

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : **Énergies Renouvelables en Électrotechnique**

Intitulé :

Méthodes d'identifications et d'extractions des paramètres des panneaux photovoltaïques.

Présenté par :

- **Semghouni Ishaq**
- **Lakhal Rania**
- **Behloul Hayat**

Soutenu le : 25/06/2023

Devant les Jury :

<i>M. Benmohamed Fayçal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Toumi Khalid</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. Lahcen Reda</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciement

Ce travail, est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices.

Je remercie tout d'abord le tout puissant qui, par sa grâce m'a permis d'arriver au bout de mes efforts en me donnant la santé, la force, le courage et en me faisant entourer des merveilleuses personnes dont je tiens à remercier.

Je tiens à adresser mes remerciements à ma famille qui m'ont toujours soutenus et poussés à continuer et d'aller devant jusqu'au bout.

*Nous remercions Monsieur **TOUMI Khalid**, notre enseignant et encadreur. Son soutien, ses compétences, et sa clairvoyance ont été d'une aide inestimable. On le remercie surtout pour son attention, ses conseils, sa patience, sa disponibilité et tout le temps qu'il nous a consacré afin d'accomplir notre travail.*

Nous exprimons nos gratitude à Monsieur le président de jury d'avoir accepté d'examiner ce mémoire. Nous remercions Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont portés à ce travail.

Merci à tous ceux qui de près ou de loin a contribué à l'accomplissement de ce travail.

Dédicace

A mes parents, ma source du pouvoir

Je ne trouverai pas les mots pour exprimer l'immense respect que je vous porte, ni la profonde reconnaissance que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien être.

J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi.

Que le tout puissant ALLAH vous garde et vous procure santé, bonheur, amour et longue vie.

A mes belles sœurs Chahrazed, Ismahan et mes frères Belqassem et Lhoucein

Et mes chères Neveux Yahya Anis et Mohamed Rayan.

Je veux partager avec vous cette fierté, je vous remercie éternellement pour votre soutien, et je vous souhaite que la réussite, l'amour, la santé, la tendresse et que dieu vous protège.

A la mémoire de mes grands-mères et mes grands-pères

A ma chère famille d'or SEMGHOUNI et ACHOUR

Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et mon amour infini.

Mes partenaires de travail Rania et Hayat

*Je veux remercier sincèrement **Mr. TOUMI** notre promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, ses directions judicieuses, sa patience et sa diligence, et ses suggestions ont grandement facilité ce travail.*

A mes cousins et mes amis que j'adore : Taher, Mourad, Fouad, Sidahmed, Amine, Hicham, Youcef Sid Ahmed, Abderazak, Farid, Azziz, Tariq, Farouk, Aymen, Mohamed, Chaouki et Ahmed.

SEMGHOUNI Ishaq



Dédicace

Tout d'abord nous remercions dieu Allah pour le courage et la force pour bien compléter ce travail. Mes très chers parents, pour leur sacrifice, et qui n'ont jamais cessé de m'encourager que Dieu

Mes très chers frères : mohamed abd halim, faouzi ilyes.

Ma grand-mère que dieu me le garde.

Tous mes amis (es) :

*Nous remercions particulièrement notre encadreur **Dr.khaled toumi** pour ses remarques, ses conseils, sa confiance et sa patience. Ce fut notre honneur de travailler avec vous. Nous remercions aussi les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Nous remercions tous nos enseignants de département de la science et de la technologie. Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

LAKHAL Rania



Dédicace

Après de nombreuses années de succès de Dieu et m'honorant avec patience dans l'étude, le travail et la connaissance tout au long de ces années de ma carrière universitaire.

Je remercie mes parents pour sa patience et son sacrifice pour que j'atteigne ce que vous souhaitez pour moi.

*Je dédie cet humble travail à vous publiquement que vous méritez le meilleur de ma vie... et je vous en remercie Un grand merci au professeur en charge de ce travail **Mr. TOUMI***

Je le remercie de m'avoir donné une partie de son expertise car il a été crédité d'avoir mené à bien ce travail.

Je remercie tous les professeurs de l'université et ceux qui m'ont aidé moralement et éthiquement.

Et à tous mes amis et collègues et à toute la communauté des énergies renouvelables. Je m'excuse pour ce que j'ai oublié les étudiants en génie électrique et toute la promotion 2022/2023

BEHLOUL Hayat



RESUME¹ :

L'énergie photovoltaïque a pris une grande importance. À cette fin, de nombreux efforts et recherches ont été axés sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV).

L'objectif de ce travail est axés sur l'analyse du fonctionnement du module photovoltaïque L'étude est divisée, en particulier, en trois volets principaux: la détermination des principaux paramètres de l'équation qui gouverne les caractéristiques I-V des modules, l'estimation de leurs performances aux conditions standards et l'analyse de la dégradation de leurs performances par rapport à leurs valeurs initiales. La méthode proposée pour l'extraction des principaux paramètres des modules est la méthode Newton-Raphson. Les paramètres extraits testés par rapport à plusieurs caractéristiques I-V statiques du module PV collectées dans différentes conditions de fonctionnement. Une étude comparative entre différentes techniques d'estimation des paramètres présentée pour démontrer l'efficacité de l'approche proposée.

MOTS CLES² : caractéristiques I-V , dégradation , Paramètres Photovoltaïque, Newton-Raphson, modules.

المخلص:

اكتسبت الطاقة الكهروضوئية أهمية كبيرة. تحقيقاً لهذه الغاية ، تم التركيز على الكثير من الجهد والبحث على تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية (PV)

يتركز الهدف من هذا العمل على تحليل تشغيل وحدة الكهروضوئية يتم تقسيم الدراسة ، على وجه الخصوص ، إلى ثلاثة أجزاء رئيسية: تحديد المعلمات الرئيسية للمعادلة التي تحكم خصائص للوحدات I-V، وتقدير أدائها في الظروف القياسية و تحليل تدهور أدائها مقارنة بقيمتهم الأولية . الطريقة المقترحة لاستخراج المعلمات الرئيسية للوحدات هي طريقة نيوتن رافسون .

تم اختبار المعلمات المستخرجة إلى عدة ميزات ثابتة من وحدة I-V تم جمعها في ظروف التشغيل المختلفة وهناك دراسة مقارنة بين تقنيات تقدير المعايير المختلفة عرضة على إثبات فعالية النهج المقترح .

الكلمات المفتاحية: الميزات I-V , تدهور , إعدادات الكهروضوئية , نيوتن رافسون , وحدات

ABSTARCT :

Photovoltaic energy has taken on great importance. To this end, much effort and research has been focused on improving the efficiency of photovoltaic (PV) systems.

The objective of this work is focused on the analysis of the operation of the photovoltaic module the study is divided, in particular, in three main components: the determination of the main parameters of the equation that governs the I-V features of the modules , the estimation of their performance at the standard conditions and the analysis of the degradation of their performance compared to their initial values. The method proposed for the extraction of the main parameters of the modules is the Newton-Raphson method. The extracts parameters tested relative to several static I-V features of the PV module collected in different operating conditions . A comparative study between different parameter estimating techniques presented to demonstrate the effectiveness of the proposed approach .

Keywords: caractérisation I-V, degradation, photovoltaic setting , Newton Raphson, Modules

Nomenclature

I : courant disponible [A].

I_d : courant de polarisation de la diode [A].

I_{sh} : courant de la résistance shunt [A].

I_{ph} : courant produit par la photopile [A].

I_s : courant de saturation [A].

$I_{ph,n}$: le courant produit dans les condition (STC) [A].

$I_{cc,n}$: Le courant de court-circuit nominale [A].

I_{cc} : intensité de courant de court-circuit [A].

$I_{s,n}$: Le courant de saturation dans les condition (STC).

I_{max} : intensité de courant à puissance maximale [A].

V : tension à vide d'une cellule [V].

V_t : tension thermique d'une cellule [V].

V_j : tension aux bornes de la jonction [V].

V_m : tension à puissance maximale [V].

$V_{oc,n}$: Tension de circuit ouvert nominale [V].

V_{oc} : Tension en circuit ouvert [V].

V_{pv} : la tension du panneau photovoltaïque [V].

V_{max} : Tension maximale.

N_s : Nombre de cellule en série.

N_p : Nombre de cellule en parallèle.

P : Puissance disponible [W].

P_{max} : Puissance maximale.

FF : Facteur de forme.

η : Efficacité de conversion d'énergie.

Eg : Energie de Gap de la cellule [ev].

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

T : La température ambiante [K].

Tn,Tref : la température dans les conditions (STC) [K].

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

KI : coefficient de température de courant de court-circuit.

Gn : ensoleillement dans les conditions (STC).

G : ensoleillement (w/m²).

A : le facteur d'idéalité.

Rsh : la résistance parallèle [Ω].

Rs : la résistance série [Ω].

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure (I.1) : Schéma de principe d'un Générateur photovoltaïque	3
Figure (I.2) : Rayonnement solaire	6
Figure (I.3) : Types de rayonnements solaires reçus au sol	7
Figure (I.4) : Spèctre de rayonnement solaire	8
Figure (I.5) : L'effet photovoltaïque	9
Figure (I.6) : Schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
Figure (I.7) : Principe de la cellule photovoltaïque	11
Figure (I.8) : Cellule amorphe	12
Figure (I.9) : Cellule monocristalline	13
Figure (I.10) : Cellule poly cristalline	13
Figure (I.11) : Module photovoltaïque	14
Figure (I.12) : Les différentes zones de Caractéristique I(V)	15
Figure (I.13) : Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série	16
Figure (I.14) : Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle ...	16
Figure (I.15) : Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque	17
Figure (I.16) : Caractéristique P(V) d'un module solaire photovoltaïque	18
Figure (I.17) : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques	19
Figure (I.18) : Circuit équivalent d'une cellule PV – Model idéal	21
Figure (I.19) : Circuit équivalent d'une cellule réelle	23
Figure (I.20) : Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement $T=25^{\circ}\text{C}$	25
Figure (I.21) : Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement $T=25^{\circ}\text{C}$	25
Figure (I.22) : Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W}/\text{m}^2$)	26

Liste des figures

Figure (I.23) : Caractéristique P(V) d'un d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m ²)	26
Figure (I.24) : Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de résistance série (T=25°C, G=1000W/m ²)	27
Figure (I.25) : Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de résistance série (T=25°C, G=1000W/m ²)	27
Figure (I.26) : Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de résistance shunt (T=25°C, G=1000W/m ²)	27
Figure (I.27) : Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de résistance shunt (T=25°C, G=1000W/m ²)	27
Figure (I.28) : Panneaux solaire	28

Chapitre II : Paramètres des dégradations et les méthode d'identification

Figure (II.1) : Les différents composants du module photovoltaïque soumis à la dégradation	31
Figure (II-2) : La dégradation du module PV par la corrosion	32
Figure (II.3) : Dégradation du module photovoltaïque par délamination	33
Figure (II.4) : Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées	34
Figure (II.5) : Module photovoltaïque présentant des bris de verre	35
Figure (II.6) : Dégradation du module photovoltaïque par des points chauds sur les bords des coins supérieurs	36
Figure (II.7) : Bulles présentes sur la face arrière d'un module PV	37
Figure (II.8) : Image thermographique d'une cellule PV en silicium	39
Figure (II.9) : Image par électroluminescence d'un module photovoltaïque avec des cellules De grades	40
Figure (II.10) : Circuit équivalent au modèle à trois paramètres	41
Figure (II.11) : Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres	42
Figure (II.12) : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes	44
Figure (II.13) : Circuit équivalent au modèle à six paramètres.....	44

Chapitre III : Application des méthodes d'identifications, résultats et discussions

Figure (III.1) : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode	47
Figure (III.2) : Illustration de la méthode de Newton Raphson.....	48
Figure (III.3) : Caractéristique I(V) dans les conditions de test standards.....	51
Figure (III.4) : Caractéristique P(V) dans les conditions de test standards	51
Figure (III.5) : Caractéristique courant-tension I(V).....	52
Figure (III.6) : Caractéristique puissance-tension P(V).....	53
Figure (III.7) : Comparaison des caractéristiques courant-tension I(V).....	54
Figure (III.8) : Comparaison des caractéristiques puissance-tension P(V).....	54
Figure (III.9) : Organigramme de calcul de la méthode Newton-Raphson.....	57
Figure (III.10) : Bloc de simulation d'un générateur photovoltaïque.	58
Figure (III.11) : Les caractéristiques I(V).....	59
Figure (III.12) : Les caractéristiques P(V).....	59
Figure (III.13) : La Validation de la méthode NR graphique, caractéristique I(V).....	60
Figure (III.14) : La Validation de la méthode NR graphique, caractéristique P(V).....	61

Liste des tableaux

Chapitre III : Application des méthodes d'identifications, résultats et discussions

Tableau (III.1) : Paramètres de la fiche technique du JW-G2000 monocristallin dans STC.....	50
Tableau (III.2) : Les paramètres initiaux.....	50
Tableau (III.3) : Résultats des paramètres d'extractions de la méthode Newton- Raphson.....	58

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1 Introduction	4
I.2 Historique	5
I.3 L'énergie solaire	5
I.3.1 Le soleil.....	5
I.3.2 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	6
I.3.2.1 Avantages	6
I.3.2.2 Inconvénients	6
I.4 Rayonnement solaire	6
I.4.1 Différents types de rayonnement	7
I.4.1.1 Le rayonnement direct.....	7
I.4.1.2 Le rayonnement diffus	7
I.4.1.3 Le rayonnement réfléchi.....	7
I.4.1.4 Le rayonnement global.....	7
I.5 Notions préliminaires sur rayonnement solaire	8
I.5.1 Spectre de rayonnement.....	8
I.6 L'effet photovoltaïque	9
I.7 La cellule solaire photovoltaïque	10
I.7.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.7.2 Les différents types de cellules photovoltaïques	12
I.7.2.1 Les cellules amorphes	12
I.7.2.2 Les cellules monocristallines	13
I.7.2.3. Les cellules poly cristalline :	14
I.8 Module photovoltaïque	15
I.8.1 Les Zones de fonctionnement du module solaire	15
I.8.2 Association De cellules ou modules photovoltaïque	16
I.8.2.1 Association en série.....	16
I.8.2.2 Association en parallèle	17
I.8.2.3 Association série-parallèle	18
I.9 Les principales caractéristiques d'un module photovoltaïque	18

Sommaire

I.9.1 La caractéristique courant-tension $I(V)$	18
I.9.2 La caractéristique puissance-tension $P(V)$	19
I.9.3 La puissance Crête	19
I.10 Générateur photovoltaïque.....	19
I.11 Paramètre des cellules photovoltaïques.....	20
I.11.1 La tension en circuit ouvert (I_{cc})	20
I.11.2 Le courant de court-circuit (V_{oc})	21
I.11.3 Le rendement η	21
I.11.4 Le facteur de forme FF	21
I.11.5 La puissance maximale (P_{max})	21
I.12 Le circuit équivalent et modèle mathématique.....	22
I.12.1 Cas d'une cellule idéale	22
I.12.2 Cas d'une cellule réelle.....	23
I.13 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	26
I.13.1 Influence de l'éclairement.....	26
I.13.2. L'influence de la température :	26
I.13.3 L'influence de la résistance série.....	27
I.13.4 L'influence de la résistance shunt.....	28
I.14 Panneau photovoltaïque.....	29
I.15 Conclusion.....	30

Chapitre II : Paramètres des dégradations et les méthode d'identification

II.1 Introduction.....	32
II.2 Dégradation d'un module photovoltaïque.....	32
II.3 Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïques	32
II.3.1 La corrosion.....	33
II.3.2 La délamination	34
II.3.3 La décoloration	35
II.3.4 Les fissures et bris de verre	37
II.3.5 Les points chauds ou Hot-spots	38
II.3.6 Les bulles	38
II.3.7 Le PID - Potentiel Induced Dégradation	39
II.4 Les moyens de détection de la dégradation du module photovoltaïque	39

Sommaire

II.4.1. Inspection visuelle	39
II.4.2 Mesure de la puissance	40
II.4.3 Imagerie infrarouge	40
II.4.4 Thermographie.....	41
II.4.5 Imagerie par électroluminescence et photoluminescence	42
II.4.6 Résonance de vibrations ultrasoniques.....	42
II.5 Électriques Modèles d'une cellule solaire.....	43
II.5.1 Modèle à une diode.....	43
II.5.1.1 Modèle d'extraction à trois paramètres (modèle idéal)	43
II.5.1.2 Modèle d'extraction à quatre paramètres.....	44
II.5.1.3 Modèle d'extraction à cinq paramètres (simple exponentielle).....	44
II.6 Méthodes d'extraction.....	44
II.6.1. Méthodes d'extraction à cinq paramètres	45
II.7 Modèle à deux diodes.....	45
II.7.1 Modèle d'extraction à sept paramètres (double exponentielle DEM).....	46
II.7.2 Modèle d'extraction à six paramètres.....	46
II.8 Conclusion	47
Chapitre III : Application des méthodes d'identifications, résultats et discussions	
III.1 Introduction	50
III.2 Modélisation de modules panneau photovoltaïque à une seule diode et la méthode numérique	50
III.3 Techniques d'estimation des paramètres	53
III.3.1 Les caractéristiques électriques de panneau photovoltaïque.....	53
III.3.2 Calculer la matrice jacobienne JV	59
III.3.3. L'organigramme de la méthode de Newton-Raphson	60
III.4. Résultats et discussions	62
III.4.1 Le schéma du bloc.....	62
III.4.2 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle	63
III.5 Conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66

Introduction générale

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin en énergie, sous ses différentes formes, a fait face à une très forte augmentation, obligeant les scientifiques à rechercher de nouvelles solutions pour fournir et valoriser les énergies, voire à rationaliser leur exploitation.

L'énergie électrique est de loin la source la plus utilisée dans divers domaines, des plus grandes usines aux plus petits appareils électroniques. Pour générer cette énergie, plusieurs technologies sont utilisées, dont les générateurs, basés sur l'électricité. Les énergies fossiles, notamment le pétrole, ou qui utilisent l'énergie nucléaire. Ces énergies posent des problèmes environnementaux voire économiques, ce qui oblige à réfléchir sérieusement aux énergies renouvelables.

Parmi les énergies les plus modernes, qui ont un bel avenir, car propres et environnementales : "l'énergie Photovoltaïque".

La première cellule photovoltaïque a été fabriquée en 1954, à base de silicium, et à ce jour c'est encore le matériau le plus utilisé. La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable à toute démarche d'optimisation des performances ou de diagnostic d'un générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est généralement représenté par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement à partir des caractéristiques courant-tension $I(V)$ et des caractéristiques puissance-tension $P(V)$.

Cette dernière s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une variété de modèles proposés par différents chercheurs. Leurs différences résident principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour déterminer divers paramètres inconnus. [1,2]

Le modèle à cinq paramètres comprend cinq paramètres, à savoir : I_{ph} (photocourant), I_s (courant de saturation), A (facteur d'idéalisation), R_s (résistance série) et R_{sh} (résistance shunt). Ces paramètres ne sont généralement pas des quantités quantifiables ou inclus dans les données de fabrication. Ainsi, ils doivent être déterminés à partir de

systèmes d'équations à différents points de fonctionnement fournis par le constructeur ou issus d'essais expérimentaux. [3]

Notre mémoire de fin d'étude s'intéresse à l'étude de la dégradation des panneaux photovoltaïques Et comment réduire ce phénomène et l'amélioration de l'efficacité du point de puissance maximale grâce à la méthode de Newton-Raphson. Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres répartis comme suit:

Dans le premier chapitre, nous avons fait des généralisations sur la technologie photovoltaïque, en commençant par les concepts de rayonnement solaire. Puis nous avons évoqué les différentes filières technologiques des cellules solaires, puis expliqué le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules solaires.

Le deuxième chapitre vise à fournir une revue approfondie de la littérature sur la dégradation des modules PV et les principaux types de dégradation définis pour les modules PV sont présentés. Ensuite, les facteurs et les méthodes de détection de la détérioration de l'unité sont étudiés. Enfin, des modèles de dégradation proposés ont également été répertoriés et discutés dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, on a abordé l'analyse des performances des modules photovoltaïques testés et le problème de dégradation en appliquons la méthode Newton-Raphson de cinq paramètres et comment obtenir de meilleurs résultats début des valeurs initiales de I_{ph} , I_s , V_T , R_s et R_{sh}

Chapitre I :
Généralités sur les
Systemes
photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque PV basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension $I(V)$ non linéaire présentant un point de puissance maximale [4].

Dans ce chapitre, nous commencerons par la définition de l'énergie solaire, puis comment les cellules photovoltaïques sont construites et ce qu'elles font et comment elles fonctionnent. Nous présentons ensuite les différents types des cellules photovoltaïques.

Enfin, les principales caractéristiques des modules photovoltaïques.

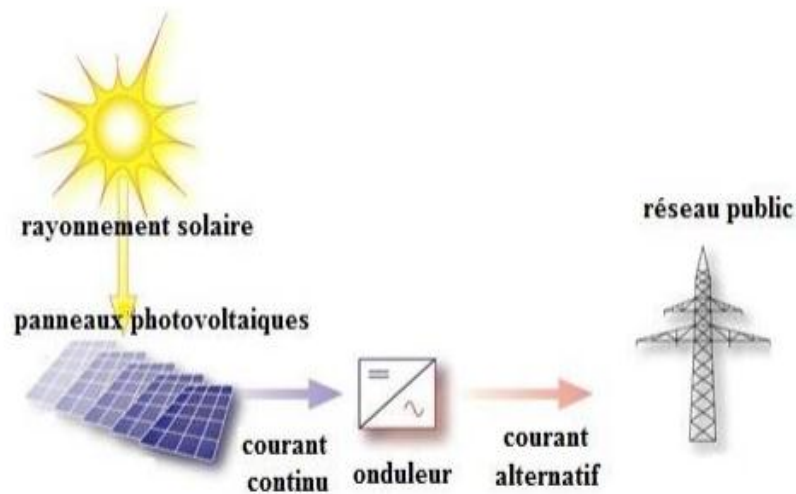


Figure (I.1): Schéma de principe d'un Générateur photovoltaïque.

I.2 Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre le processus d'utilisation de la lumière du soleil pour générer un courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens présente un article sur l'effet photovoltaïque des semi-conducteurs à l'Académie des sciences de Berlin. Mais jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, le phénomène est resté une simple curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement à une époque où l'industrie aérospatiale naissante cherchait de nouvelles solutions pour alimenter ses satellites.

1958 : Une batterie avec 9% d'efficacité est développée. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires ont été lancés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université du Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt 4 000 kilomètres en Australie. Satellites alimentés par des cellules solaires ont été lancés dans l'espace.

I.3 L'énergie solaire

I.3.1 Le soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de terre. Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir la terre. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère

terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelé la constante solaire égale à 1367W/m² [5].

I.3.2 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont : [6]

I.3.2.1 Avantages

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

I.3.2.2 Inconvénients

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

I.4 Rayonnement solaire

Notre soleil est une étoile naine qui se compose de 74% d'hydrogène, 25% d'hélium et d'une fraction d'éléments plus lourds, sa température à la surface est d'environ 5530°C [7].

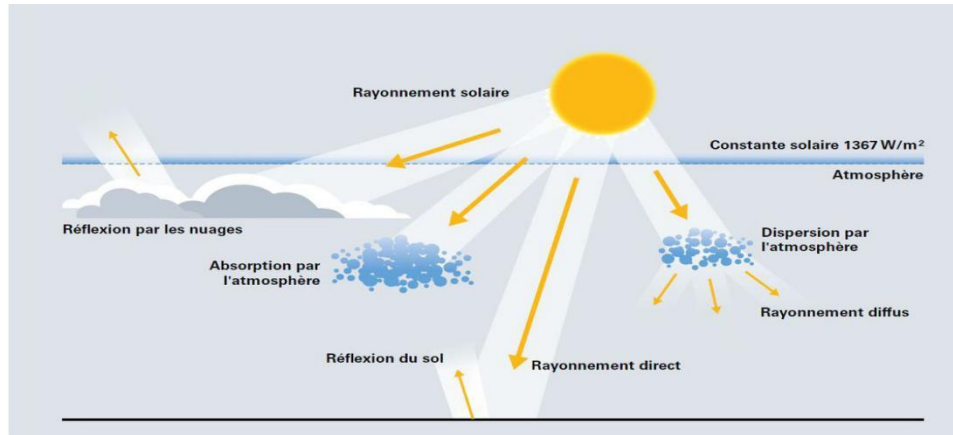


Figure (I.2): Rayonnement solaire.

I.4.1 Différents types de rayonnement

I.4.1.1 Le rayonnement direct

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [8].

I.4.1.2 Le rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [8].

I.4.1.3 Le 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 lieu appelé Albédo [8].

I.4.1.4 Le 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 [8].

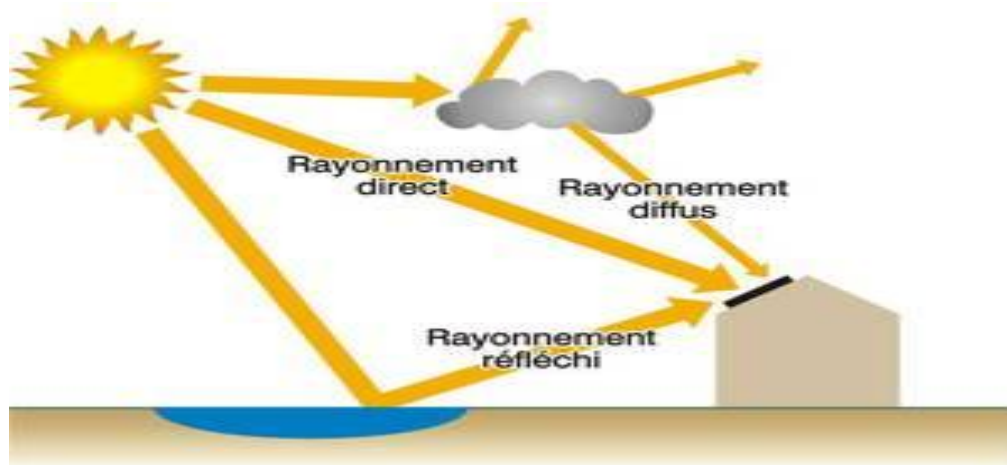


Figure (I.3): Types de rayonnements solaires reçus au sol.

I.5 Notions préliminaires sur rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). 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. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [8]

I.5.1 Spectre de rayonnement

Le soleil émet des particules, appelées photons, en très grande quantité. C'est le rayonnement solaire. Ces flux de photons qu'on appelle également radiations ou rayons voyagent dans l'espace à la vitesse de $300\,000\text{ km/s}$ (c'est la vitesse de la lumière) Etat teignent la terre à différentes longueurs d'ondes. On distingue par leurs longueurs d'ondes les différents types de rayons : c'est le spectre Solaire. Les rayons de longueur d'ondes très courtes (les rayons x, gamma,), extrêmement dangereux sont heureusement arrêtés

dès les couches supérieures de l'atmosphère. Les rayons de longueur d'onde très longue (ondes radio) sont très faibles aux surfaces de terre. Nous parvenons essentiellement : [9]

- Les Ultraviolets (UV), de 200 nm à 400 nm, invisibles, sans échauffer, provoquent des dommages sur les cellules [9%].
- La Lumière visible, de 400 à 800 nm, visibles, ils nous permettent de distinguer les formes et les couleurs [47%].
- Les Infrarouges (IR), de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent. [44%].

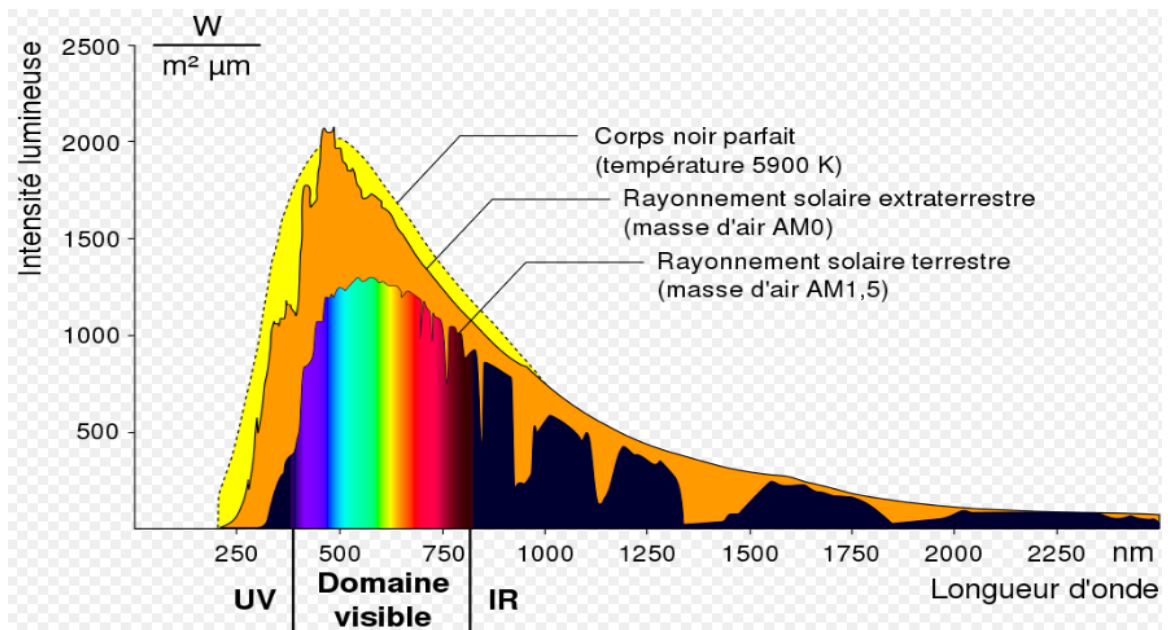


Figure (I.4): Spèctre de rayonnement solaire.

I.6 L'effet photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque » est une combinaison de deux mots : « photo » ; un mot d'origine grecque signifiant lumière et « Volta » ; le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui inventa la première batterie en 1800. L'effet photovoltaïque est un phénomène physique des matériaux semi-conducteurs exposés à la lumière du

soleil. Elle a été observée pour la première fois par le physicien français Edmond Becquerel en 1839. Il faudra cependant attendre les années 1950 pour que des chercheurs des laboratoires Bell aux États-Unis parviennent à produire la première cellule solaire, principal composant des systèmes photovoltaïques [10].

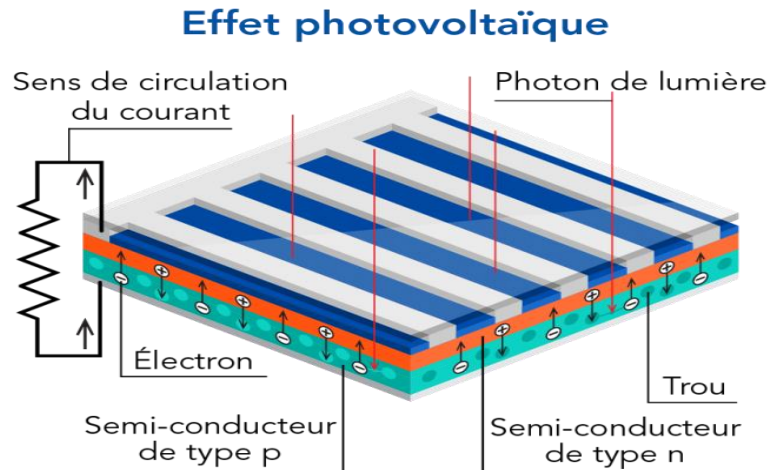


Figure (I.5): L'effet photovoltaïque.

I.7 La cellule solaire photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques, également appelées cellules solaires, sont les composants de base de la conversion photovoltaïque. C'est un dispositif semi-conducteur qui convertit une source d'énergie inépuisable, l'énergie lumineuse fournie par le soleil, en électricité. Il tire parti des propriétés des matériaux semi-conducteurs. La figure (I.6) montre une cellule photovoltaïque typique, qui montre clairement sa construction détaillée. Les cellules photovoltaïques sont constituées de deux couches de silicium, une couche dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore), formant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent de l'énergie aux atomes de la jonction PN, libérant ainsi les électrons de ces atomes et générant des électrons (charge N) et des trous (charge P). Cela crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable (varier entre 0.3 V et 0.7 V

en fonction du matériau utilisé) entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [11].

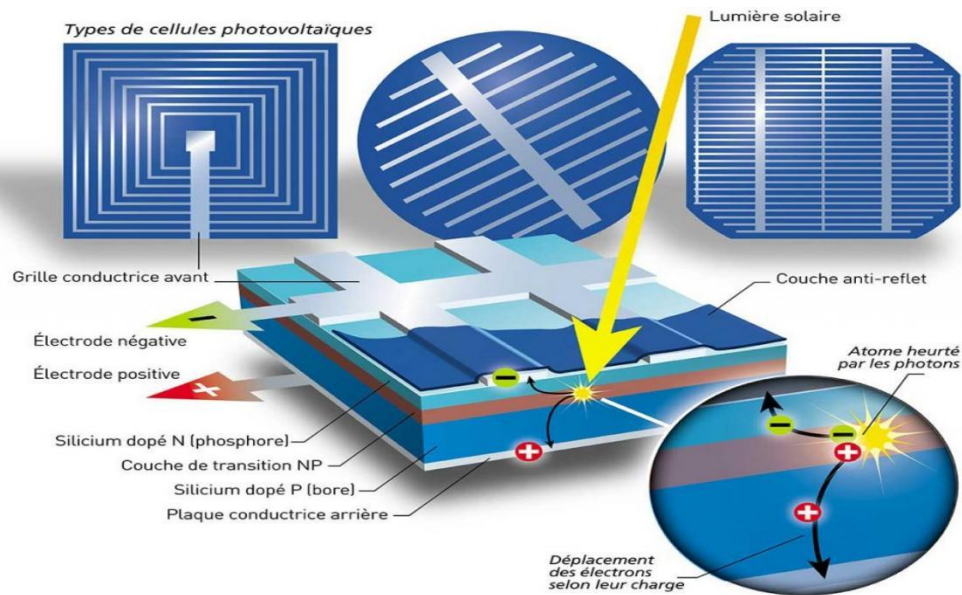


Figure (I.6): Schéma de construction d'une cellule photovoltaïque.

I.7.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Nous allons ici exposer les principes de fonctionnement principaux de cette technique. L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P.

Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Les électrons ne circulent que de la zone P à n et inversement pour les trous. Ceci est dû à utilisation de semi-conducteur. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. [12]

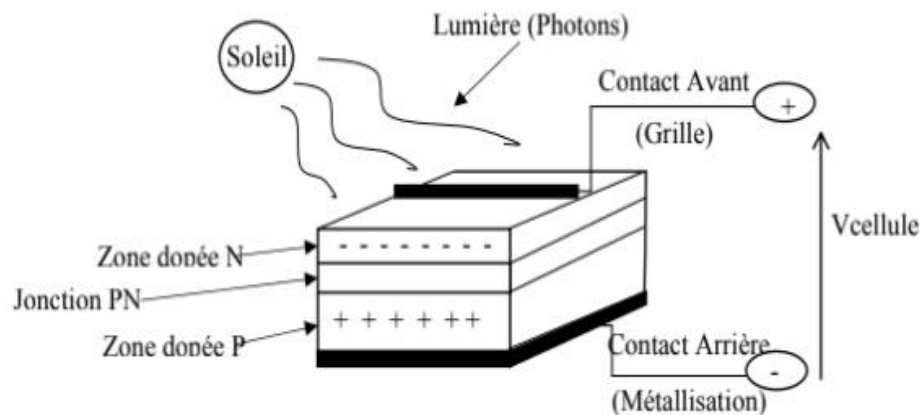


Figure (I.7): Principe de la cellule photovoltaïque.

I.7.2 Les différents types de cellules photovoltaïques

Les photopiles au silicium cristallin sont plus répandues [13]. Elles se présentent sous forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo carrées. Si l'on parle de matériaux cristallin, c'est parce que le silicium a les propriétés d'un cristal, avec un arrangement parfait des atomes.

I.7.2.1 Les cellules amorphes

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de Silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polys cristallins. On la trouve

essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Le silicium amorphe est obtenu à partir de gaz de silicium. Ce gaz est vaporisé sur un Support, en verre, en plastique souple ou en métal, grâce à un procédé de projection sous vide. Ces cellules photovoltaïques sont grises foncé. [14]

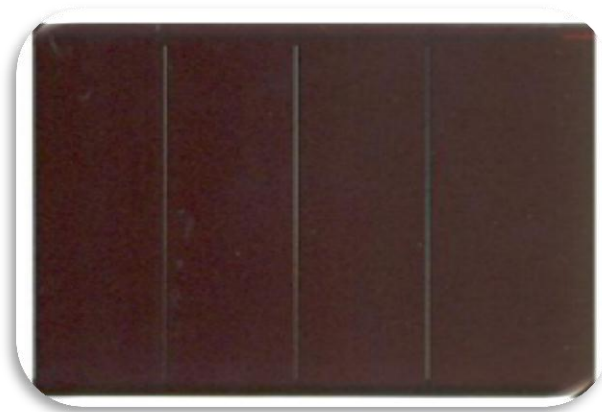


Figure (I.8): Cellule amorphe.

I.7.2.2 Les cellules monocristallines

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.

Le silicium monocristallin est le résultat du refroidissement du silicium fondu. Une fois solidifié, il se transforme en un cristal uniforme qui est découpé en tranches fines afin de former la cellule photovoltaïque. La couleur de ce matériau est **noire**, sans trace de cristaux ou autres. [14]

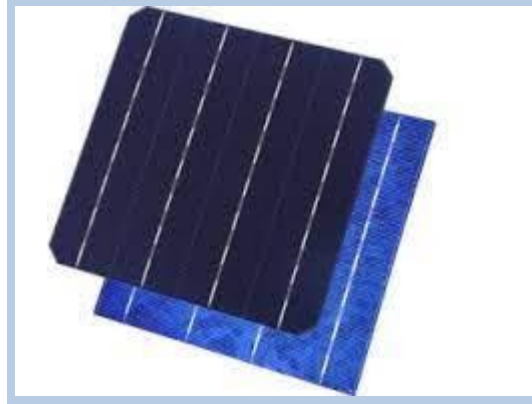


Figure (I.9): Cellule monocristalline.

I.7.2.3. Les cellules poly cristalline :

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles. Pour obtenir du silicium poly cristallin, on fait fondre le silicium dans un moule Métallique carré et allongé, appelé lingotière.

Le coloris de ce type de cellule est bleu et parsemé de motifs laissés par les cristaux. Cette particularité nous permet de reconnaître facilement cette cellule photovoltaïque.

[14]

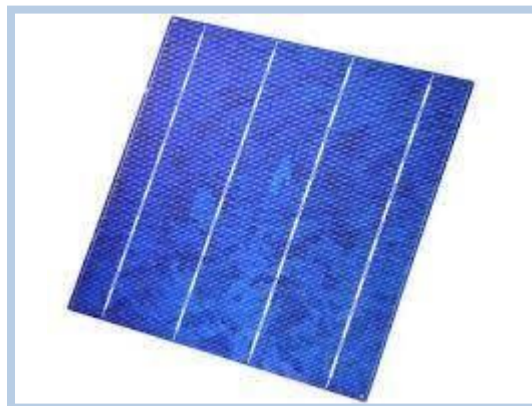


Figure (I.10): Cellule poly cristalline.

I.8 Module photovoltaïque

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

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

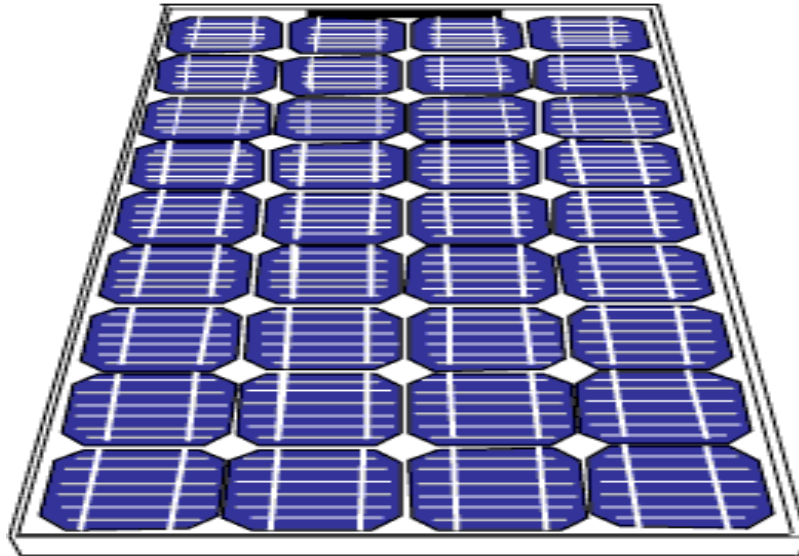


Figure (I.11): Module photovoltaïque.

I.8.1 Les Zones de fonctionnement du module solaire

Pour un éclairement donné et une température donnée, la caractéristique fondamentale d'un générateur photovoltaïque est qu'aucun courant ni tension de fonctionnement n'est appliqué, seule la courbe $I=f(V)$ est fixe. La valeur de charge aux bornes du générateur déterminera le point de fonctionnement du système PV. La figure (I.12) représente trois domaines de base [15] :

a) **la zone (1)** : Le courant reste constant quelle que soit la tension, de sorte que Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur actuel.

b) **La zone (2)** : code de fonction correspondant, zone Entre les deux premières régions, représentant la région préférée Le fonctionnement du générateur, où le point optimum (caractérisé par la puissance max) peut être déterminée.

c) **La zone (3)** : Caractérisée par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, auquel cas le générateur agit comme un générateur nerveux.

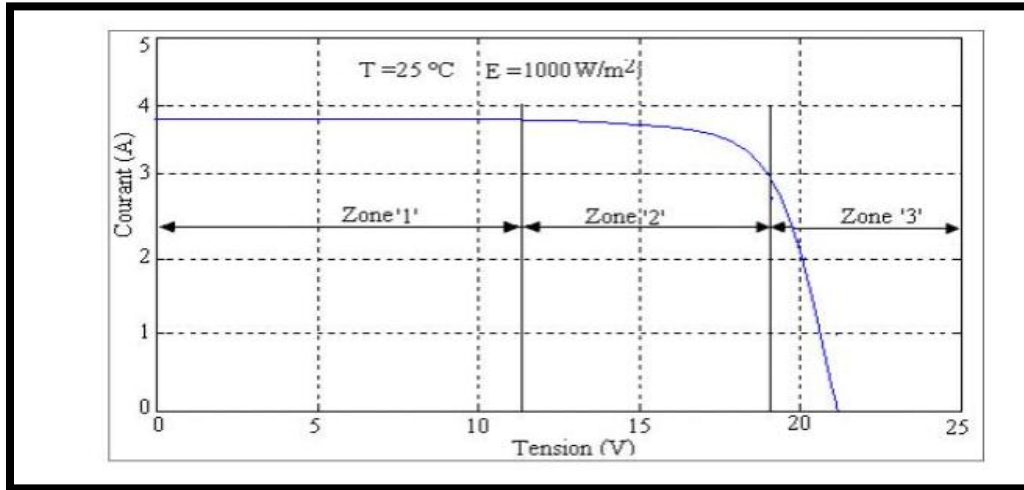


Figure (I.12): Les différentes zones de Caractéristique I(V).

I.8.2 Association De cellules ou modules photovoltaïque

Une cellule solaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0.5 et 1.5 V selon technologie [16]. Pour produire une tension utilisable, les cellules sont assemblées pour former un panneau.

I .8.2.1 Association en série

Dans l'association de plusieurs cellules identiques en série, le courant traversant chaque cellule est le même.

La tension aux bornes de cette chaîne de cellule est obtenue en additionnant les tensions aux bornes de toutes les cellules [17]. La figure (I.13) illustre la caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série :

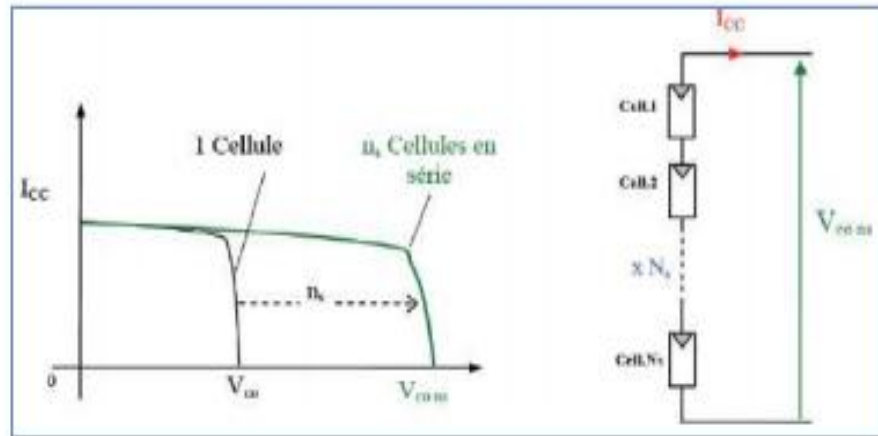


Figure (I.13): Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série.

$$V_{cc0n_s} = n_s \cdot V_{cc0} \tag{I.1}$$

$$I_{ccn_s} = I_{cc} \tag{I.2}$$

Où : nombre des cellules en série.

V : tension à vide d'une cellule.

I.8.2.2 Association en parallèle

Les cellules identiques groupées en parallèle sont soumises à un même potentiel. Le courant résultant de ce groupement est la somme des courants fournis par toutes les cellules [18]. La figure (I.14) montre la caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle :

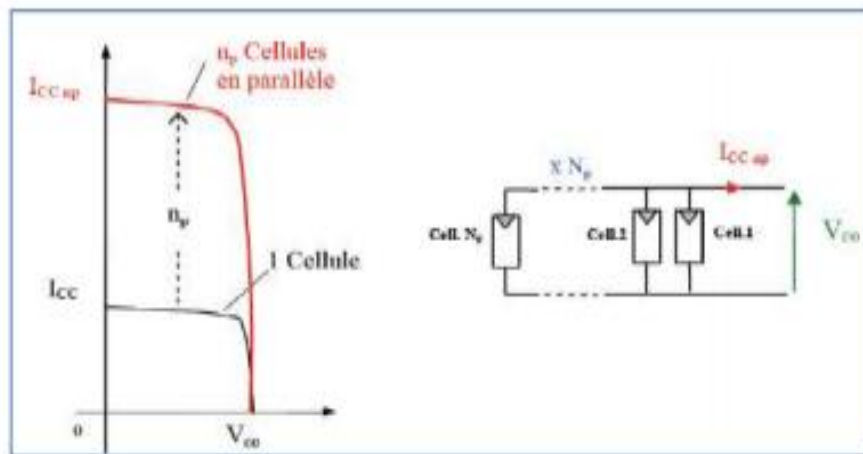


Figure (I.14): Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

I.8.2.3 Association série-parallèle

La connexion en série de plusieurs cellules forme une branche de cellules où on a une augmentation de tension pour même courant, un assemblage de plusieurs branches de cellules en parallèle forme un module où on a un accroissement du courant et une conservation de tension. Et une association de plusieurs modules dans un même plan s'appelle un panneau et le montage de plusieurs panneaux en rangées de panneaux série et parallèle forme un champ photovoltaïque ou ce que l'on appelle parfois une sous-station photovoltaïque [19].

I.9 Les principale caractéristique d'un module photovoltaïque

I.9.1 La caractéristique courant-tension I(V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire d'un nombre de cellule (N_s) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante.

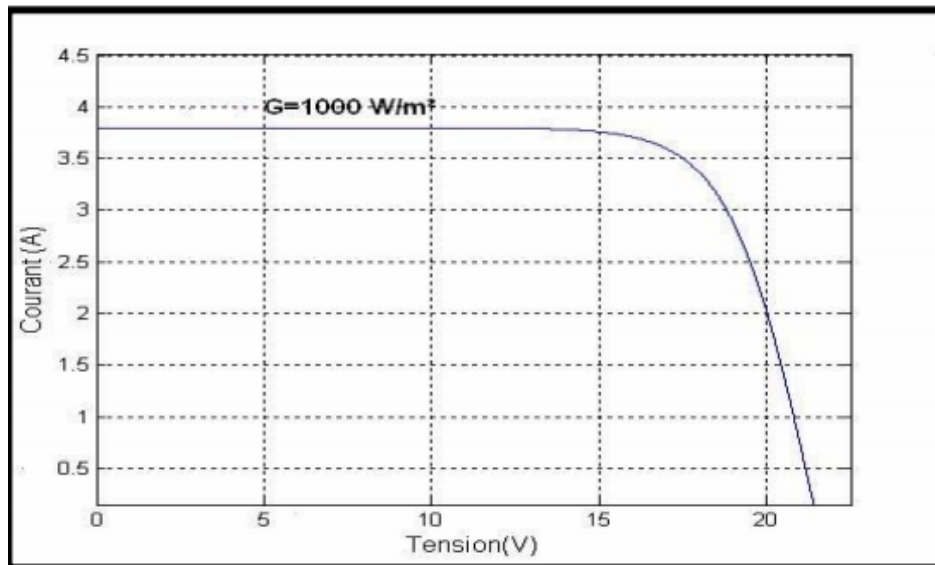


Figure (I.15): Caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque [20].

I.9.2 La caractéristique puissance-tension P(V)

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes. Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

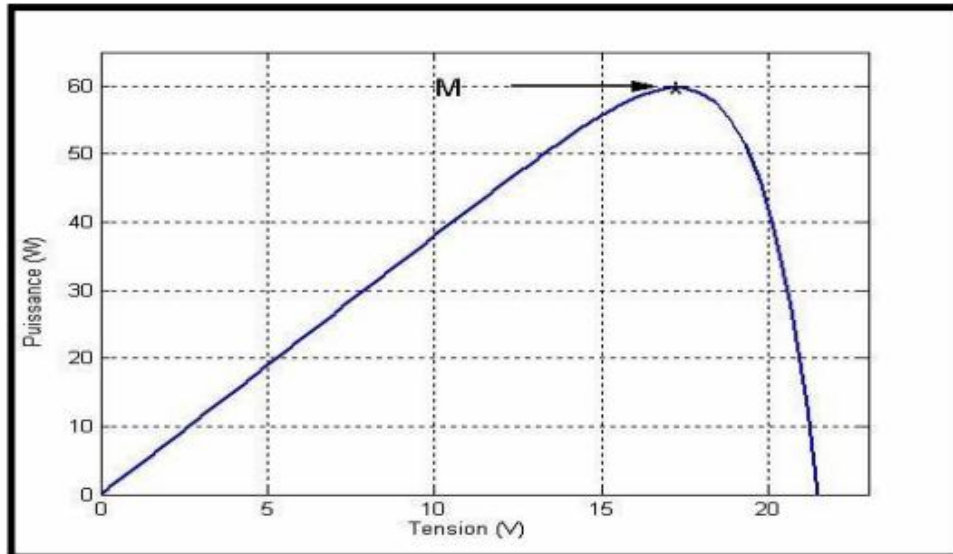


Figure (I.16): Caractéristique P(V) d'un module solaire photovoltaïque [20].

I.9.3 La puissance Crête

C'est la caractéristique la plus importante d'un module PV ou un dispositif Photovoltaïque, qui représente la puissance électrique maximale que peut fournir ce dernier. Associé à une tension maximale VMPP et à une intensité maximale IMPP, et obtenue par transposition de la caractéristique I(V) avec celle de PV.

I.10 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 [21].

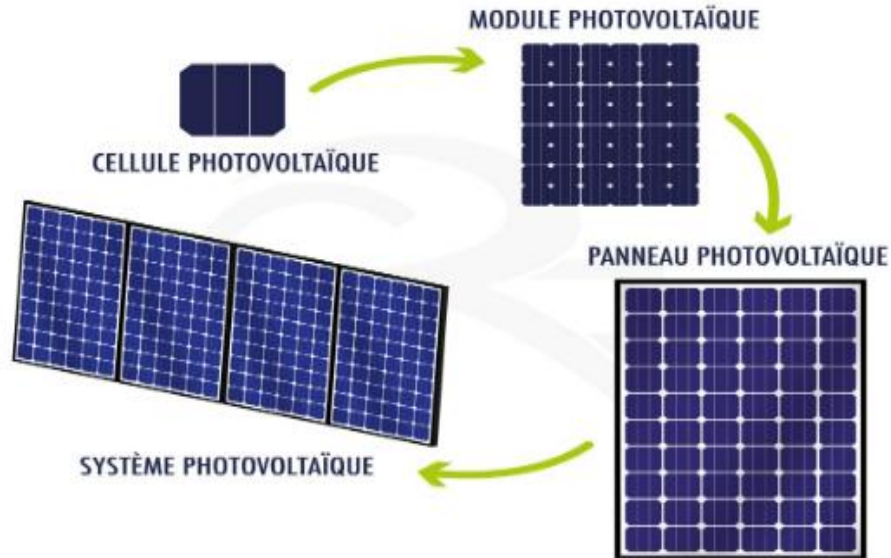


Figure (I.17): Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.

I.11 Paramètre des cellules photovoltaïques

Il existe cinq principales grandeurs caractéristiques du fonctionnement des cellules solaires :

I_{cc} : Courant de court-circuit

V_{oc} : Tension en circuit ouvert

P_{max} : Puissance maximale

FF : Facteur de forme

η : Efficacité de conversion d'énergie

I.11.1 La tension en circuit ouvert (I_{cc})

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la cellule éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [22].

$$I_{cc}(V_{co}) = I_{ph} \quad (I.3)$$

I.11.2 Le courant de court-circuit (V_{oc})

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [22]

I.11.3 Le rendement η

Le rendement η , des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente [22].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{p_{in}} = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{in}} \quad (I.4)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant-circuit et la tension à circuit ouvert [22].

I.11.4 Le facteur de forme FF

Le facteur de forme est le rapport entre la puissance optimale P_m et puissance maximale que peut avoir la cellule, il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} = \frac{I_{max}.V_{co}}{V_{co}.I_{cc}} \quad (I.5)$$

I.11.5 La puissance maximale (P_{max})

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (I.6)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_{max} qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_{max} et du courant I_{max} appelé également tension et courant maximums respectivement [23].

I.12 Le circuit équivalent et modèle mathématique

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire d'avoir une connaissance plus ou moins détaillée de la configuration physique des éléments de la cellule ainsi que des caractéristiques électriques de chaque élément. Suivant cette idée, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement fortement non linéaire provoqué par le comportement des jonctions semi-conductrices sur lesquelles repose leur réalisation. Ces modèles diffèrent par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres impliqués dans le calcul de la tension et du courant du module PV. Deux modèles de GPV seront présentés :

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

I.12.1 Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, selon la figure (I.18), un générateur de courant I_{ph} représentant un circuit équivalent idéal selon la figure suivant Un générateur de courant I_{ph} connecté en parallèle avec une diode fournissant le courant peut être utilisé pour illustrer une cellule à jonction PN connectée à une cellule solaire de charge [24].

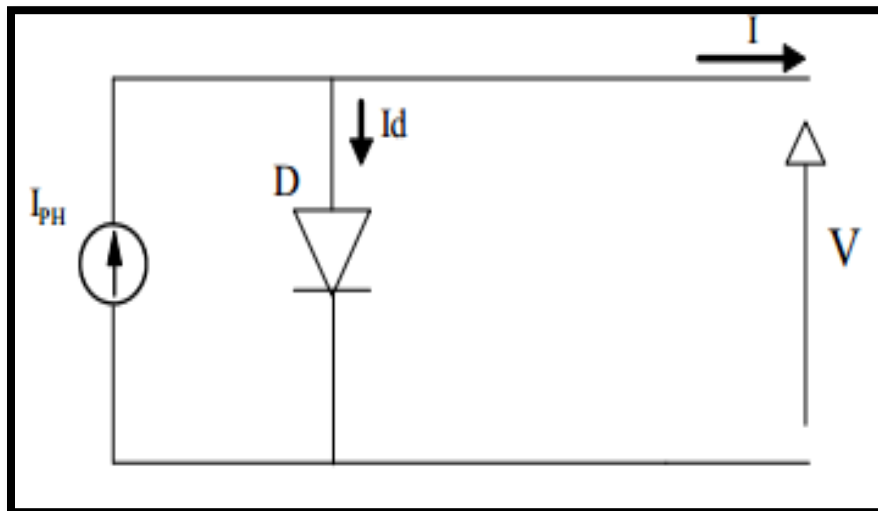


Figure (I.18): Circuit équivalent d'une cellule PV – Model idéal.

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

Avec :

I : Courant délivré par la cellule [A]

I : Courant de court-circuit [A]

I_d : courant dans la diode [A]

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

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (I.8)$$

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1 \right) \quad (I.9)$$

$$V_t = \frac{A.K.T_j}{q} \quad (I.10)$$

V_t : potentiel thermique.

K : la constante de Boltzmann est égale à $1.38e^{-38} J_K$.

A : le facteur d'idéalité de la jonction.

T_j : la température de jonction (5°C).

I_s : le Courant de saturation de la diode [A].

q : la charge de l'électron est égale à 1.6×10^{-19} .

V : tension délivré par la cellule [V].

V_d : la tension aux bornes de la diode [V].

I.12.2 Cas d'une cellule réelle

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle prend en compte l'effet de la résistance parasite causée par la fabrication, comme le montre la figure (1.19). Le schéma équivalent est constitué d'une diode (d) représentant une jonction, une source de courant (I_{ph}) caractérise la photo courant, la résistance série (R_s) représente la perte

par effet Joule et la résistance shunt (R_{sh}) caractérise le courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière, généralement bien supérieur à (R_s) [25]. Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : la photo courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_s), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_s). Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision, et ces équations peuvent décrire les caractéristiques $I(V)$ des cellules et des modules en donnant des expressions pour différents courants. [25]

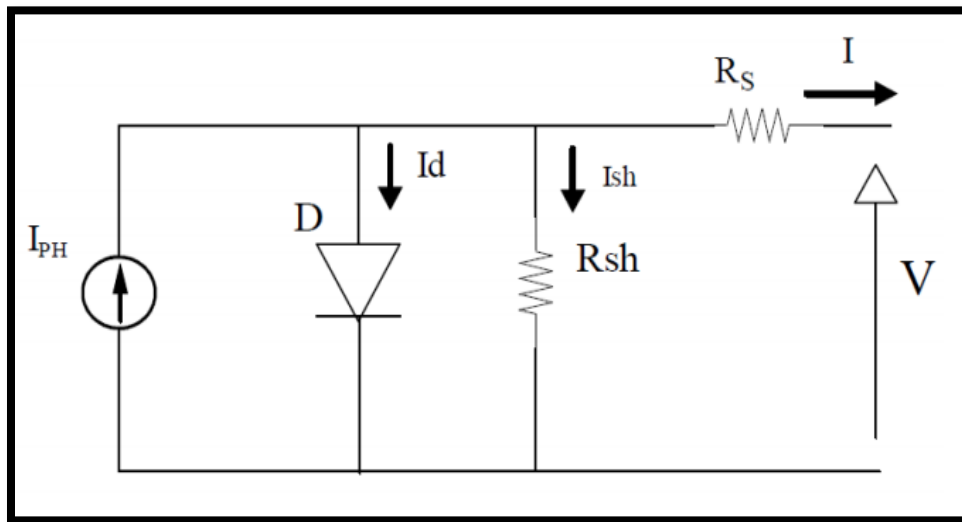


Figure (I.19): Circuit équivalent d'une cellule réelle.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.11)$$

Avec :

$$I_{sh} = \frac{v + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.12)$$

D'où l'équation du courant pour une cellule photovoltaïque est donnée par l'expression suivante :

$$I = [I_{cc} + K_i(T_{op} - T_{ref})] \frac{G}{G_0} - I_s \left(e^{\frac{vd}{vt}} - 1 \right) - \frac{v + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.13)$$

Avec :

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

$$I_{ph} = [I_{cc} + Ki(Top - Tref)] \times \frac{E}{1000} \quad (I.14)$$

I_{ph} : est en [A], calculé dans les conditions nominales (25° et 1000w/m²).

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

$Tref$: 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 :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_{sh}} \quad (I.15)$$

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 $1.38 \times 10^{-23} JK^{-1}$

q : La charge électrique $1.602 \times 10^{-19} C$

n : Le facteur d'idéalité

I.13 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

I.13.1 Influence de l'éclairement

En faisant varier l'éclairement entre 600 w/m^2 et 1200 w/m^2 par pas de 200, la caractéristique $I=f(V)$ est donnée par la figure (I.20). Veuillez noter que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. En revanche, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans le même rapport et reste quasiment constante même à faible éclairement.

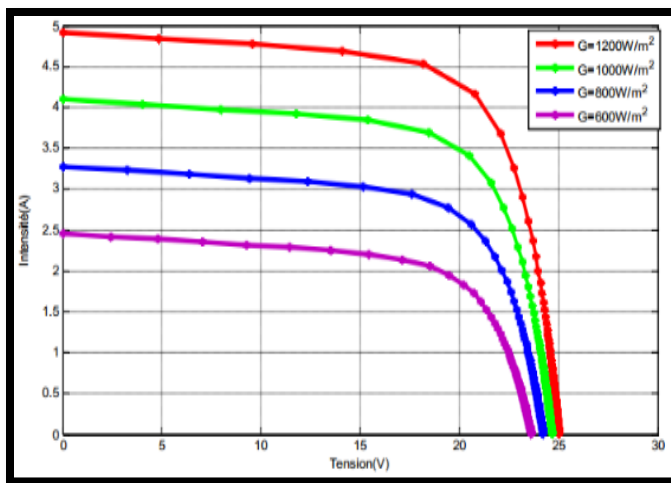


Figure (I.20): Caractéristique $I(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).

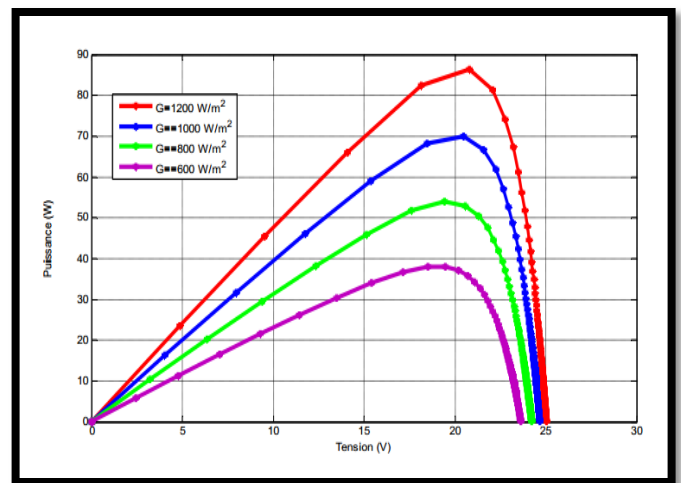


Figure (I.21): Caractéristique $P(V)$ pour différents niveaux d'éclairement ($T=25^\circ\text{C}$).

I.13.2. L'influence de la température :

En faisant varier la température de 25°C à 55°C dans les mêmes conditions d'éclairage $G=1000 \text{ W/m}^2$, la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ donnée par la figure (I.22) l'effet de la température sur la valeur du courant de court-circuit peut être ignoré. Par contre, lorsque la température augmente, la tension à vide chute fortement, donc la puissance extractible diminue figure (I.23).

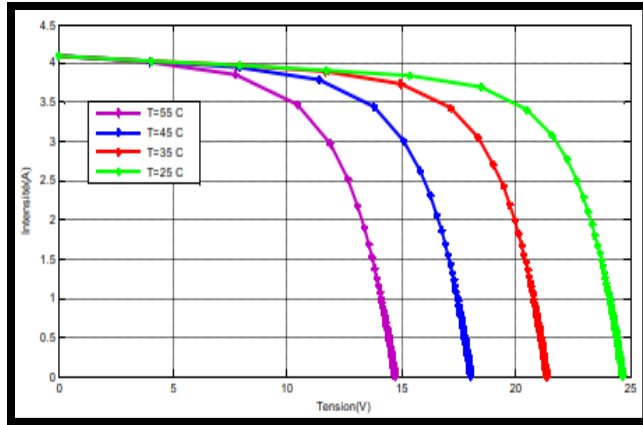


Figure (I.22): Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

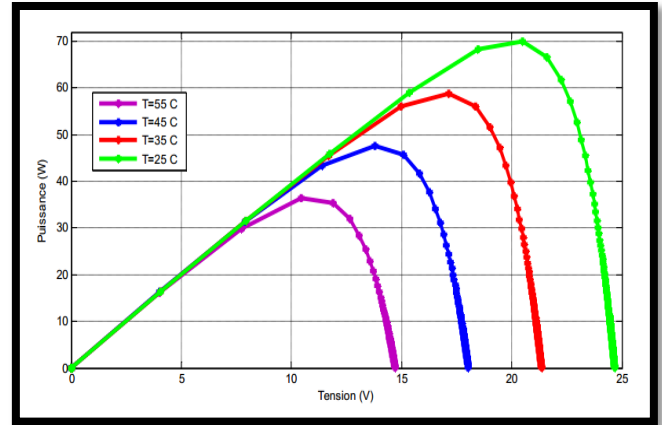


Figure (I.23): Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures ($G=1000\text{W/m}^2$).

I.13.3 L'influence de la résistance série

La figure (I.24) montre l'effet de la résistance série sur la caractéristique I(V), qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I=f(V)$ dans la région où le panneau agit comme source de tension, au point de puissance maximale à droite.

Dans la Figure (I.25), la valeur de R_s a un effet négatif sur la puissance. Lorsque la résistance série augmente, la puissance diminue. Par conséquent, la puissance maximale du générateur PV diminuera.

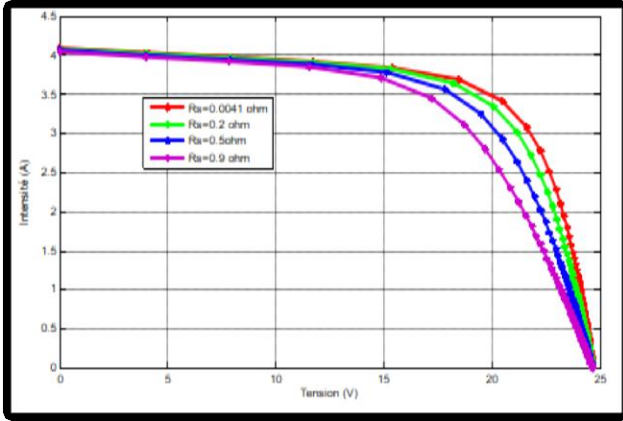
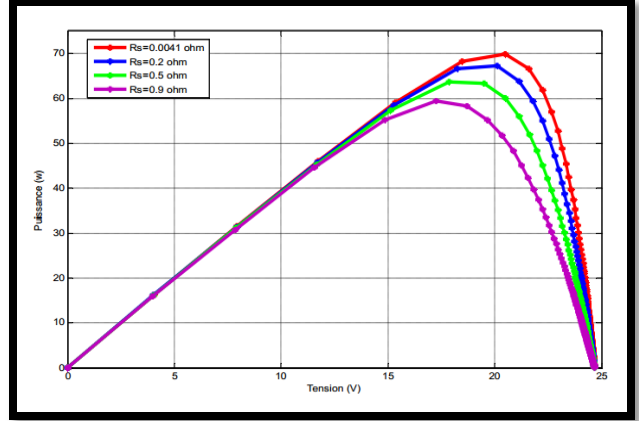


Figure (I.24): Caractéristique I(V) pour différentes valeur de résistance série (T=25°C, G=1000W/m²).



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

I.13.4 L'influence de la résistance shunt

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 les figures (I.26.27).

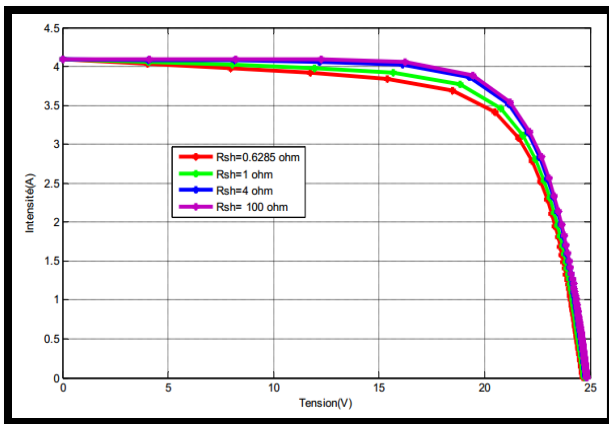


Figure (I.26): Caractéristique I(V) pour différentes valeurs de résistance shunt (T=25°C, G=1000W/m²).

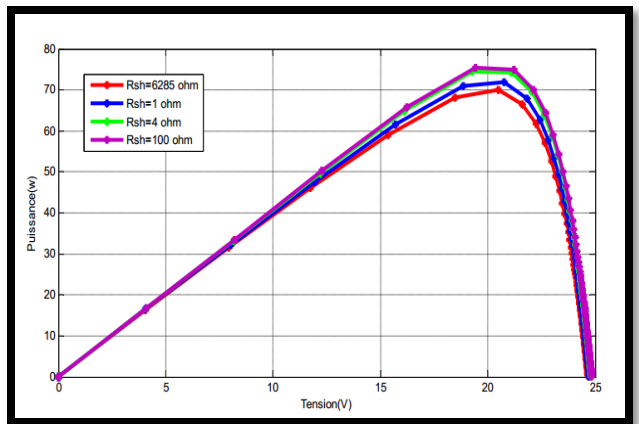


Figure (I.27): Caractéristique P(V) pour différentes valeurs de résistance shunt (T=25°C, G=1000W/m²).

I.14 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques Interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui perm et de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [25]

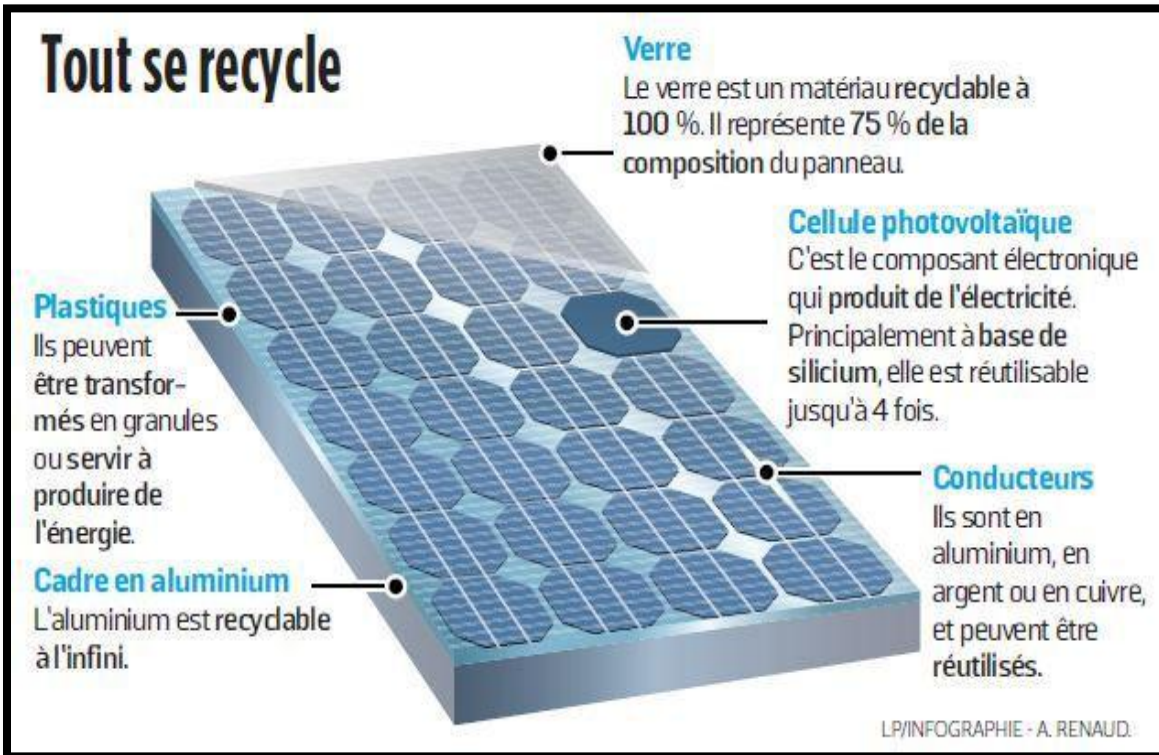


Figure (I.28): Panneaux solaire.

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui les regroupe, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [26].

I.15 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les états de l'art sur la production photovoltaïque ont été présentés. Tout d'abord nous avons discuté sur les ressources solaires et la possibilité de convertir le rayonnement solaire en électricité, grâce à l'effet photovoltaïque. Nous avons parlé aussi de l'évolution de la photopile. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque a été établi, ainsi que ses différentes technologies. Les caractéristiques de la cellule et les différents paramètres. Dans la seconde partie, nous avons présenté le module photovoltaïque, l'assemblage des cellules série et parallèle et nous avons discuté sur le modèle électrique d'un module, soit le modèle à une diode ou un modèle à deux diodes, ainsi que les différents modèles mathématiques.

Dans le chapitre suivant, nous ferons une revue approfondie de la littérature sur la dégradation et les méthodes d'identification et d'extraction des modules PV.

Chapitre II :
Paramètres des
dégradations et les
méthode
d'identification

II.1 Introduction

Aujourd'hui, on constate un manque d'information sur les différents modes de dégradation. La fréquence, le taux de conversion et la fiabilité des modules photovoltaïques. Ces dernières années, la recherche sur les modules PV s'est principalement concentrée sur la course au développement de nouvelles technologies sans retour d'expérience suffisant sur les technologies déjà utilisées.

Ce chapitre présente une revue approfondie de la littérature sur la dégradation des modules PV. Les principaux types de dégradation identifiés pour les modules PV sont présentés. Alors Les facteurs et les méthodes de détection de la dégradation des modules sont étudiés. Enfin, les modèles de dégradation proposés dans la littérature sont également répertoriés et discutés.

II.2 Dégradation d'un module photovoltaïque

La performance des modules photovoltaïques peut être dégradée suite à plusieurs facteurs à savoir ; la température, l'humidité, l'irradiation, la poussière et les chocs mécaniques. Cette dégradation se traduit par le dommage progressif des caractéristiques d'un composant ou d'un système qui peut modifier son aptitude à fonctionner dans les limites des critères d'acceptabilité et qui est engendrée par les conditions de service [27].

L'état dégradé du module photovoltaïque peut s'avérer problématique lorsque la dégradation dépasse un seuil critique. Les constructeurs des modules photovoltaïques considèrent qu'un module photovoltaïque est dégradé lorsque sa puissance atteint un niveau inférieur à 80% de sa valeur initiale [28].

II.3 Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïques

La dégradation du module photovoltaïque peut toucher ces différents composants de à savoir ; le verre, l'Éthylène Vynil Acétate (EVA) le matériau encapsulant, les interconnexions entre les cellules, le support appelé aussi backsheet qui présente un film polymère de protection généralement en Tedlar (c'est le nom commercial du PVF

(polyvinyl fluoride)) comme illustré sur la (Figure II.1). Ont noté également les colles qui assurent l'adhérence entre ces différents composants du module.

Les principaux modes de dégradations des modules photovoltaïques sont : la corrosion, la délamination, la décoloration, les fissures et bris de verre, les points chauds (hot spots) et le PID (Potentiel Induced Dégradation).

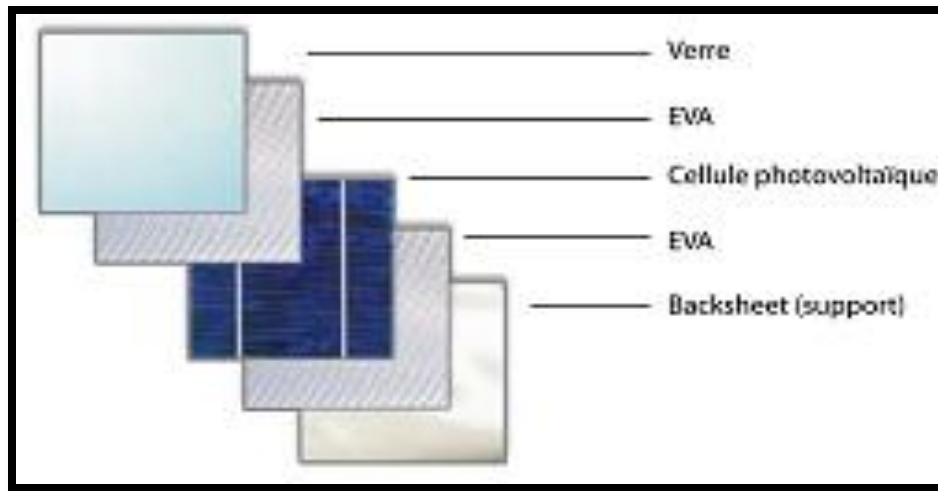


Figure (II.1): Les différents composants du module photovoltaïque soumis à la dégradation [29]

II.3.1 La corrosion

La corrosion est un des modes de dégradation des modules photovoltaïques, il attaque les connexions métalliques des cellules du module photovoltaïque provoquant une augmentation des courants de fuite et ainsi une perte de performance. Ce mode de dégradation dégrade aussi l'adhérence entre les cellules et le cadre métallique, un exemple de la corrosion au niveau de la bordure et de la boîte de jonction est noté sur la figure (II.2). La cause principale de la corrosion est l'humidité, elle pénètre dans le module photovoltaïque à travers les bords stratifiés [29]. La rétention de l'humidité dans l'enveloppe du module augmente la conductivité électrique du matériau et plus particulièrement dans les zones géographiques chaudes et humides. En raison de la vitesse de diffusion relativement élevée de l'eau dans l'Éthylène- acétate de vinyle (EVA) utilisé dans l'encapsulation de la plupart des modules PV, l'infiltration de l'humidité dans

le module reste importante au cours de sa durée de vie même si le module est constitué d'une structure en double verre.

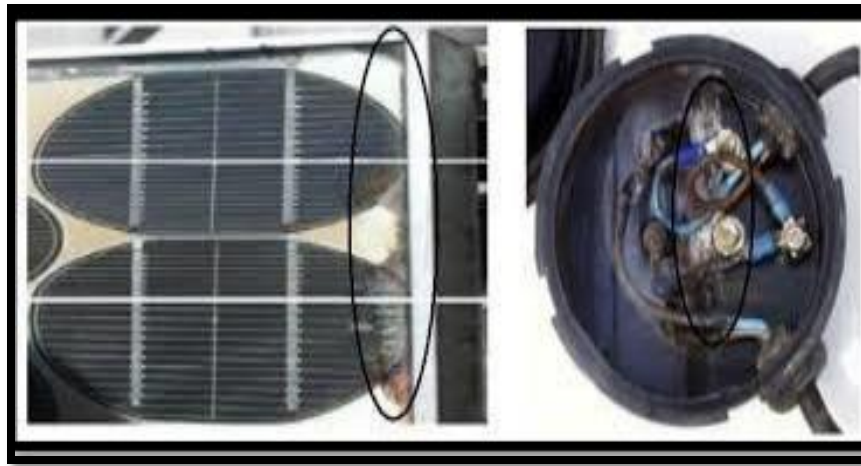


Figure (II.2): La dégradation du module PV par la corrosion [29]

II.3.2 La délamination

Un autre mode de dégradation des modules photovoltaïques est la délamination, c'est un problème majeur, il traduit la perte d'adhérence entre le polymère encapsulant et les cellules ou entre les cellules et le verre avant. Un exemple est illustré sur la figure (II.3). Ce mode de dégradation est plus fréquent dans les climats chauds et humides, il favorise une pénétration de l'humidité dans le module et provoque, par la suite, différentes réactions chimiques à l'intérieur du module induisant des dégradations telles que la corrosion des métaux de la structure du module le plus souvent. De même, il favorise l'augmentation de la réflexion lumineuse dans le module photovoltaïque. La déamination est plus sévère lorsqu'elle se produit sur les bords du module parce que, en plus de la dégradation de la puissance, elle provoque des risques électriques pour le module et l'installation toute entière.

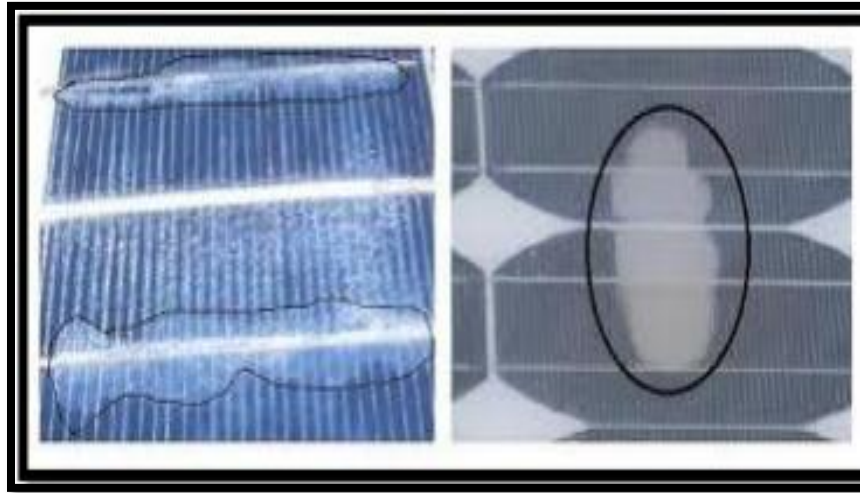


Figure (II.3): Dégradation du module photovoltaïque par délamination [29]

II.3.3 La décoloration

La décoloration du module photovoltaïque se traduit par un changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation qui est généralement en Ethylène Vinyl Acetate (EVA) ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant. Elle provoque une modification de la transmittance de l'encapsulant des cellules et par conséquent la puissance générée par le module est diminuée. Oreski et Wallner avancent que les causes principales de la décoloration de l'EVA sont les rayons ultraviolets combinés à l'eau sous des températures d'exposition supérieures à 50°C et provoquant ainsi un changement de la structure chimique du polymère. La décoloration peut apparaître dans des zones différentes et non adjacentes d'un même module. Ceci peut être dû d'une part, à des polymères encapsulant d'origine ou de caractéristiques différentes et d'autre part à l'EVA qui n'est pas déployée dans les mêmes zones du module de la même manière Kojima et Yanagisawa se sont intéressés au jaunissement de l'EVA utilisé comme encapsulant dans les modules photovoltaïques. Pour cela, ils ont soumis des modules PV à un ensoleillement solaire artificiel. Ils se sont uniquement intéressés à la contribution des rayons ultraviolets (longueurs d'onde comprises entre 280 nm et 380 nm). Lorsqu'un ensoleillement de 4000 W.m⁻² est appliqué, une décoloration des cellules apparaît avec une augmentation de la photosensibilité au bout de 400 heures

et une augmentation de la transmissivité (facteur de transmission) entre 280 et 380 nm. Ainsi, il apparaît un faible jaunissement au niveau de l'encapsulant EVA qui engendre une perte de puissance du module photovoltaïque. Pour un ensoleillement de 1000 W.m^{-2} , aucun changement n'est apparu dans la gamme de longueur d'onde 280 nm à 380 nm au bout de 500 heures Wohlgenuth a effectué des essais aux UV sur des modules PV en silicium cristallin à une température de 60°C , il a trouvé que la décoloration de l'encapsulant apparaît lorsque l'irradiation aux UV totale atteint 15 kWh.m^{-2} dans la gamme de longueur d'onde comprise entre 280 nm et 385 nm sans dépasser une exposition de 250 W.m^{-2} . Ces dernières années, la plupart des publications sur la dégradation des modules PV en silicium cristallin ont principalement porté sur la décoloration de l'EVA. La figure (II.4) montre des modules atteints de décoloration (jaunissement) [30].



Figure (II.4): Modules photovoltaïques avec des cellules décolorées.

Realini a réalisé une étude expérimentale basée sur le monitoring de modules photovoltaïques en silicium cristallin en fonctionnement entre 1982 et 2003. A travers cette étude, il a fait la corrélation entre les caractéristiques électriques et la décoloration de l'encapsulant des modules PV. La décoloration du module dégrade le courant de court-circuit (I_{cc}). Cette dégradation du courant de court-circuit peut varier de 6% à 8% en dessous de la valeur nominale pour une décoloration partielle de la surface du module et de 10% à 13% pour une décoloration totale du module. La puissance maximale (P_{max})

qui représente le paramètre de performance le plus important du module se retrouve également dégradée par la décoloration de l'encapsulant du module photovoltaïque [30].

II .3.4 Les fissures et bris de verre

Les bris de verre et fissures constituent un facteur important de dégradation des modules PV. Ils surviennent dans la plupart des cas lors des opérations d'installation, de maintenance et surtout de transport des modules sur les sites d'installation. Le module présentant des fissures ou des cassures peut toutefois continuer à produire de l'énergie. La figure (II.5) montre un module photovoltaïque en silicium polycristallin fissuré lors de sa première mise en service et qui a fonctionné pendant cinq ans en association avec d'autres modules. Cependant, le risque de choc électrique et de pénétration de l'humidité devient plus élevé. Les casses, les bris de verre et les fissures sont généralement suivies des autres types de dégradation tels que la corrosion, la décoloration, la délamination.

Afin d'économiser le silicium et réduire les coûts de fabrication des cellules solaires, les producteurs ont fait varier l'épaisseur et la surface des cellules ces dernières années. L'épaisseur des cellules PV en silicium est passée de 300 μm à moins de 200 μm et parfois à moins de 100 μm . En plus cette diminution de l'épaisseur des cellules, la surface des cellules cristallines a augmenté pour passer de 155 mm x 155 mm à 210 mm x 210 mm Ceci rend les cellules PV encore plus fragiles et plus sensibles aux cassures lors de leur manipulation (laminage et stockage). Il est généralement impossible de détecter à l'œil nu les fissures de cellules sur le module déjà opérationnel. La détection peut se faire à l'aide de méthodes optiques que nous présenterons dans la section [30].



Figure (II.5): Module photovoltaïque présentant des bris de verre [30].

II .3.5 Les points chauds ou Hot-spots

Lorsqu'une partie ou la totalité de la cellule solaire est ombrée, la cellule crée une résistance interne. La cellule se transforme alors en consommatrice d'électricité. Doc la cellule surchauffe et peut endommager le matériau d'encapsulation (EVA) et la feuille arrière (TPT) pouvant même provoquer un incendie d'origine électrique, c'est le phénomène du point chaud ou « hot-spot ». Un exemple est noté sur la figure (II.6).

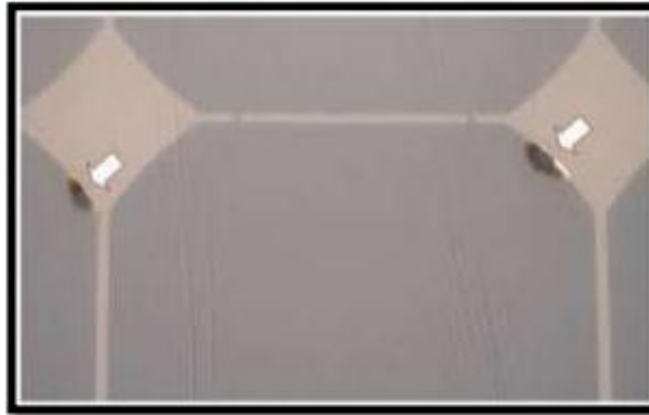


Figure (II.6): Dégradation du module photovoltaïque par des points chauds sur les bords des coins supérieurs [30].

II .3.6 Les bulles

Les bulles sont généralement dues aux réactions chimiques qui dégagent des gaz dans le module et qui se retrouvent piégés à l'intérieur de celui-ci. Ce type de dégradation est similaire à la délamination, mais dans ce cas, la perte d'adhérence de l'Éthylène Vinyl Acétate (EVA) affecte uniquement une petite surface du module et est combinée à un gonflement de la surface dont l'adhérence a été dégradée. Lorsque cela se passe sur la partie arrière du module, un encombrement apparaît sur le polymère en capsulant formant ainsi les bulles. Elles rendent plus difficile la dissipation de chaleur des cellules, augmentent leur surchauffe et accélèrent leur vieillissement. La figure (II.7) montre un module présentant un nombre important de bulles sur la face arrière. Elles apparaissent généralement au centre de la cellule et peuvent être dues à une mauvaise adhérence de la cellule provoquée par la température élevée. Il peut arriver que le détachement de la cellule du verre soit à l'origine des bulles. Les bulles situées sur la face avant du module

peuvent produire une réduction de l'éclairement arrivant sur le module. Elles provoquent la réflexion d'une partie de la lumière qui atteint le module [30].

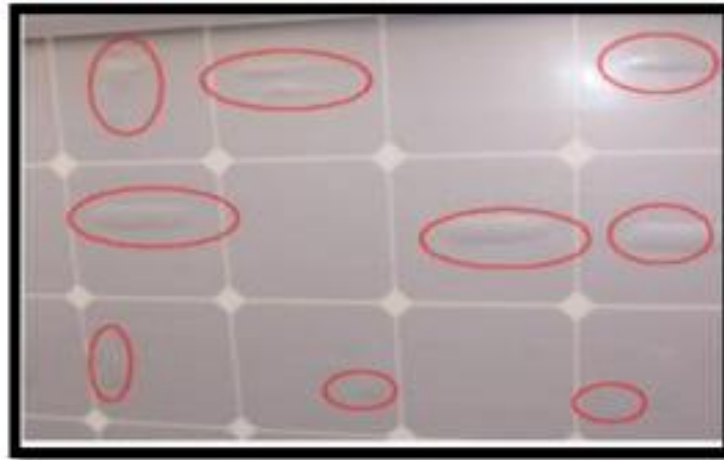


Figure (II.7): Bulles présentes sur la face arrière d'un module PV.

II.3.7 Le PID - Potentiel Induced Dégradation

Ce mode de dégradation des modules photovoltaïques connu sous le nom de Potentiel Induced Dégradation (PID) se caractérise par une dégradation progressive des performances des modules photovoltaïques (diminution du rendement des modules, pouvant atteindre plus de 20% en quelques mois) à base de silicium cristallin, due à la présence d'un courant électrique induit au cœur même du module. Ce phénomène a été plus fréquent dans les climats humides que dans les milieux chauds et secs [31].

II.4 Les moyens de détection de la dégradation du module photovoltaïque

II.4.1. Inspection visuelle

La première technique pour détecter les modes de dégradation dans les modules PV est l'inspection visuelle. Il s'agit d'observer visuellement certaines dégradations telles que la décoloration, le délaminage, les bulles, les fissures cellulaires et les points chauds. Elle doit être réalisée dans des conditions naturelles sous les yeux de la fin d'avoir une lumière forte de bonne qualité. Cette inspection doit être effectuée sous différents

angles pour identifier les zones de dégradation possible et pour éviter les erreurs dues aux images réfléchies.

II.4.2 Mesure de la puissance

La dégradation des modules photovoltaïques se caractérise par une production d'énergie réduite. Dans un système photovoltaïque composé d'un groupe de modules, cette chute de puissance ne peut pas toujours être détectée. À cette fin, un test de puissance doit être effectué individuellement sur les modules PV suspects. Afin de détecter les chutes de puissance dans les modules PV, des mesures de puissance dans des conditions de test standard (STC) sont nécessaires. Les conditions de test standard sont caractérisées par une irradiance de 1000 W/m^2 , une température de module de 25°C et une distribution spectrale de luminance de AM 1,5.

Ce test peut être effectué dans un simulateur solaire (mesure intérieure) ou sous exposition au soleil (mesure extérieure). Cependant, le contrôle précis de la température et l'uniformité de la lumière restent très difficiles à réaliser dans ce cas. Dans le cas des mesures à l'intérieur, la température et l'uniformité de la lumière sont mieux contrôlées. Néanmoins, lorsque la lumière artificielle est utilisée, il est difficile de reproduire avec précision la répartition spectrale de la lumière du soleil. Afin d'obtenir une mesure précise de l'éclairement reçu par le module sous-test, un module de référence doit être judicieusement choisi [32].

II.4.3 Imagerie infrarouge

L'imagerie infrarouge est une technique de test non destructif qui peut détecter. Les régions à haute température sont généralement le résultat de phénomènes de points chauds. Cette technique largement utilisée repose sur la propriété de tout matériau à émettre un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est liée à la température du matériau. En examinant la distribution de température des modules, des anomalies peuvent être détectées lorsqu'elles existent. Cette propriété est expliquée par la loi de Stefan-Boltzmann, qui définit l'équation de la façon dont une surface idéale ou "corps noir" émet un rayonnement. La valeur maximale du rayonnement émis dépend de la température, mais seules trois gammes de température différentes sont

considérées : 2-2,5 μm , pour des températures supérieures à 1000°C, incluant une partie du rayonnement visible et deux autres gammes ;3,5-4,2 μm et 8- 14 μm pour des températures plus basses. D'autres plages de température ne peuvent être considérées en raison de la forte absorption de l'air dans l'atmosphère.

II.4.4 Thermographie

Une autre technique similaire à la méthode infrarouge présentée précédemment c'est la technique de la thermographie. Elle est également non destructive et permet d'identifier les pertes de puissance à l'aide d'une injection de courant. Le courant n'est pas continu mais plutôt pulsé. Ainsi la température augmente chaque fois qu'un court-circuit ou circuit-ouvert est détecté [33].

La thermographie peut être effectuée à l'obscurité ou sous éclairage. Dans le cas du test à l'obscurité, les cellules sont généralement en condition de circuit ouvert (V_{co}). Grâce à cette technique, les petits défauts peuvent être détectés. Le détecteur utilisé est de type CCD (Charge Coupled Detector) comme dans la technique infrarouge. La gamme de longueurs d'onde correspondante va de 3 μm à 5 μm . La figure (II.8). Montre l'image obtenue par thermographie d'une cellule photovoltaïque au silicium.

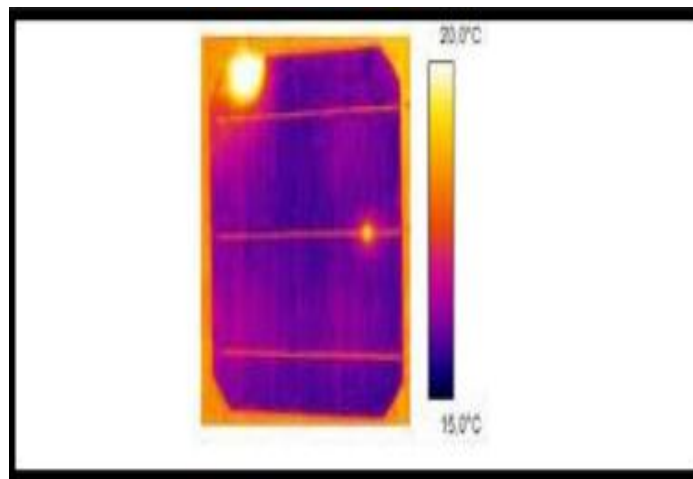


Figure (II.8): Image thermographique d'une cellule PV en silicium [33].

II.4.5 Imagerie par électroluminescence et photoluminescence

L'imagerie par électroluminescence et photoluminescence est une technique qui permet de détecter les fissures situées dans les zones de la cellule difficilement explorables par la plupart des autres techniques. Les images obtenues par cette technique présentent un aspect sombre comme indiqué sur la figure (II.9). Elle permet de détecter les premiers signes d'une dégradation future tels que les fissures partielles et les lignes ou zones sombres des cellules. Contrairement aux images obtenues par la détection du rayonnement infrarouge due à l'effet thermique, une image par électroluminescence est obtenue à partir des photons émis par la recombinaison des porteurs excités dans une cellule solaire [34].

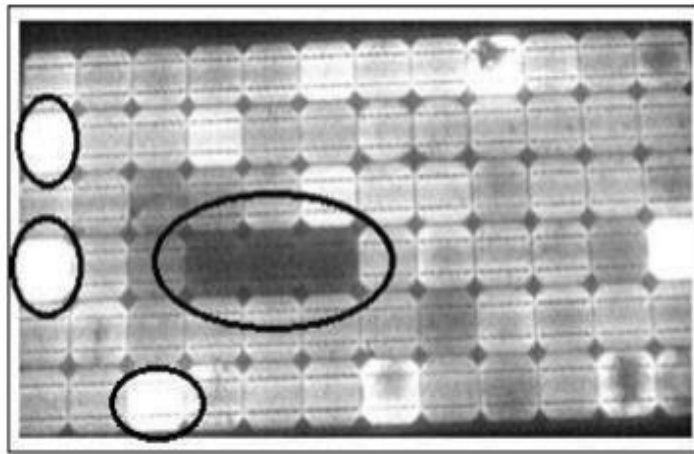


Figure (II.9): Image par électroluminescence d'un module photovoltaïque avec des cellules dégradées [34].

II.4.6 Résonance de vibrations ultrasoniques

La technologie de résonance des vibrations ultrasonores est basée sur l'analyse des vibrations ultrasonores après excitation du module. Il permet la détection de microfissures dans les cellules photovoltaïques isolées. Cette technique détecte les changements dans la fréquence caractéristique de la réponse de la batterie à l'excitation ultrasonore. Les détecteurs utilisés sont fabriqués autour de transducteurs piézoélectriques et placés en périphérie de la batterie. Il a été démontré que lorsqu'une

fissure apparaît dans une cellule, la fréquence de résonance diminue avec l'augmentation de la largeur de bande de fréquence de résonance.

II.5 Électriques Modèles d'une cellule solaire

La modélisation des cellules solaires s'impose comme une étape irréfutable, ce qui a conduit à une diversification dans les modèles électriques proposés par les chercheurs. Une cellule solaire est représentée, dans la littérature, par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique en fonction des paramètres technologiques de la cellule solaire (courant et tension). Les modèles électriques utilisés dans l'étude et la modélisation des cellules solaires sont le modèle à une diode, et le modèle à deux diodes.

II.5.1 Modèle à une diode

Ce modèle, vu sa simplification, est le plus utilisé pour l'obtention des paramètres d'une cellule solaire. Suivant le nombre de paramètres, on distingue :

II.5.1.1 Modèle d'extraction à trois paramètres (modèle idéal)

Le modèle idéal est le plus simple des modèles d'une cellule photovoltaïque, il est représenté par une source de courant, qui modélise le courant généré par les photos porteuses, en parallèle avec une diode idéale qui modélise la jonction PN.

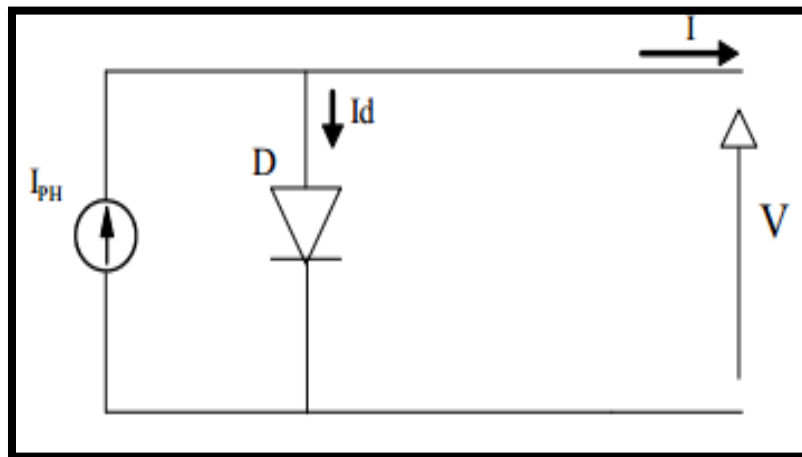


Figure (II.10): Circuit équivalent au modèle à trois paramètres.

L'omission de plusieurs paramètres nous amène à la relation décrivant ce modèle déduite de l'équation :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot v}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

II.5.1.2 Modèle d'extraction à quatre paramètres

Dans ce modèle, la valeur de la résistance parallèle est supposé infinie. Donc les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique $I(V)$ sont : I_{ph} , I_s , R_s et A .

Ce modèle est illustré sur la figure suivante :

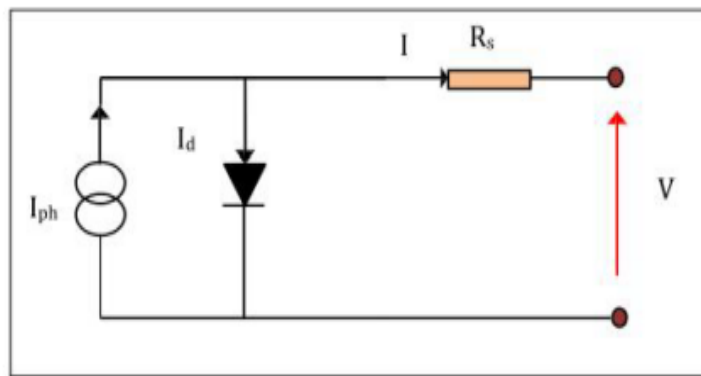


Figure (II.11): Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres.

II.5.1.3 Modèle d'extraction à cinq paramètres (simple exponentielle)

La jonction PN soumise à l'éclairement est schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode, et délivre un courant I_{ph} . La cellule solaire possède les avantages combinés d'un générateur de courant et d'un générateur de tension. Le circuit équivalent est illustré. Figure (1.19)

II.6 Méthodes d'extraction

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'extraction des paramètres de la cellule, nous avons exploités les modèles à Quatre et à Cinq paramètres, (modèle à une seule diode).

Les méthodes à Quatre paramètres :

- La Méthode explicite simplifiée.
- La Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$).

Les méthodes à Cinq paramètres :

- La méthode Newton-Raphson.
- La Nouvelle méthode analytique.

Dans ce travail on a basé sur la méthode Newton-Raphson pour résoudre des équations non linéaires et utilisée pour la convergence rapidement, sur tout utiliser l'itération commence près de la racine désirée.

II.6.1. Méthodes d'extraction à cinq paramètres

Dans ces méthodes on prend compte de la résistance parallèle. Alors l'équation caractérisant le modèle à Cinq paramètres est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_T + R_s I}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V_T + I R_s}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

Les Cinq paramètres inconnus dans ce modèle sont :

I_{ph} : le photo-courant [A]

I_s : le courant de saturation [A]

A : le facteur d'idéalité.

R_s : la résistance série [Ω]

R_{sh} : la résistance parallèle [Ω]

II.7 Modèle à deux diodes

Le modèle double-diodes apporte une meilleure précision tout en rendant la modélisation plus complexe. Les branches de chacune des diodes représentent, respectivement, le courant de diffusion dans la base et l'émetteur et le courant de génération et de recombinaisons dans la jonction. On distingue les deux modèles suivants :

II.7.1 Modèle d'extraction à sept paramètres (double exponentielle DEM)

Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule solaire sur figure (II.12) :

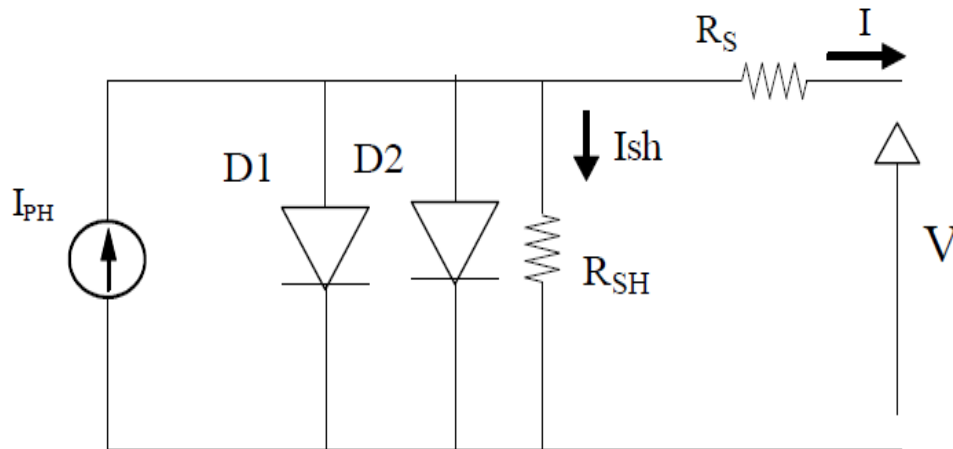


Figure (II.12): Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.

L'expression de la caractéristique courant-tension, selon T.Back, F. Hoffmeister, [35], s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V_T + R_S \cdot I)}{A_1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V_T + R_S \cdot I)}{A_2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_S \cdot I}{R_{sh}} \right) \quad (II.3)$$

Les deux termes exponentiels représentent, séparément, le courant de saturation de diffusion (\$I_{s1}\$) et de saturation de génération-recombinaison (\$I_{s2}\$). Les paramètres sont \$R_{sh}\$, \$I_{ph}\$, \$I_{s1}\$, \$I_{s2}\$, \$R_s\$, \$A_1\$ et \$A_2\$.

II.7.2 Modèle d'extraction à six paramètres

La figure ci-dessous schématise le modèle à six paramètres :

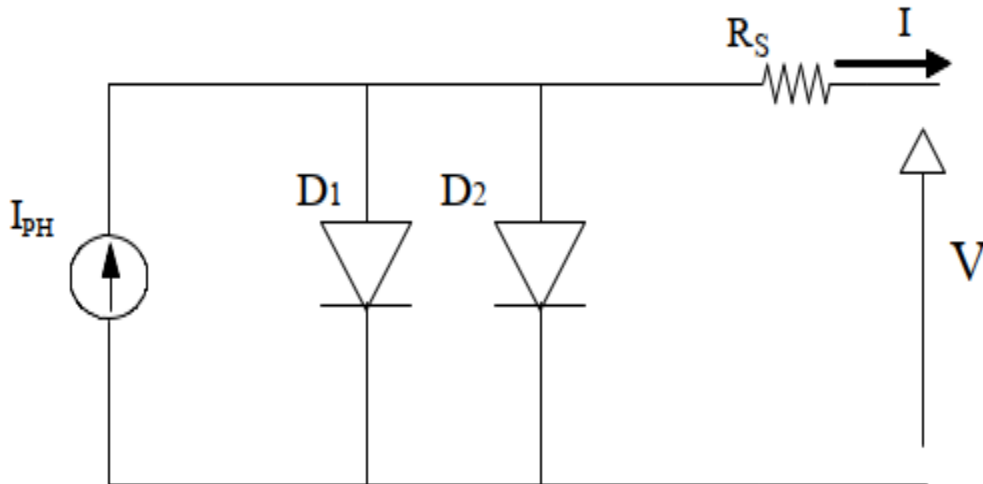


Figure (II.13): Circuit équivalent au modèle à six paramètres.

Dans ce modèle la résistance shunt a été omise à l'infinie ce qui donne un courant de fuite nul. La relation I-V de ce circuit est donnée par la formule :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V_T + R_s \cdot I)}{A_1 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V_T + R_s \cdot I)}{A_2 \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.4)$$

II.8 Conclusion

Les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque sont abordés dans ce chapitre.

Nous avons mis en évidence l'intérêt du modèle à un exponentiel pour comprendre les différents phénomènes physiques qui existent au sein de la cellule solaire.

L'extraction des différents paramètres de la cellule de manière optimale est un problème critique.

Nous avons également décrit les méthodes utilisées pour extraire les paramètres photovoltaïques des cellules solaires qui nous semblent être les plus importants et les plus utilisés.

L'objectif de ce chapitre est fourni un aperçu des méthodes employées, nous avons intéressé par la méthode Newton-Raphson qui est plus proche aux données de

constructeur est la plus précise pour la détermination des paramètres électriques d'une cellule solaire.

Pour le troisième chapitre, nous allons faire une comparaison entre les caractéristiques électriques dans le STC et les résultats obtenu par de la méthode Newton-Raphson et valider ce résultats par le logiciel Matlab.

Chapitre III :
Application des
méthodes
d'identifications,
résultats et
discussions

III.1 Introduction

La détermination des paramètres électriques d'une cellule solaire, à partir de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ décrivant son fonctionnement, joue un rôle important dans la conception et la fabrication des cellules, ainsi ceci permet d'obtenir des informations sur les mécanismes de transport électrique. Toutefois, la détermination précise de ces paramètres reste un challenge pour les chercheurs, ce qui a conduit à une diversification dans les modèles et les méthodes numériques dédiées à leurs caractéristiques.

La simulation de ce système a été faite à base du logiciel MATLAB/SIMULINK 2015Ra.

L'objectif principal de notre travail consiste à extraire les cinq paramètres électriques d'une cellule solaire avec le modèle électrique considéré qui est celui à une seule diode, à cet effet, la méthode de Newton-Raphson est appliquée.

Enfin comparant les résultats expérimentaux avec les résultats de la simulation.

III.2 Modélisation de modules panneau photovoltaïque à une seule diode et la méthode numérique

Pour calculer les paramètres inconnus d'une cellule PV, il est nécessaire de disposer d'un circuit ou d'un modèle équivalent d'une cellule PV. Il existe de nombreux modèles de cellules PV disponibles dans la littérature. Bien qu'il existe de nombreux circuits équivalents pour la cellule PV, pour rester précis et simple, nous avons choisi de travailler sur un modèle à une seule diode ayant une résistance série et parallèle. Le modèle à une seule diode avec résistance série et shunt est donné à la figure (III.1).

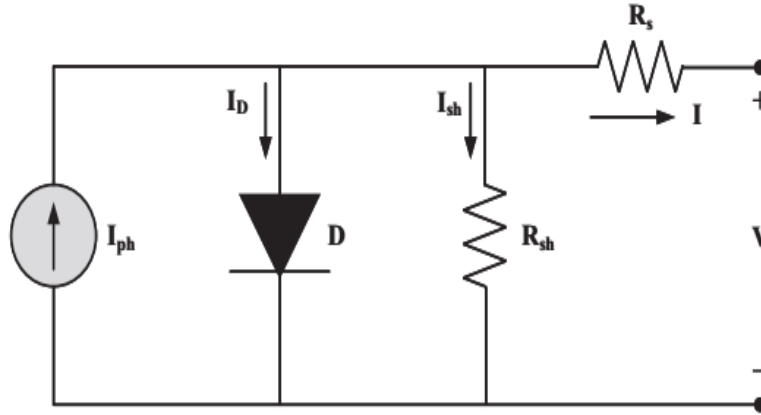


Figure (III.1): Circuit équivalent d'une cellule PV avec une diode.

Le modèle théorique choisi pour la description de la caractéristique $I(V)$ du module photovoltaïque est celui à une seule exponentielle (ou à une seule diode) déjà présenté au premier chapitre. Le courant généré par le module est donné par l'équation suivante :

$$I = -I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V_T + IR_s)}{mKT}} - 1 \right) - \frac{V_T + IR_s}{R_{sh}} \quad (III. 1)$$

Dans le cas de modules PV avec différentes cellules connectées de série, l'équation (III.1) devenez :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V_T + IR_s)}{NsmKT}} - 1 \right) - \frac{V_T + IR_s}{R_{sh}} \quad (III. 2)$$

Le modèle ci-dessus a cinq inconnues I_{ph} , I_s , V_T , R_s et R_{sh} qui doivent être estimées. Où I_{ph} est le courant photovoltaïque, circulant dans le circuit en raison de l'irradiation, par conséquent, la cellule photovoltaïque est une source de courant car elle ne dépend pas de la charge attachée à la cellule PV.

I_s est le courant de saturation, V_T est la tension thermique, R_s et R_{sh} sont respectivement la résistance série et shunt.

La méthode de Newton-Raphson est une méthode itérative qui consiste à estimer une fonction donnée $f(x)$ avec une estimation initiale. La méthode est obtenue par le développement en série de Taylor en $(x - x_0)$ donnée ci-dessous :

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2}f''(x_0)(x - x_0)^2 + \dots = 0 \quad (III. 3)$$

Supposons que l'estimation initiale soit très proche de la racine réelle de l'équation. Alors $(x - x_0)$ est assez petit et seuls les premiers termes sont importants pour estimer la valeur de la racine, étant donné x_0 . En tronquant la série au second terme on obtient la formule générale de la méthode de Newton-Raphson [36].

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \tag{III. 4}$$

Donc, étant donné x_n , le point x_{n+1} sera obtenu en coupant la tangente en $f(x)$ en x_n avec l'axe x . Vous pouvez illustrer cela mathématiquement, selon l'équation (III.4) et graphiquement, selon la figure (III.3).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \tag{III. 5}$$

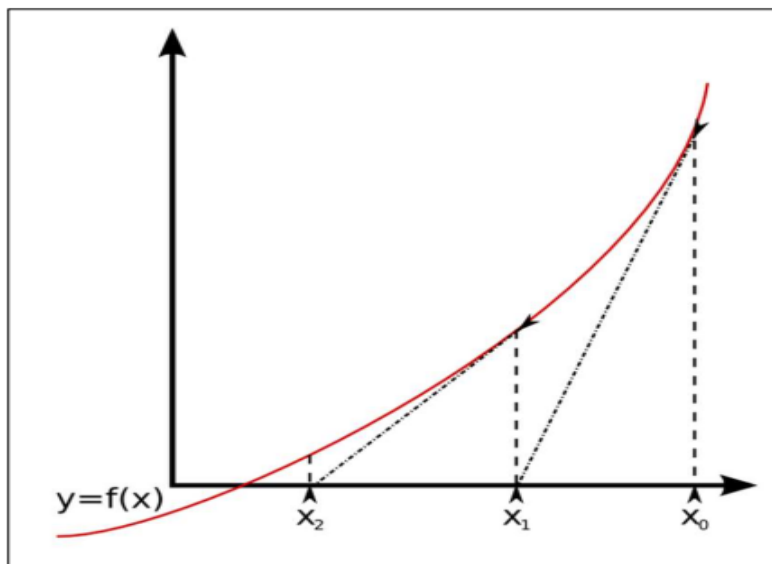


Figure (III.2): Illustration de la méthode de Newton-Raphson.

La convergence de la méthode de Newton-Raphson est garanti pour un certain intervalle $[a,b]$ contenant la racine de $f(x)$, pourvu que $f(x)$ et $f'(x)$ soient continués dans cette intervalle et que $f(\alpha) = 0$, où α est la racine de $f(x)$ [37].

Pour estimer les cinq inconnues du modèle à une seule diode, cinq équations sont dérivées du circuit de la figure (III.1). Les equations sont données ci-dessous.

$$f_1 = I_{sh} - I_{ph} + I_s \left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{V_T}} - 1 \right) + \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (III. 6)$$

$$f_2 = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (III. 7)$$

$$f_3 = I_{mp} - I_{ph} + I_s \left(e^{\frac{(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{V_T}} - 1 \right) + \frac{(V_{mp} + I_{mp}R_s)}{R_{sh}} \quad (III. 8)$$

$$f_4 = I_{mp} - (V_{mp} + I_{mp}R_s) \left(\frac{I_s}{V_T} \left(e^{\frac{(V_{mp}+I_{mp}R_s)}{V_T}} \right) + \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (III. 9)$$

$$f_5 = \frac{R_s}{R_{sh}} - \frac{I_s}{V_T} \left(e^{\frac{I_{sc}R_s}{V_T}} \right) (R_{sh} - R_s) \quad (III. 10)$$

Avec I_{sc} est le courant de court-circuit, V_{oc} est la tension en circuit ouvert, V_{MP} est la tension à la puissance maximale, I_{MP} est le courant à la puissance maximale. Ces détails sont fournis avec la cellule photovoltaïque lors de l'achat. Dans ce chapitre nous avons discutées sur la méthode de Newton-Raphson cette méthode utilisée pour faire une estimation de cinq paramètres inconnus. La méthode utilisée l'équation (III6), (III7), (III8), (III9), (III10).

III.3 Techniques d'estimation des paramètres

Cette section est divisée en trois sous-sections où chaque sous-section explique la technique existante. La première sous-section est basée sur une approche numérique tandis que les deux dernières sous-sections utilisent une approche évolutive.

III.3.1 Les caractéristiques électriques de panneau photovoltaïque

La méthode d'estimation proposée a été implémentée dans l'environnement MATLAB en utilisant une seule diode équation (III.1). Un module PV monocristallin type JW-G2000 monocristallin « annexe », avec 72 cellules connectées en série, a été choisi pour tester la méthode. Les paramètres fournis par le fabricant dans le STC (conditions de test standards) pour irradiation $1000W/m^2$ et température égale a $25C^\circ$, utilisé dans la

méthode proposée sont présentés dans le tableau (III.1) et le tableau (III.2) représente les valeurs initiales intégrées dans la méthode Newton-Raphson.

Type de cellule	Valeur
Courant de court-circuit de celle (STC) I_{SC}	5.92 A
Temperature nominal T_n (k)	298°K
La charge d'électron (C)	1.6×10^{-19}
Constant de Boltzman (J/K)	$1.38 e^{-38}$ (J/K)
Nombre des cellules séries N_s	72
Nombre des cellules shunt N_{sh}	1
Puissance nominal	200 W
Voltage maximal V_{mpp}	36.5 V
Courant maximal I_{mpp}	5.48 A
Voltage de circuit ouvert V_{CO}	44.5 V

Tableau (III.1): Paramètres de la fiche technique du JW-G2000 monocristallin dans STC.

Parameters	Valeurs initiaux
Photo- courant I_{ph}	5A
Courant de saturation I_s	1E-8A
Facteur d'idéalité V_T	1.5
Résistance série R_s	0.3 Ω
Résistance parallele R_{sh}	1000 Ω

Tableau (III.2): Les paramètres initiaux.

Afin de caractériser la cellule solaire, nous avons utilisé les modèles présentés pour fournir les valeurs de la tension (V), du courant produit (I) comme illustrer par la figure (III.3), et de la puissance générée (P) par la figure (III.4), dans les conditions de test standards pour validée notre travail à la fin.

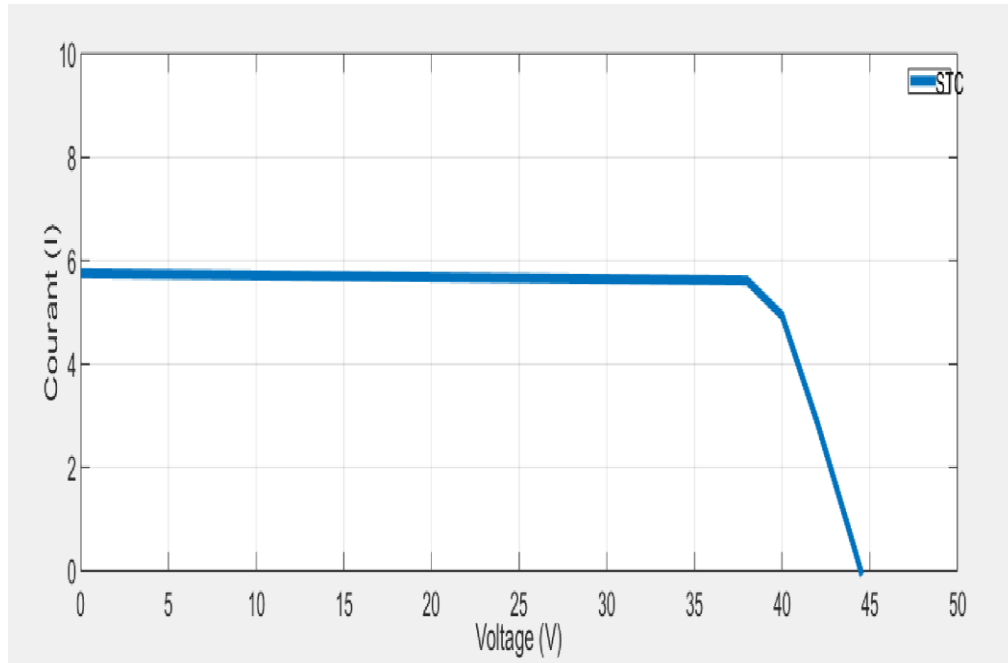


Figure (III.3): Caractéristique I(V) dans les conditions de test standards.

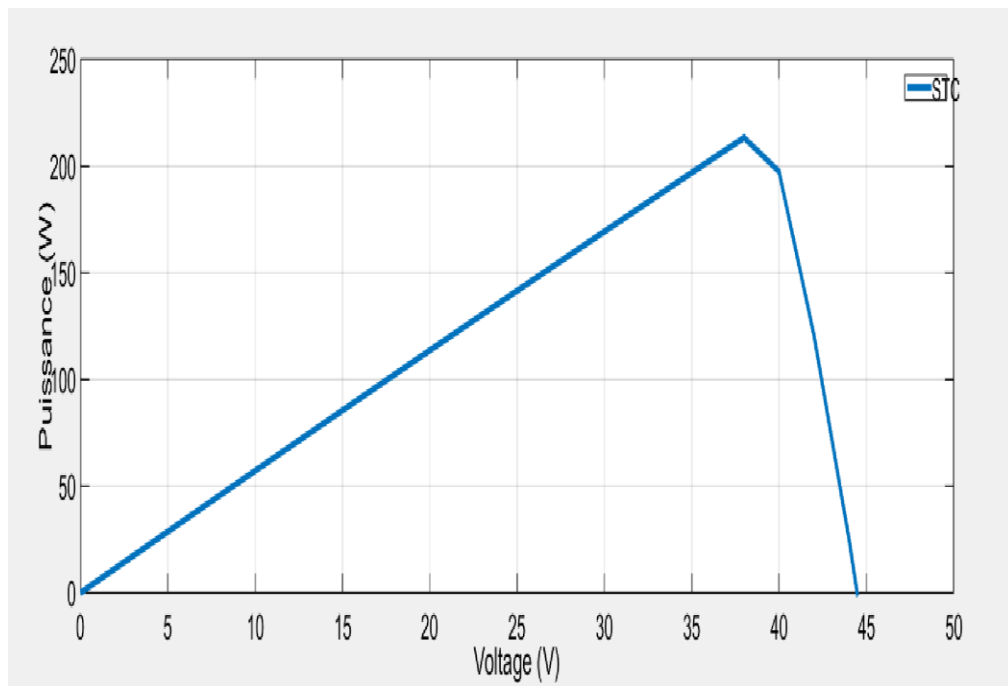


Figure (III.4): Caractéristique P(V) dans les conditions de test standards.

Après avoir obtenu dans la plaque signalétique de panneau photovoltaïque qui nous a permis d'extraire les valeurs et résultats de constructeurs, que nous avons entrés dans la simulation et nous a donné les résultats suivants, qui sont deux courbes I(V) et P(V) figure (III.3 et III.4) où l'on remarque dans le première courbe I(V), qui représente l'évolution du courant électrique I(A) en termes de tension V(V), où l'on remarque que la courbe est stable jusqu'à la valeur maximal 5.92 A et la deuxième courbe est P(V), qui représente P(W) changements en termes de V(V), où nous remarquons que la courbe augmente en valeur 210 W.

Selon la caractéristique I(V) expérimentale du module photovoltaïque, il est important de trouver la meilleure configuration de paramètre pour ajuster les résultats simulés (expression implicite) en fonction des résultats expérimentaux. Les paramètres à modifier peuvent être spécifiés en gardant à l'esprit la réduction d'erreur associée à l'optimisation. Par conséquent, nous avons fait l'expérience en utilisant le panneau photovoltaïque situé au niveau du laboratoire des énergies renouvelables du Centre Universitaire Salhi Ahmed à Naâma, ce panneau photovoltaïque est en fonctionnement depuis la date de 2018, comme les résultats ont été présentés dans la figure (III.5) et la figure (III.6).

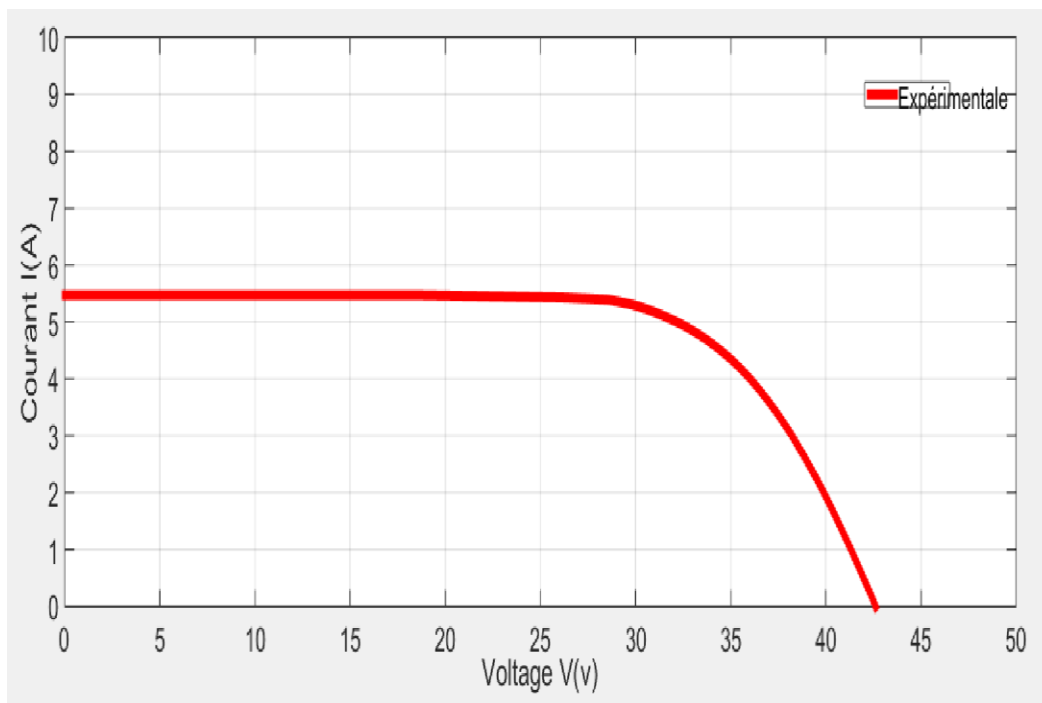


Figure (III.5): Caractéristique courant-tension I(V).

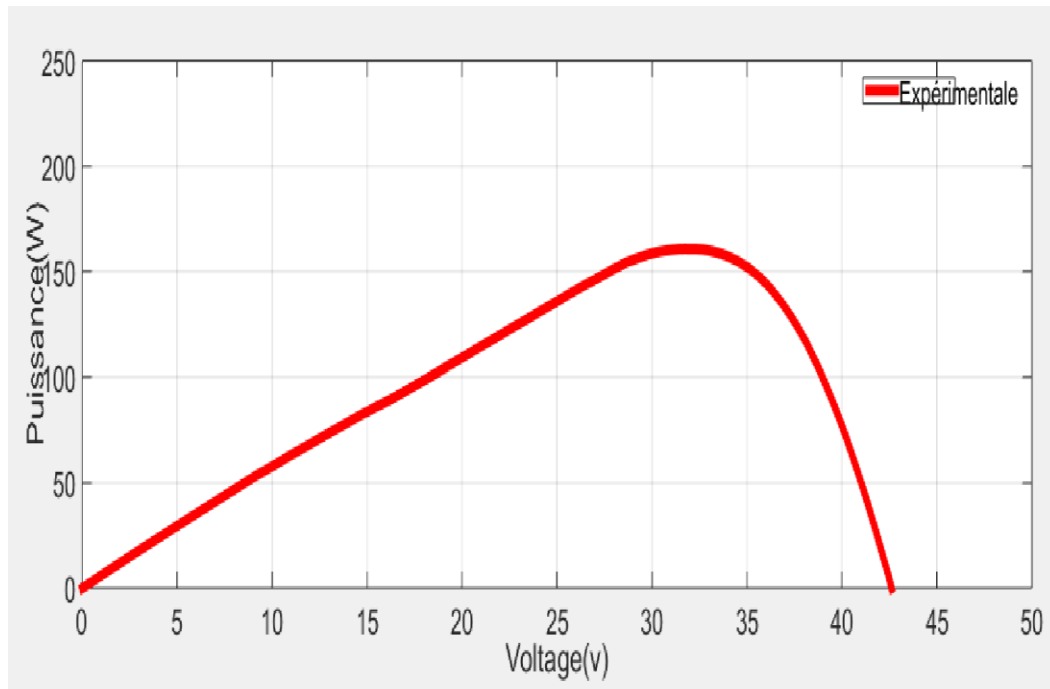


Figure (III.6): Caractéristique puissance-tension P(V).

Après environ cinq ans d'exploitation de ce panneau photovoltaïque, nous l'avons testé le (06-03-2023) en étudiant la tension et la puissance actuelles que nous avons fournies au panneau photovoltaïque (jw_G1950) dans un rayonnement de 1000 watts/m² et 25 degrés Celsius de température. Nous avons extrait quelques valeurs qui nous ont permis d'obtenir les résultats, et ce sont deux courbes I(V) et P(V) qui représentent les variations du courant I(A) et de la puissance P(W) en termes de tension, V(V) où l'on remarque dans la première courbe (III.5). La variation des valeurs du courant électrique I(A) en fonction de la tension V(V) lorsque l'on remarque la stabilité de la courbe à la valeur maximale 5,5 et la deuxième courbe change les valeurs de la puissance P(W) en fonction de la tension V(V), où l'on note que la courbe (III.6) augmente jusqu'à une valeur maximale de 165 W.

Ainsi, nous avons trouvé à travers cette étude et les deux courbes que. Le panneau photovoltaïque elle était ses valeurs ont changé en raison aux facteurs mentionnés dans, Le deuxième chapitre.

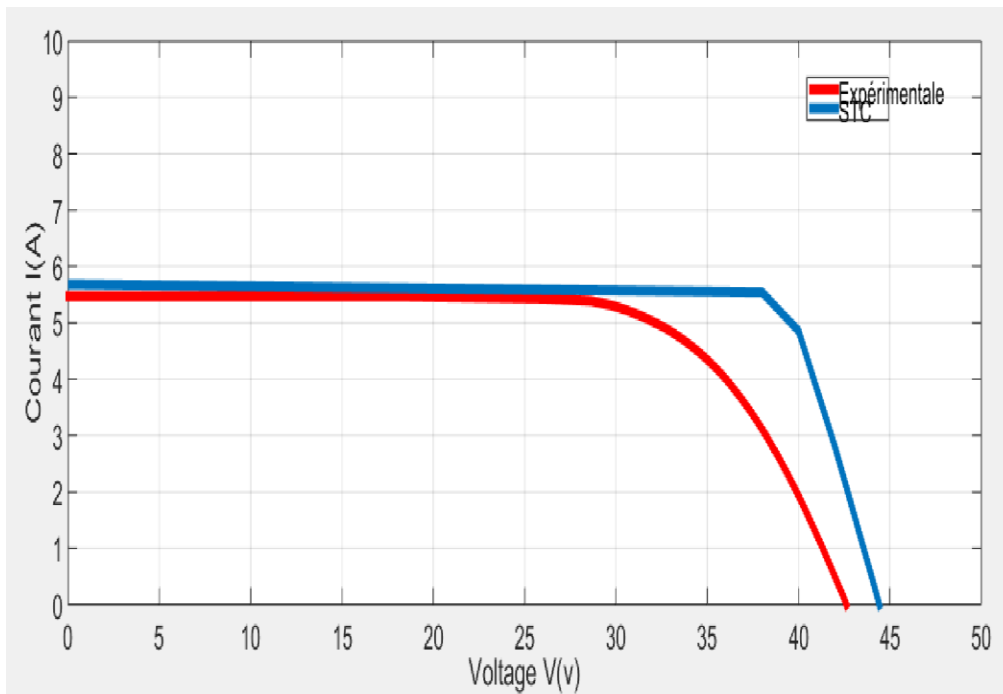


Figure (III.7): Comparaison des caractéristiques courant-tension I(V).

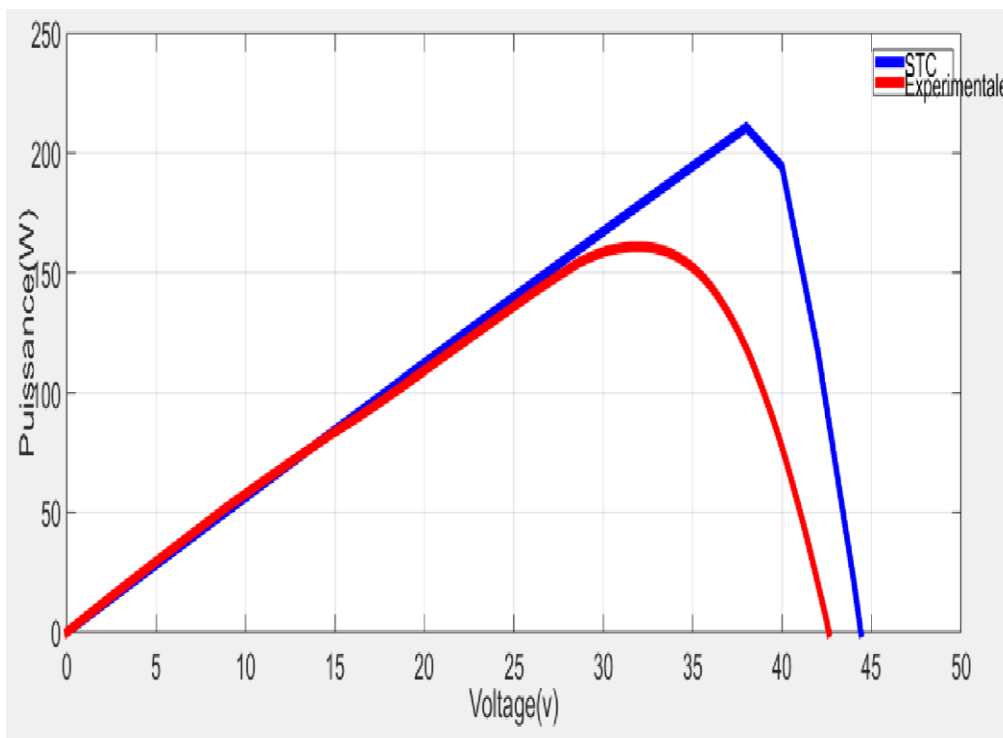


Figure (III.8): Comparaison des caractéristiques puissance-tension P(V).

Après avoir extrait ces valeurs pour le panneau photovoltaïque que nous avons trouvées dégradées avec les facteurs mentionnés dans le chapitre II puis nous avons expérimenté diagnostiqué ces panneaux par la méthode de Newton-Raphson en simulation.

Afin d'appliquer la méthode numérique de Newton-Raphson au problème proposé, il est nécessaire d'utiliser plusieurs points de la courbe échantillonnée. Dans le cas d'un modèle de diode, il faut extraire cinq paramètres (I_{ph} I_s R_s R_{sh} V_T), et il est indispensable de formuler cinq équations (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5)(equations III. 6, 7,8,9,10) , pour que la solution du problème devienne possible. Par conséquent, il est nécessaire d'extraire de la courbe réelle quatre points qui seront utilisés pour résoudre le problème. Dans ce travail, de tels points ont été utilisés: Le premier correspond au point initial de la courbe, étant le voltage maximale V_{mp} et le deuxième point le courant maximale I_{mp} , le troisième point le voltage de circuit ouvert V_{oc} et enfin le quatrième point si le courant de court-circuit I_{sc} étant donné les équations, il est possible d'assembler le système pour résoudre le problème..

III.3.2 Calculer la matrice jacobienne $[J^V]$

$$\begin{bmatrix} X_{1,k+1} \\ X_{2,k+1} \\ X_{3,k+1} \\ X_{4,k+1} \\ X_{5,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,k} \\ X_{2,k} \\ X_{3,k} \\ X_{4,k} \\ X_{5,k} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} & \frac{\partial f_3}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} & \frac{\partial f_4}{\partial x_5} \\ \frac{\partial f_5}{\partial x_1} & \frac{\partial f_5}{\partial x_2} & \frac{\partial f_5}{\partial x_3} & \frac{\partial f_5}{\partial x_4} & \frac{\partial f_5}{\partial x_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(x_k) \\ f_2(x_k) \\ f_3(x_k) \\ f_4(x_k) \\ f_5(x_k) \end{bmatrix}$$



La matrice jacobienne

La matrice Jacobienne $[J^V]$, il est écrit sous la même forme que la matrice écrite ci-dessus, et pour cela nous devons dériver chaque ligne de la matrice et la mettre à sa place.

Dans notre cas, le dérivé de chaque équation par rapport les cinq paramètres inconnus c'est pour ça la matrice jacobienne constitue cinq lignes et cinq colonne,

Lors de l'utilisation de la méthode de Newton-Raphson, il est nécessaire de connaître la valeur approximative que l'on souhaite obtenir, car l'estimation initiale doit être proche de la solution du problème, sinon la méthode n'est pas en mesure de trouver la solution. Cette connaissance est nécessaire car la matrice Jacobienne inverse $((J^V)^{-1})$ calculée à chaque itération doit être non singulière, c'est-à-dire avec un déterminant différent de zéro.

III.3.3. L'organigramme de la méthode de Newton-Raphson

L'organigramme ci-dessous résume les différentes équations utilisées pour l'extraction des paramètres de la cellule photovoltaïque est donné à la figure (III.9) :

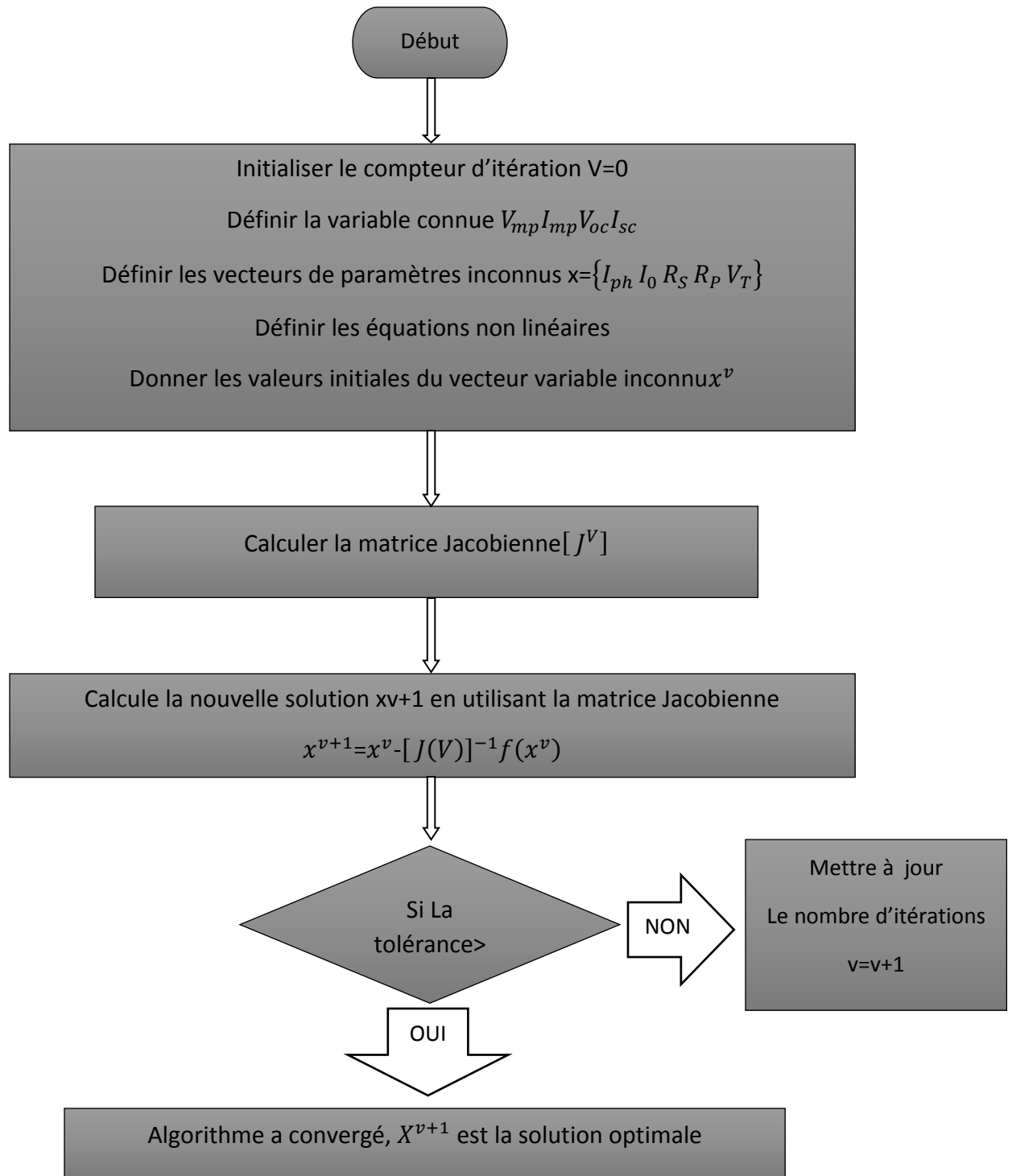


Figure (III.9): Organigramme de calcul de la méthode Newton-Raphson.

III.4. Résultats et discussions

Le tableau (III.3) représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec programme de calcule par la méthode Newton-Raphson à l'aide de logiciel MATLAB, concernant le panneau de JW-G2000 monocristallin.

$I_{ph}(A)$	$I_S(A)$	V_T	R_S	R_{sh}
5.7119	1.7017E-8	1.8606	0.2172	951.927

Tableau (III.3): Résultats des paramètres d'extractions de la méthode Newton-Raphson.

Après avoir obtenu les valeurs numériques des itérations, à l'aide du programme MATLAB, le nombre d'itérations, qui nous a donné les solutions approximatives égale à 46, ces valeurs doivent être saisies dans Simulink, afin de tracer la courbe I(V) et P(V).

III.4.1 Le schéma du bloc

La figure suivante présente le schéma interne du bloc de simulation Simulink.

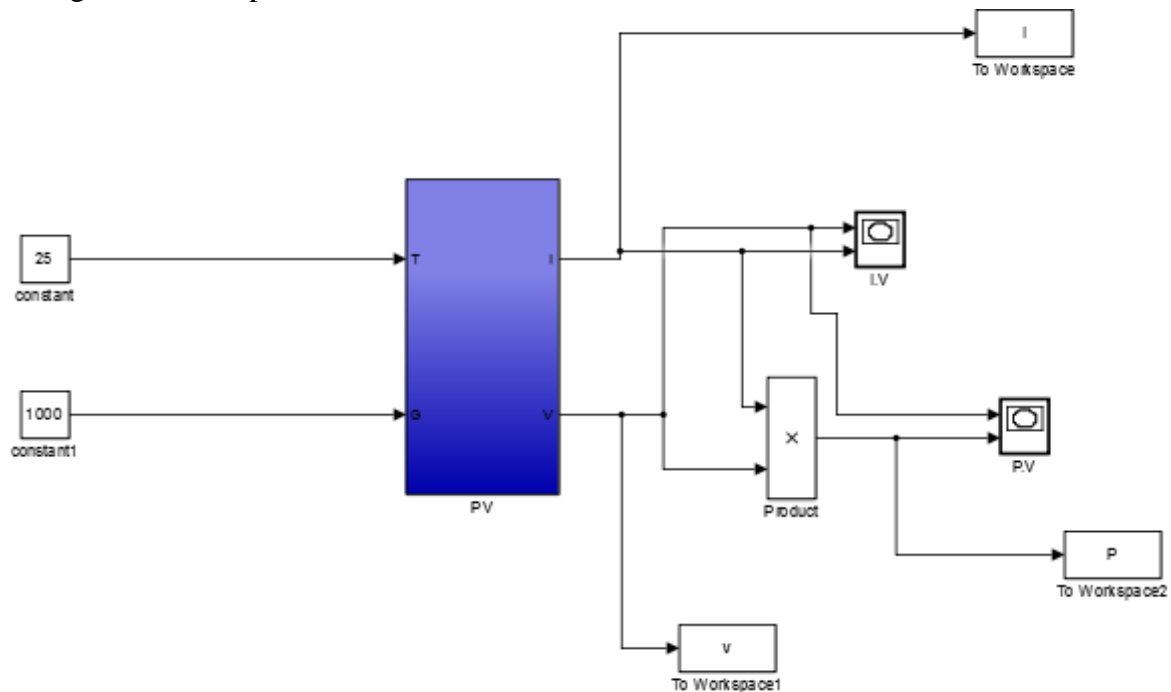


Figure (III.10): Bloc de simulation d'un générateur photovoltaïque.

III.4.2 Caractéristiques courant-tension et puissance-tension du modèle

La figure (III.11) et La figure (III.12) représente respectivement les caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ d'un panneau photovoltaïque par la méthode de Newton-Raphson qui appliquée pour résoudre le système de cinq équations non linéaires qui représentent la valeur exacte de chaque paramètre.

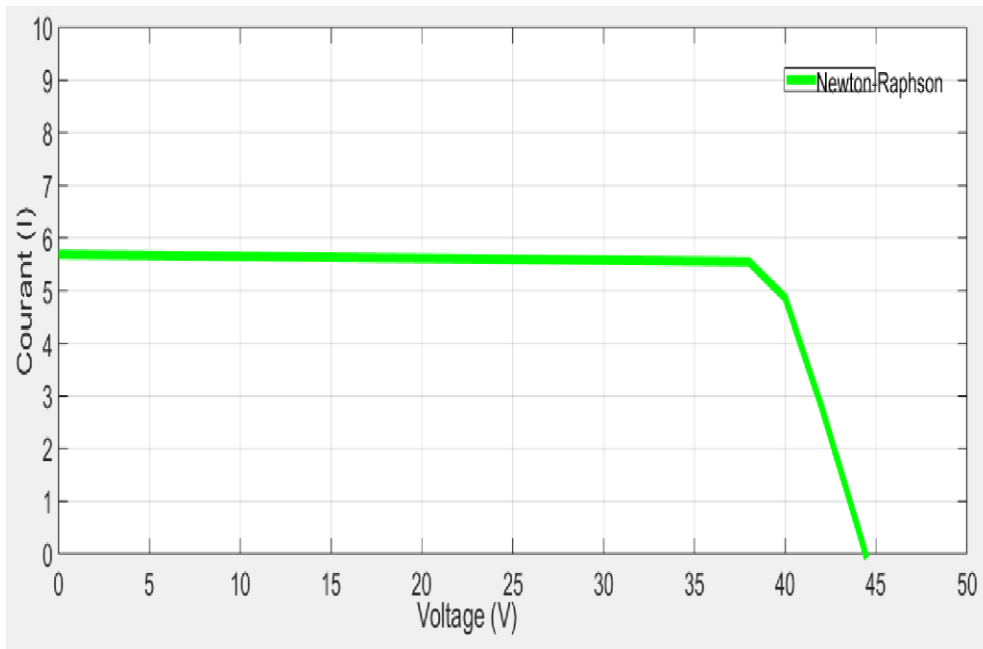


Figure (III.11): Les caractéristiques $I(V)$.

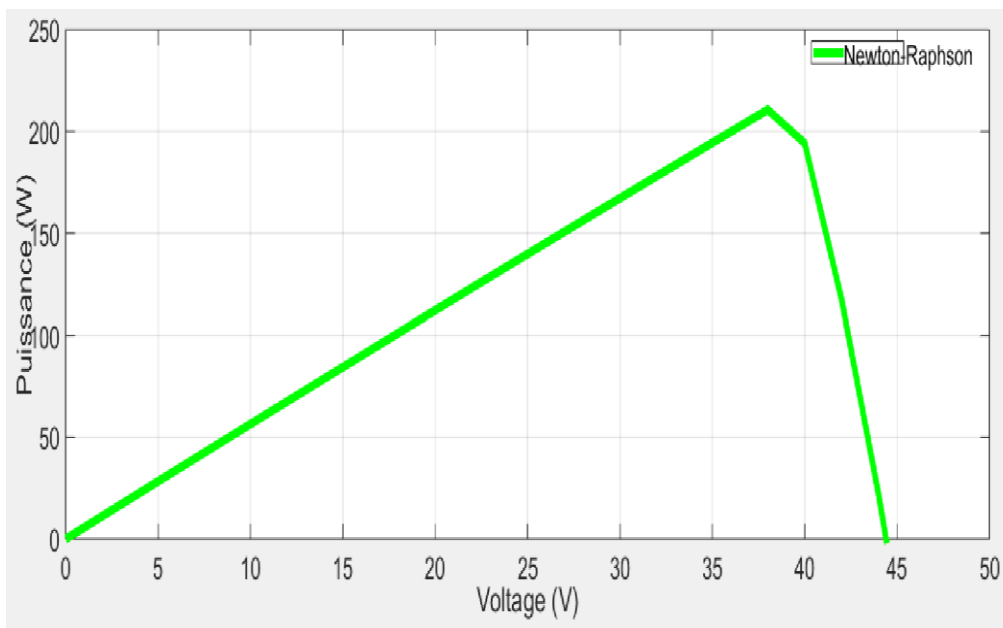


Figure (III.12): Les caractéristiques $P(V)$.

Les résultats obtenus a trévère les caractéristiques I(V) et P(V) figure (III.11) et (III.12) distingue que les valeurs de cinq paramètres \vec{I}_{ph} \vec{I}_0 \vec{R}_S \vec{R}_P \vec{V}_T trouver par l'utilisation de méthode Newton-Raphson donnée une performance équivalant que donner par le fabricant, qui montrez-nous l'efficacité de cette méthode.

La méthode proposée nous permet de réaliser plus facilement un diagnostic complet afin de connaître les raisons de la dégradation et la dure de vie de panneau solaire, et ensuite un bon rendement de panneau photovoltaïque.

Afin de vérifier la validation du notre modèle obtenu par Newton-Raphson, nous l'avons apparié avec le modèle expérimental, qui a obtenu un bon accord, ce qui nous confirme la validité de ce modèle proposé, avec en remarquons que le point de puissance maximale calculé par la méthode de Newton-Raphson un peu égale que mesuré par les conditions standards et très grande que l'expérimentale comme le montrent par la figure (III.13) et la figure (III.14) ci-dessous :

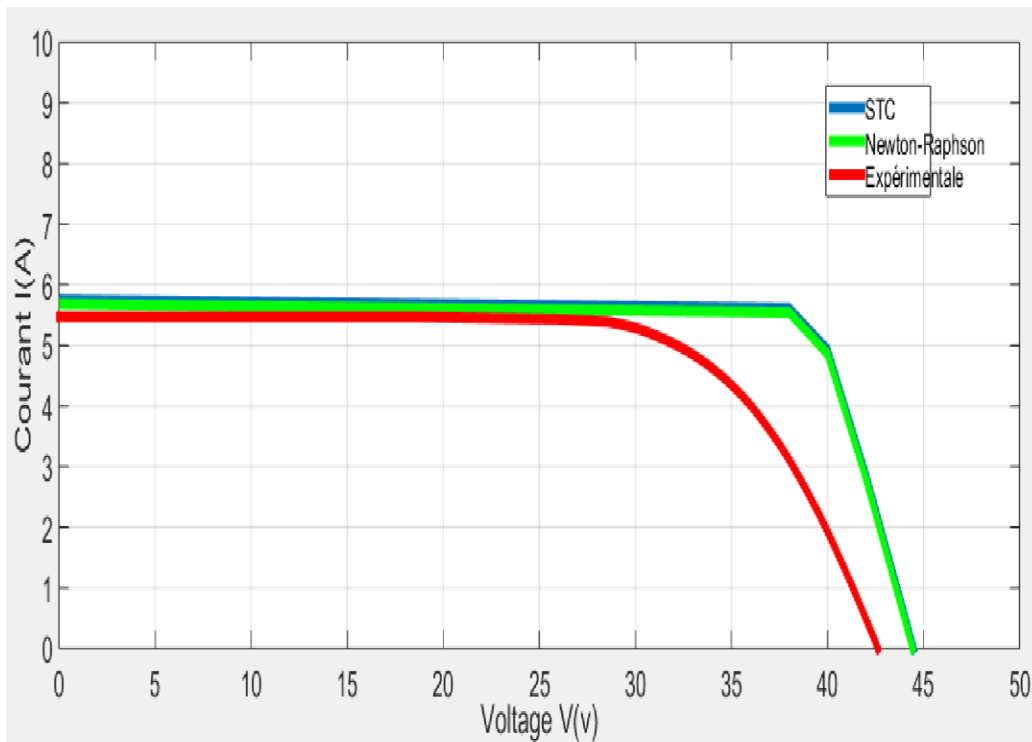


Figure (III.13): La Validation de la méthode NR graphique, caractéristique I(V).

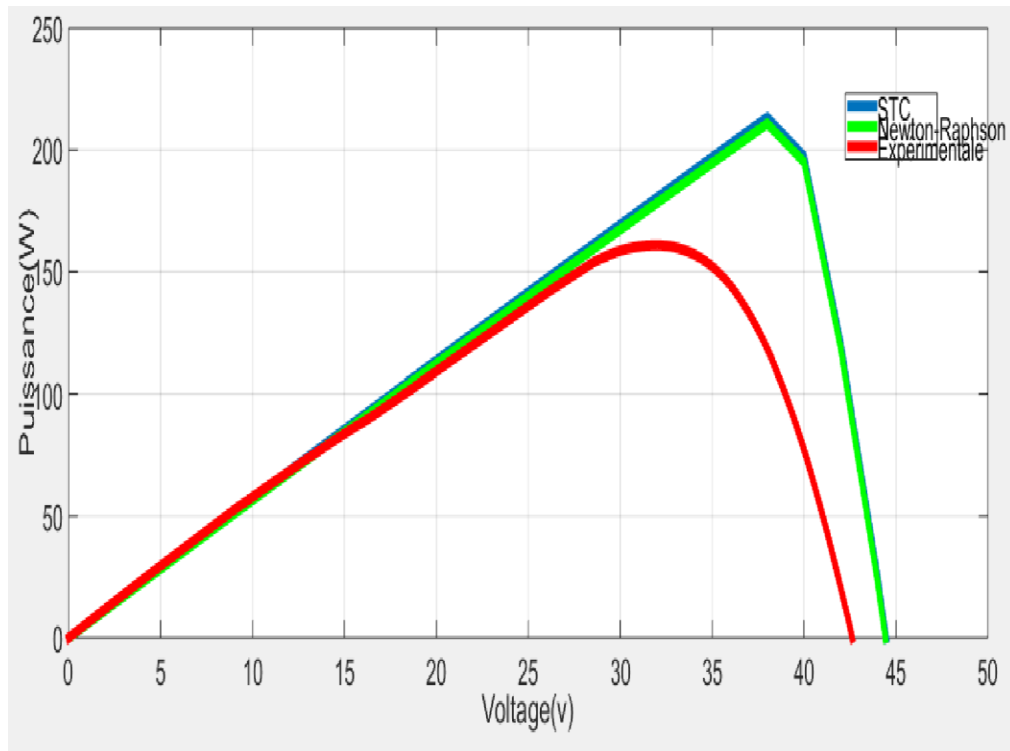


Figure (III.14): La Validation de la méthode NR graphique, caractéristique P(V).

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, une approche générale sur la modélisation de cellule photovoltaïque (PV) à module utilisant, les modèles à cinq paramètres à une seule diode. Le modèle a été implémenté dans le logiciel MATLAB et les résultats ont été comparés aux valeurs de la fiche technique et aux caractéristiques du module PV dans les conditions de test standard (STC) (25°C , 1000 W/m^2). Les valeurs des paramètres ont été extraites à l'aide de la méthode de Newton-Raphson à partir des caractéristiques expérimentales de courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) du module JW-G2000 monocristallin.

Les résultats obtenus sont en bon accord avec les données des conditions de test standard fournies par le fabricant. L'approche peut donc être très utile aux chercheurs ou ingénieurs pour déterminer rapidement et facilement les performances de n'importe quel module photovoltaïque.

Conclusion générale

Notre présent travail contribue à la simulation des cellules solaires photovoltaïques. En utilisant un modèle à une exponentiel et a partir la loi des nœuds en trouve l'équation de courant $I(V)$, la résoudre avec la méthode la plus convergente de Newton-Raphson. Ces études sont effectuées sur une cellule solaire à une seul diode d'un module photovoltaïque qui est caractérisé par une tension circuit ouvert V_{co} , un courant de court - circuit I_{sc} , facteur d'idéalité A .

L'objectif de ce travail est de tester les paramètres extensifs qui influent sur notre cellule, on s'intéresse plus particulièrement à l'effet de la température et de l'éclairement solaire incident. Notre programme du Matlab est utilisé pour générer les caractéristiques électriques $I(V)$ et $P(V)$ il peut être facilement adapté pour le calcul d'autres effets de la température et l'irradiation sur les performances des dispositifs photovoltaïques dans ce travail, nous pensons avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire.

Une comparaison des résultats obtenus par la méthode développée et ceux du fabricant, a été présentée, Le travail réalisé dans ce mémoire a été basé sur les parties suivantes : Dans un premier temps, nous avons essayé de faire une revue assez générale sur la technologie photovoltaïque, rappelant son principe de fonctionnement, ces différentes filières technologiques, et l'association des cellules dans un module photovoltaïque. Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons donné un aperçu sur les techniques de dégradations sur la cellule photovoltaïque et les différents modèles électriques existant, et les méthodes étudiées pour l'identification des paramètres électriques de la cellule solaire, ensuite nous avons fait la modalisation de la méthode de Newton-Raphson. Dans le dernier chapitre, nous avons établis des programmes de calcul sous MATLAB qui nous a permis d'identifier les paramètres de la cellule photovoltaïque, et de tracer la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$, et par la suite on a donné les valeur des paramètres de la cellule solaire qui sont le courant de photovoltaïque I_{ph} , le courant de saturation I_0 , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_{sh} et le facteur d'idéalité V_T . En fin on a comparé les résultats de simulation.

Références bibliographiques

- [1] A. Wagner, 'Peak-Power and Internal Series Resistance Measurement under Natural Ambient Conditions', Euro Sun Conference, 2000 Copenhagen, June 19-22, 2000.
- [2] J.H. Smith and L.R. Reiter, 'An In-Depth Review of Photovoltaic System Performance Models', The American Society of Mechanical Engineers, 84-WA/Sol-12, 8 p., 1984.
- [3] Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 379 – 388.
- [4] Alain Bilbao Ibarra "Réalisation de commandes MPPT Numériques " Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Université Rovira Virgili 2006.
- [5] Amina, S.M.S. and B.A. Djamilia, mémoire "Dimensionnement d'une installation photovoltaïque". 2015.
- [6] Sofia, D.B.L., Cours Energie solaire photovoltaïque. 2015.
- [7] SLAMA Fateh. Modélisation dun sys multi générateurs PV interconnectes au réseau électrique. Magister en eth.ufa setif.
- [8] M.N.Mchaliikh et CH.Hmada "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau " Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [9] Missoum. M et Hamidat. A. Contribution de l'énergie PV dans la performance énergétique de l'habitat a haute qualité énergétique en Algérie. Magister en génie mécanique.2011.
- [10] N. Hamid, "Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque et de l'onduleur," Mémoire Master en Electrotechnique, Université Akli Mohand Oulhadj - bouira, 2016.
- [11] M.louazene, "Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes application zone d'Ouargla", Mémoire de magister, Département d'électrotechnique, Université el hadj Lakhdar – Batna, Algérie, 2008.
- [12] CASSORE, F. G. ORLANDI, and M. RAU, cellules photovoltaïques a colorant.
- [13] Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010.
-

Références bibliographiques

[14] <https://total.direct-energie.com/>

[15] I. Bendjamaa ‘‘Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque ‘‘
Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.

[16] A. Labouret et M. Villoz, « Énergie solaire photovoltaïque » - 2ème édition, Dunod, Paris, 2005.

[17] « Badia, Amrouche. « Contribution au développement d’une nouvelle méthode MPPT basée sur les concepts de l’intelligence artificielle pour les systèmes photovoltaïques ». Thèse de Doctorat en Communication. Université Saad Dahleb de Blida, Blida, 2013. »..

[18] Mohamed El Amine Khaled BENALOUACH, « «Modélisation, Simulation et Optimisation d’un Système Énergétique de Production Photovoltaïque associé à un Accumulateur». Mémoire de Magister en physique (Energie renouvelable). Université ABOU-BEKR BELKAÏD de Tlemcen, Tlemcen, 2013. ».

[19] S.bensalem, "Effets de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires", Mémoire de maîtrise ; Département de physique université ferhat abbas – Sétif Algérie ; 2011.

[20] GUENOUNOU Abderrezak, mémoire de magister, mise au point de nouveaux procédés de mesure des caractéristiques directe et inverse des modules photovoltaïques de différentes technologies- Tlemcen -2009.

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

[22] M.missoum, "Contribution de l’énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l’habitat à haute qualité énergétique en Algérie" Département de génie mécanique ; Université hassiba benbouali de chelf, Algérie ; 2010/2011

[23] H.berrezzoug, "Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d’une cellule photovoltaïque", Mémoire de master, Département de physique, Université Dr moulay tahar de Saida, Algérie 2016.

[24] 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.

[25] A.Saadi,"Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompe photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.

[26] M.N.Mchalikh et CH.Hmada’’Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ’’ Mémoire de Master Université KasdiMerbah–Ouargla 2013 .

Références bibliographiques

- [27] Quintana M.A., King D.L., McMahon T.J., Osterwald C.R. “Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules”. Proc. 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1436-1439, 2002.
- [28] <http://itex.pagesperso-orange.fr/photovoltaïque.html>
- [29] <https://pdfs.semanticscholar.org/4066/37b48c5831059268cfed9bc416b3c744ff18.pdf>
- [30] Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance Ababacar Ndiaye.
- [31] King D.L., Kratochvil J.A., Boyson W.E. “Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results”. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE, 1997.
- [32] https://scholar.google.com/scholar?q=The+imaging+of+shunts+in+solar+cells+by+infrared+lock-in+thermography&hl=fr&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar.
- [33] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pip.895>.
- [34] Belyaev A., Polupan O., Dallas W., Ostapenko S., Hess D., Wohlgemuth J. “Crack detection and analyses using resonance ultrasonic vibrations in full-size .
- [35] T. Back, F. Hoffmeister, « Global optimization by means of evolutionary algorithms», Divnogorsk, EX-URSS, 1991, p.17.
- [36] F. ZOUACHE, « Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques », mémoire magister, Université Mentouri constantine, 2009.
- [37] Michael Boxwell. Solar electricity hand book, 2012.
-

Annexe

Les caractéristiques expérimentales de courant-tension I(V) du module JW-G2000 monocristallin.



Module Photovoltaïque

JW-G1900, JW-G1950, JW-G2000

Paramètres Electriques

Puissance Max. (Pm)	190W	195W	200W
Tension à puissance Max. (Vmp)	36.5V	36.5V	36.5V
Intensité à puissance Max. (Imp)	5.21A	5.34A	5.48A
Tension à circuit ouvert (Voc)	44.5V	44.5V	44.5V
Courant de court-circuit (Isc)	5.52A	5.77A	5.92A
Rendement du module	14.49%	14.88%	15.27%
Tolérance de puissance max	±3%		
Température nominale des cellules	47°C ±2		
Tension maximale du système	1000V (IEC)		

Paramètres Mécaniques

Type de cellules & No.	72 Mono. (125 x 125 mm)
Cadre	Aluminium anodisé, Double paroi
Boîte de jonction	IP-65 rated, PV-RH 701
Connecteurs	Cixi Renhe
Câbles	12 AWG / 900mm
EVA	Bridgestone Corporation
Backsheet	Krempel
Dimensions	1580 x 808 x 45 mm
Poids	16 kg

Paramètres d'essais

Température de fonctionnement	-40C to +85C
Essais à charge max (ex: vent, neige)	5400Pa
Essais d'impact de grêle	diamètre: 25mm vitesse: 23m/s

Coefficients de température

Puissance	-0.446%/°C
Tension (Voc)	-0.322%/°C
Courant (Isc)	0.060%/°C

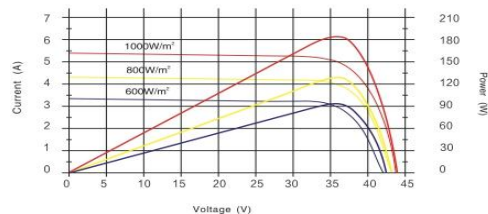
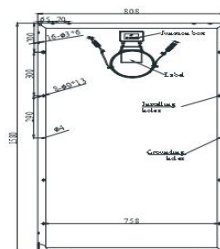
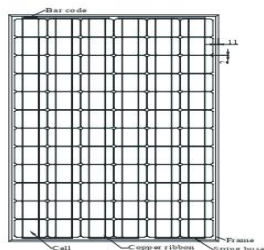


Garanties & Certifications

Garanties: 10 ans garanties produits
25 ans de garanties sur la puissance (90% - 12 ans, 80% - 25 ans)

Certifications: UL1703, IEC61730, IEC61215, TÜV, Class C Fire Rating, CE, ISO

Schéma - Courbes



Note: Tous les paramètres électriques sont indiqués aux conditions standards de test (exposition à 1000W/m², AM 1.5G, température des cellules: 25°C)

NOUS RÉCOLTONS

LE SOLEIL

POUR VOTRE AVENIR

2013 Jiawei Europe SAS. Tous droits réservés.
Les spécifications figurants sur cette brochure sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.

Jiawei Europe SAS
11 rue Robert Minder / 67310 Wasselonne / FRANCE
Tél: +33 (0)3 88 77 95 60 Fax: +33 (0)3 88 77 34 36
Email: commercial@jiawei-europe.com
www.jiawei-europe.com