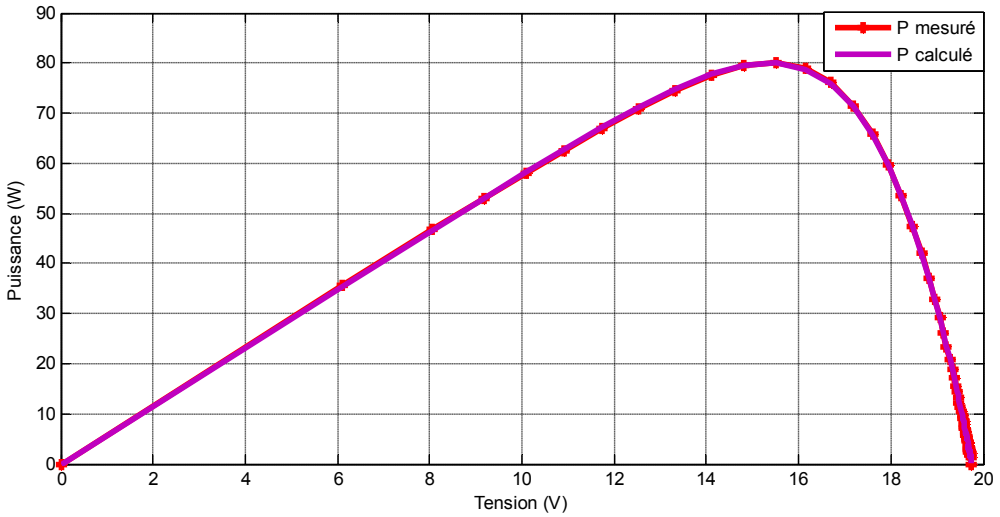


Figure III.9 Courbe PV mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 (G=923 W/m², T=30.9°C)

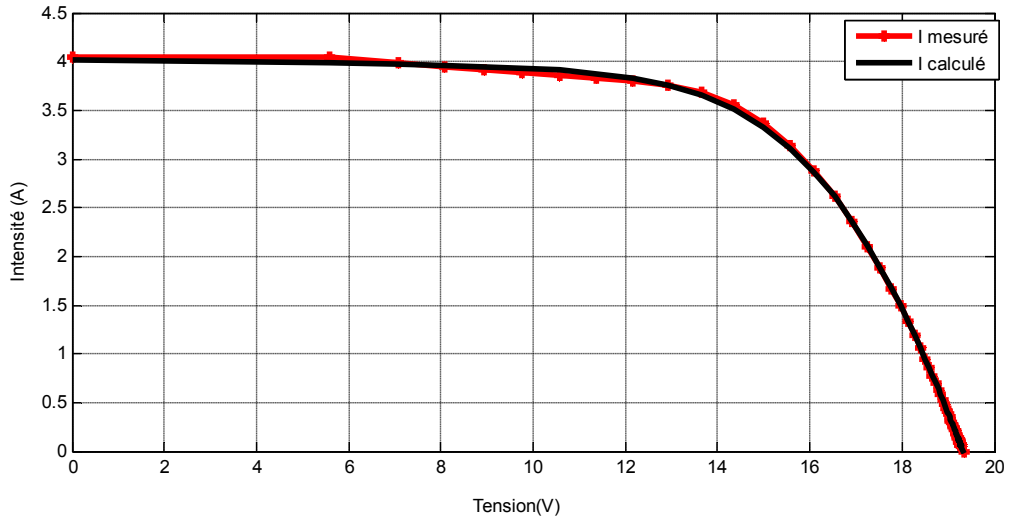


Figure III.10 Courbe IV mesurée et calculée du module ISOFOTON106/12

(G=968W /m^2, T=48.7°C)

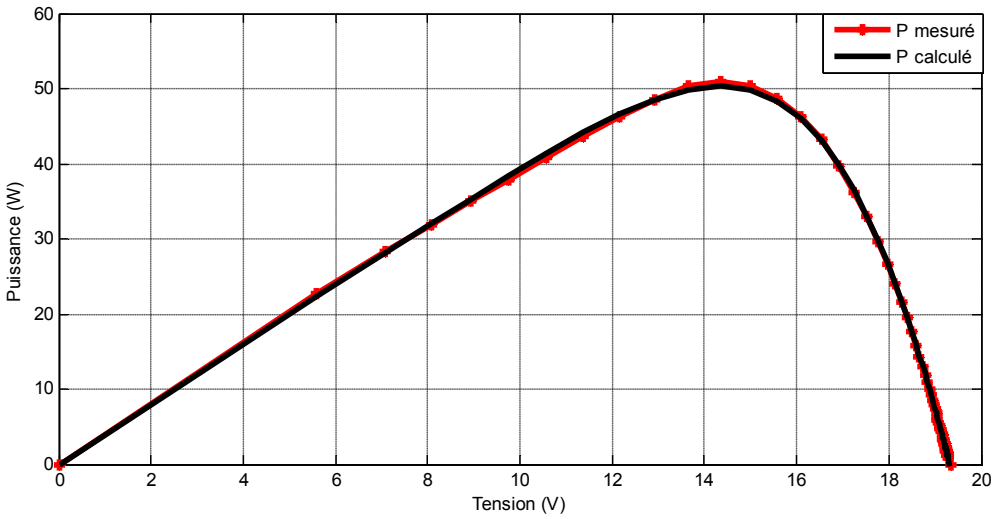


Figure III.11 Courbe PV mesuré et calculé du module ISOFOTON106/12

Pour (G=968W /m^2, T=48.7°C)

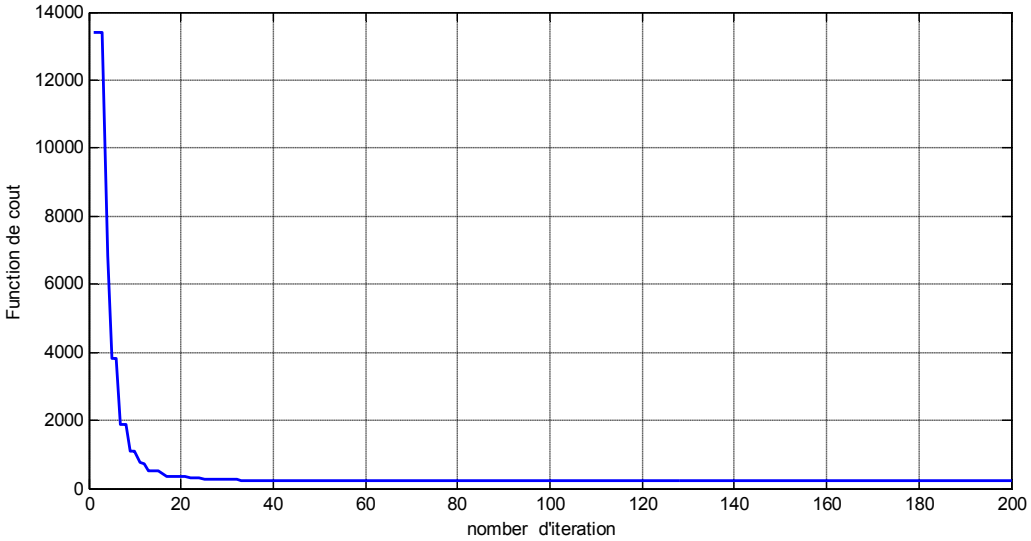


Figure III.12 Vitesse de convergence de l'algorithme N-M pendant le processus d'extraction ISOFOTON106/12 (G=959W/m² T=48.8°C)

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.6.1 Comparaison de la méthode Nelder_Mead avec l'algorithme génétique

Pour avoir une comparaison objective, on applique l'algorithme génétique sur le même module ISOFOTON106/12 pour les mêmes conditions météorologiques (G=959W/m², T=48.8 °C). Les résultats de simulation sont présentés par les figures (III.15), (III.16).

A partir des ces résultats, on peut conclure que la méthode N_M donne des meilleures performances par apport à l'algorithme génétique. Le tableau (III.4) valide la conclusion trouvé par les figures.

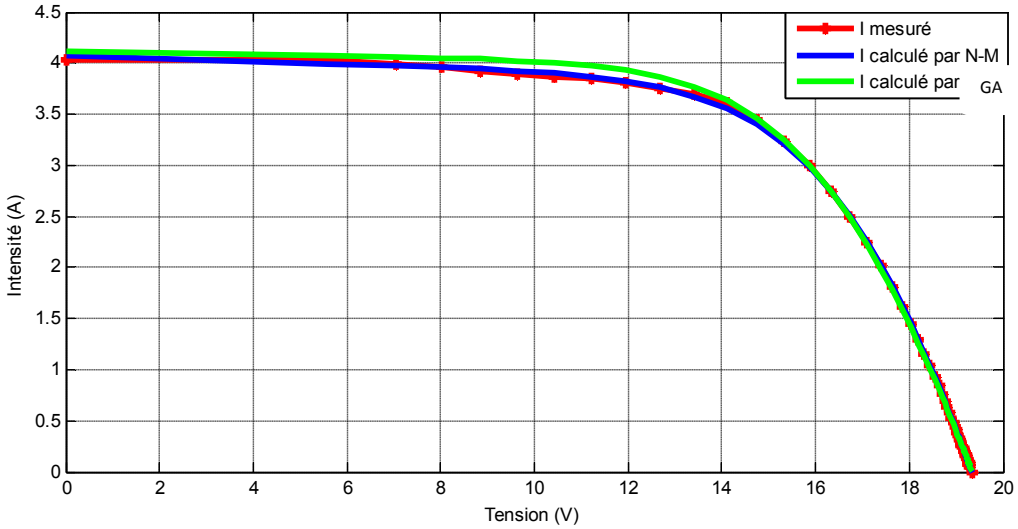


Figure III.13 Courbe I-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 (G=959W/m², T=48.8°C)

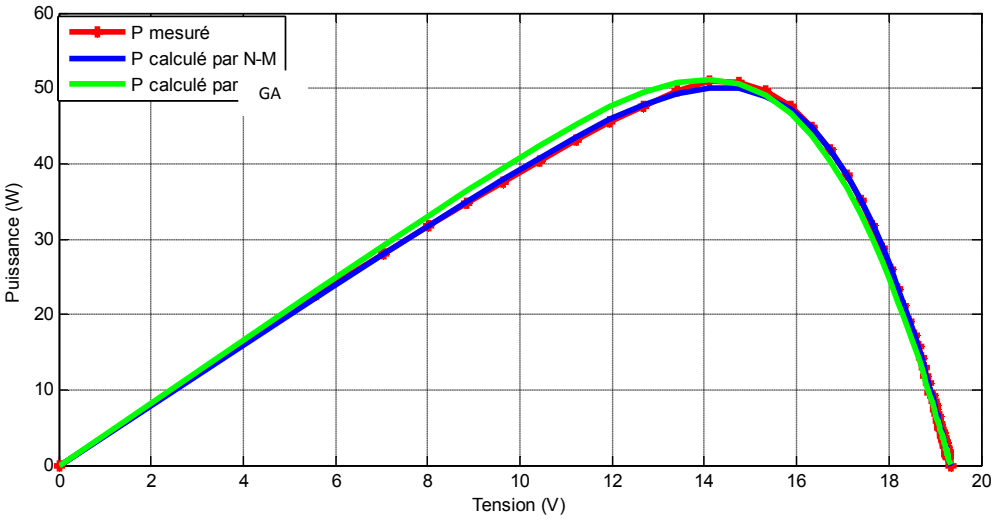


Figure III.14 Courbe P-V mesurée et calculée du module PV ISOFOTON106/12 pour (G=959W/m², T=48.8°C)

	Méthode de Nelder_ Mead	Algorithme Génétique
Io(A)	4.6365e-006	2.3745e-005
Rs (Ω)	0.4380	0.3797
Rsh (Ω)	66.6252	110.8476
Iph (A)	4.0963	4.0514
N	51.1791	61.4752
RMSE	0.0130	0.0164

Tableau III.4 Etude comparative avec l'algorithme Génétique

Une étude comparative avec trois autres algorithmes d'optimisation trouvés dans la littérature [50, 51, 52] a été réalisée pour vérifier les performances de l'algorithme proposé. Les algorithmes sont les suivants: évolution différentielle (DE), optimisation des essaims de particules (PSO) et colonie d'abeilles (ABC). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau (III.5). Les valeurs de RMSE (en tant que critère de test), permettent de conclure la bonne qualité des paramètres identifiés en utilisant l'algorithme N_M par rapport à ceux obtenus par DE, PSO et ABC.

	N_M	DE	PSO	ABC
I_{ph}	4.0963	6.71	6.73	6.73
I_{sat}	4.6365e-006	1.62e -005	1e-005	1.38 e -005
n	51.1791	62.53	60.24	61.76
Rs	0.4380	0.12	0.13	0.12
Rp	66.6252	120	95.50	103
RMSE	0.0130	0.018	0.018	0.015

Tableau III.5 Etude comparative des algorithmes d'optimisation

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a utilisé une méthode pour extraire les paramètres de la caractéristique I_V d'une cellule photovoltaïque. Cette méthode est basée sur l'algorithme de Nelder_Mead implémentée sous l'environnement MATLAB. Le modèle choisi est celui d'une diode (ODM)

L'application de l'algorithme Nelder Mead pour extraire les cinq paramètres électriques d'un module PV : I_{ph}, I_0, R_s, R_{sh} et n. L'algorithme proposé a été appliqué au module ISOFOTON 106/12. Les paramètres extraits ont été intégrés dans l'équation caractéristique, puis testés par rapport aux mesures de courbes I_V et P_V. Les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de l'algorithme N_M proposé pour extraire les paramètres du module PV.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Conclusion et Perspective

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules en série et/ou parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale. 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 Nelder Mead pour extraire les cinq paramètres électriques d'un module PV tel que : I_{ph}, I_0, R_s, R_{ch} et n. L'algorithme proposé a été appliqué au module ISOFOTON 106/12. 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 l'algorithme N-M proposé pour extraire les paramètres du module PV. Enfin, une étude comparative avec d'autres algorithmes heuristiques tels que GA, DE, PSO et ABC a montré les bons résultats de l'algorithme N-M.

L'algorithme N-M s'est avéré être un bon optimiseur pour la détermination des paramètres électriques des cellules solaires.

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 cellules, 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 la cellule solaire.

La perspective principale de notre travail est de trouver et appliquer un algorithme ou une loi de commande efficace et optimale permettant d'extraire le maximum de

puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV). Dans ce contexte, une stratégie pour déterminer la configuration optimale des réseaux de modules photovoltaïques (PV) dans des conditions d'ombrage est désirée.

Bibliographie

[1] F. Hananou et A. Rouabah, 'Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque', master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique 2014

[2] L. Han, N. Koide, Y. Chiba and T. Mitate, "Modeling of an Equivalent Circuit for Dye Sensitized Solar Cells", Applied Physics Letters, Vol. 84, N°13, 2433.

[3] W. Xiao, MGJ Lind, W.G. Dunford and A. Capel, "Real-time Identification of Optimal Operating Points in Photovoltaic Power Systems". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, N°4, pp. 1017 – 1026, 2006.

[4] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV Panel Model Based on Datasheet Values", IEEE International Symposium on Electronics, ISIE 2007, Vigo, Spain, June 4-7, 2007.

[5] M. Ye, X. Wang and Y. Xu, "Parameter Extraction of Solar Cells Using Particle Swarm Optimization", Journal of Applied Physics, Vol. 105, N°9, 094502, 2009.

[6] T. Huld, R. Gottschalg and H.G. Beyer, "Topic M. Mapping the Performance of a PV modules, Effects of Module Type and Data Averaging", Solar Energy, N°84, pp. 324 -328, 2010.

[7] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch and C. Boutrit, "Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameters with Microcomputers", International Journal of Solar Energy, Vol. 4, N°1, pp. 1 – 12, 1986.

[8]A. Askarzadeh and A. Rezazadeh, "Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach," Solar Energy, vol. 90, pp. 123-133, 2013.

[9] S. Krour, 'Optimisation des paramètres d'une cellule photovoltaïque par les algorithmes génétique', Mémoire de magistère instrumentation, Université de Sétif 1, 2014.

[10] A. Ait Mokrane et A. Moussaoui, 'Extraction des Paramètres d'une Cellule Photovoltaïque', mémoire de master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique 2017.

[11] D. Ghiles, 'Modélisation des systèmes photovoltaïques avec des techniques du softcomputing', Master en automatique, Université de Bejaia, 2015.

[12] A. Labouret et M. villoz préface de jean louisbal ‘Energie solaire photovoltaïque’, livre 4 éditions, 2008.

[13] B.Flèche-D. Delagnes ‘Energie solaire photovoltaique.doc’, juin 2007.

[14] M.N. Mchalikh et CH. Hamada ’’Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau’’ Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.

[15] M.N. José ‘Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible’.Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.

[16] T.S. Akassewa ‘Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome‘.Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[17] J, Bernard. ‘Energie solaire calculs et optimisation’, Ellipse Edition Marketing. 2004

[18] R .Bernard, G.Merguy, M. Schwartz, ‘Le rayonnement solaire : conversion thermique et application. Technique et documentation’, deuxième Edition-1980.

[19] N, Bellel. ‘Contribution à la réalisation et simulation d’un capteur plan à eau type collecteur’, thèse de magistère, Université de Constantine 2016.

[20] M, Capderou. ‘Atlas solaire de l’Algérie’, O.P.U, Alger 1985.

[21] A, Mefti ; M, Y, bouroubi ; H, Mimouni. ‘Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables’, N°2, p 12, décembre 2002.

[22] O. Nichapour ‘simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières inter digités’, Thèse de doctorat. L’institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.

[23] H. Berrezzoug ‘Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d’une cellule photovoltaïque’ Mémoire de Master Filière : physique Spécialité :physique des matériaux 2016.

[24] M.Urien, ‘cellules photovoltaïques organiques à base copolymère à bloc de type rigide flexible’ thèse de doctorat, bordeaux, 2008.

[25] A. Bousskine, N. Guermouche, 'Contribution à l’étude des systèmes de pompage photovoltaïque ', Mémoire d’ingénieur, Université de Bejaia, 2010.

[26] A. Géotzberger, J. Luther, G. Willeke. Solar cells : past, present, future, Solar energy materials & Solar cells, 92, 1593–1604, 2008.

[27] Site internet ‘Google, 'la cellule photovoltaïque’.

[28] S. petibon ‘ Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques’, université de Toulouse, 2009.

[29] L. abbassen ‘Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque’ Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.

[30] H. Belghitri ‘ Modélisation, simulation et optimisation d’un système hybride éolien-photovoltaïque’ mémoire de magister, 2009.

[31] M. Adouane, ‘Etude et conception d’une stratégie de commande d’un onduleur connecté au réseau électrique’, Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[32] R. Roshanak ‘Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ‘, Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.

[33] S. Petibon ‘ Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques ‘.Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

[34] K. Bouzidi, ‘Etude comparatives des méthodes d’extraction des paramètres des cellules solaires’, Mémoire de magister, département de physique, faculté des sciences, université de Sétif, 2007.

[35] A. Chebana, ‘Contrôle d’un système photovoltaïque connecte au réseau’, Mémoire de master électrotechnique, Université de Biskra 2014.

[36] N. Touil, Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque, Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued Faculté des Sciences et de la Technologie Mémoire de Fin d'Étude En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique 2015.

[37] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed ' Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Model ' 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.

[38] M. Z. F.Z. Zerhouni, 'Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique,' Revue des Energies Renouvelables, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.

[39] A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.

[40] A. Blorfan, ' contribution à l'étude de l'association d'une source photovoltaïque et d'un filtre actif', thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université de Haute-Alasace.

[41] T. Bouguerra., 'Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et

en alternatif', Mémoire Magister, université mentouri de constantine1, 2014.

[42] H. Belghitri et H. 'Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque', mémoire de magister, 2009.

[43] E. Garoudja, K. Kara, A. Chouder and S. Silvestre, "Parameters Extraction of Photovoltaic Module for Long-Term Prediction Using Artifical Bee Colony Optimization," 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 2015, Tlemcen, Algeria, 25-27 May, 2015.

[44] D. Boukhers, 'Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage', Mémoire magister en électrotechnique, Université de Constantine, 2007.

[45] M. Hamidouche et B. Mokhtari, 'Etude d'un système photovoltaïque', Mémoire de master électrotechnique, Université de Bejaia, 2016.

[46] J. Werner, Appi Phys A. Vol 47. 1988.

[47] S. Amedé et R.F.Gérard, 'Algorithme génétique', Thèse de fin d'études, Université de Paris, 2004.

[48] N. Barnier et P. Brisset, 'Optimisation par algorithme génétique sous contraintes', Ecole

Nationale de l'Aviation Civile Toulouse, 1999.

[49] H. Margaret Wright 'Nelder, Mead, and the Other Simplex Method' Mathematics Subject Classification 201049M30, 65K10, 90C56.

[50] W. Tfaili " conception d'un algorithme de colonie de fourmis pour l'optimisation continue dynamique " science de l'ingénieur, 2007.

[51] N. F. Abdul Hamid, N. A. Rahim, and J. Selvaraj, "Solar cell parameters extraction using particle swarm optimization algorithm," in Clean Energy and Technology (CEAT), 2013, IEEE Conference, pp. 461-465.

[52] K. Ishaq, Z. Salam, H. Taheri, and A. Shams din, "Parameter extraction of photovoltaic cell using differential evolution method," in Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), 2011 IEEE, 2011, pp.10-15.