

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique.
Option : Réseaux électriques

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

Modélisation de la cellule photovoltaïque en vue
de l'identification paramétrique

Présenté par :
Lakhneche youcef
Soutenu le : 05 Juin 2017

Devant le jury compose de :

Dr. Dendouga Abdelhakim

Dr. Megherbi Ahmed Chaouki

M^{me}. Laala Widad

MC 'A'

MC 'A'

MA 'A'

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Modélisation de la cellule photovoltaïque en vue de
l'identification paramétrique

Présenté par :

Lakhneche Youcef

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. Megherbi Ahmed Chaouki

signature

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Dendouga Abdelhakim

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électriques

Thème :

**Modélisation de la cellule photovoltaïque en vu de
l'identification paramétrique**

Réalisé par : Lakhneche Youcef

Proposé et dirigé par : Dr. Megherbi Ahmed Chaouki

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir donné la force et le courage pour faire ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier Dr. Megherbi Ahmed Chaouki, mon encadreur pour tous les efforts qu'il a faits, pour l'aide qu'il m'a accordé tout au long de mon travail et pour avoir dirigé ce travail avec à la fois, beaucoup de rigueur et de sympathie. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie également Dr. Mahdad Belkacem , Dr. Terki Amel et Laala Widad pour leurs grand aide précieux pour la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier tous mes enseignants, mes collègues d'études pour leurs soutiens et leur motivation.

Que mon père et ma mère, mes frères et mes sœurs trouvent ici mes chaleureux remerciements pour leurs diverses aides.

Enfin, que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, soient chaleureusement remerciées.

Dédicace

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL A :
MES PARENTS QUI MON SOUTENU TOUT AU LONG DU
MON PARCOURS ;
A MES SOEURS NOURA ET HASINA ,
MOHAMED ,TOUFIK ,SAMIR,HAMZA;
SPECIALEMENT A MA GRANDE MERE ;
A TOUTES LA FAMILLE,
A MON AMI ABDO, HAITHEM, MOHAMED, HAKIM,
ABAS, JAMAL, HOUCINE, OUSAMA, FARS, MALOUKA
HOUSEME, ZAKI ,ZIDAN, NABA, MALK ,SALMA ,ET A
TOUS LES AUTRES AMIS QUI SON AU COEUR .

Sommaire

| | |
|--|----|
| Acronymes et Symboles..... | |
| Introduction Générale..... | |
| CHABITRE I : Les systèmes photovoltaïques | |
| I-1 Introduction : | 1 |
| I-2 Historique | 1 |
| I-3 Futur | 2 |
| I-4 Energie photovoltaïque : | 2 |
| I-5 Le panneau solaire : | 3 |
| I-6 Choix du panneau : | 4 |
| I-6-1 Caractéristiques techniques du panneau BP-SX150S : | 4 |
| I-7 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque : | 5 |
| I-8 La cellule photovoltaïque : | 6 |
| I-8-1 Définition : | 6 |
| I-8-2 Fabrication des cellules : | 6 |
| I-8-3 Assemblage des modules et la réalisation du système PV : | 7 |
| I- 9 Les différentes technologies | 7 |
| I-9-1 Cellules cristallines : | 7 |
| I-9-1-1 La cellule monocristalline : | 7 |
| I-9-1-2 Les cellules poly-cristallines : | 8 |
| I-9-1-3 Cellules à couches minces : | 8 |
| I-10 Performances : | 8 |
| I-10-1Caractéristiques d'un panneau: | 8 |
| I-11 Système photovoltaïque : | 9 |
| I-11-1: éléments d'un système photovoltaïque : | 9 |
| I-11-2 Les différents types de systèmes photovoltaïques: | 10 |
| I-11-2-1 Système PV autonome: | 10 |
| I-11-2-2 Système PV connecté directement au réseau: | 11 |
| I-12 Avantages et inconvénients d'une installation PV: | 11 |
| I-12-1 Avantages : | 11 |
| I-12-2 Inconvénients : | 12 |

| | |
|--|----|
| I-13 Conclusion : | 13 |
| CHAPITRE II : Modélisation des cellules photovoltaïque | |
| II –1 Introduction : | 14 |
| II –2 Modélisation des cellules photovoltaïques : | 14 |
| II –2-1 Modèle à deux diodes : | 15 |
| II –2-1-1 Modèle à sept paramètres (2M7P) : | 15 |
| II –2-1-2 Modèle a six paramètres : | 17 |
| II –2-1-3 Modèle a cinq paramètres 2M5P : | 18 |
| II –2-2 Modèle a une diode : | 19 |
| II –2-2-1 Modèle a trois paramètres (L3P) : | 19 |
| II –2-2-2 Modèle a quatre paramètres (L4P) : | 21 |
| II –2-2-3 Modèle a cinq paramètres (L5P) : | 22 |
| II-3 Caractéristique d'un module solaire: | 23 |
| II-3 -1 Caractéristique courant-tension I(V): | 23 |
| II-3 -2 Caractéristique puissance-tension P(V): | 23 |
| II-4 Zones de fonctionnement du module solaire: | 24 |
| II-5 Influence des différents paramètres..... | 25 |
| II-5-1 Influence de la Température | 25 |
| II-5-2 Influence de la résistance série..... | 27 |
| II-5-3 Influence du facteur de qualité..... | 27 |
| II-6 Comparaison entre les différents modèles électriques | 29 |
| II-7 Conclusion | 29 |
| CHAPITRE III : Identification des Paramètres des cellules photovoltaïques | |
| III -1 Introduction..... | 30 |
| III -2 Identification des systèmes | 30 |
| III -3 L'algorithme d'optimisation..... | 32 |
| III -4 Exemple algorithmes génétiques..... | 32 |
| III-4-1 Codage réel..... | 33 |
| III -4 -2 La sélection..... | 34 |
| III -4 -3 Le croisement..... | 35 |
| III -4 -3 -1Croisement a un point simple..... | 35 |

| | |
|--|----|
| III -4 -4 La mutation..... | 35 |
| III-5 Identification des paramètres $\langle R_s, R_{sh}, a \rangle$ | 37 |
| III-6 Résultat..... | 38 |
| III-7 Conclusion..... | 39 |
| Conclusion général..... | 40 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1 : Panneau de solaire..... | 3 |
| Figure I -2 : Représentation schématique d'une cellule solaire..... | 5 |
| Figure I -3 : les étapes de fabrication d'un système..... | 7 |
| Figure I -4 : Différents technologie des cellules..... | 8 |
| Figure I-5:Schéma Etude de l'ensoleillement et choix du meilleur angle d'inclinaison..... | 9 |
| Figure I-6: Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque..... | 9 |
| Figure I-7: Installation photovoltaïque autonome..... | 10 |
| Figure I-8: Installation photovoltaïque couplée au réseau..... | 11 |
| Figure II-1 : Modèle à 7 paramètres..... | 15 |
| Figure II-2 : schéma équivalent du modèle a deux exponentielles 2M6P..... | 17 |
| Figure II-3 : Schéma équivalent du modèle a deux exponentielles, 2M5..... | 18 |
| Figure II-4 : Schéma équivalent du modèle a une exponentielleL3P..... | 19 |
| Figure II-5: Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire (L3P) T=25°C..... | 20 |
| Figure II-6 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire (L3P) T=25°C. | 20 |
| Figure II-7 : Schéma équivalent du modèle a une exponentielleL4P..... | 21 |
| Figure II-8 : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire (L4P) T=25°C ponentielleL4P..... | 21 |
| Figure II-9: Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire (L4P) T=25°C..... | 22 |
| Figure II-10 : Schéma équivalent du modèle a une exponentielleL5P..... | 22 |
| Figure II-11 : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire (L5P) T=25°C..... | 23 |
| Figure II-12 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire (L5P) T=25° | 24 |
| Figure II-13 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C[1..... | 25 |
| Figure II-14 : La caractéristique I(V) du module PV selon la température. | 26 |
| Figure II-15 : Caractéristique P-V du module PV selon la température. | 26 |
| Figure II-16 Caractéristique I(V) de module PV selon la résistance série..... | 27 |
| Figure II-17 : Caractéristique P(V) de module PV selon la résistance série..... | 27 |
| Figure II-18 : Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité...28 | |
| Figure II-19 Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité. | 28 |

| | |
|---|----|
| Figure II-20 : Caractéristiques I(V) pour les modèles à une exponentielle..... | 29 |
| Figure III -1: Etapes de l'identification des systèmes..... | 31 |
| Figure III-2 : illustration schématique du codage des variables réelles..... | 34 |
| Figure III-3 : la roulette. | 34 |
| Figure III-4 : Exemple de croisement a un point simple..... | 35 |
| Figure III-5 : une mutation..... | 36 |
| Figure III -6 : schéma générale d'un algorithme génétique..... | 36 |
| Figure III -7: L'évolution de la meilleure valeur de fonction objective au cours des générations..... | 37 |
| Figure III-8: Ajustement théorie expérience de la caractéristique (I-V) obtenu à la dernière génération..... | 38 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau- I-1 : Paramètres du panneau BP-SX150S dans S.T.C :..... | 4 |
| Tableau III-1: Valeurs de R_s , R_{sh} et de a obtenus par la méthode d'AG..... | 38 |

Symbole

| Symbole | unité | définition |
|--------------------|----------------------|---|
| V_{mp} | (v) | La tension maximum de point du fonctionnement du module PV |
| V_{oc} | (v) | Tension de circuit ouvert |
| V_{pv} | (v) | La tension a circuit ouvert |
| I_{mp} | (A) | Le courant maximum de point du fonctionnement du module PV |
| I_{cc} | (A) | Courant de circuit ouvert |
| N_s | | Nombre de cellule en série |
| K_i | [A/K] | Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température |
| N_p | | Nombre de cellule en parallèle |
| $a_1 a_2$ | | Les facteurs de diode |
| I_{ph} | (A) | Le photo courant (A). |
| $I_{ph\ ref}$ | (A) | Le courant photonique sous condition de référence. |
| I_{s1}, I_{s2} | (A) | Les courants de saturation |
| R_{sh} | (Ω) | Résistances shunt. |
| R_s | (Ω) | Résistance série |
| I_{d1} | (A) | courant de diode 1 |
| I_{d2} | (A) | courant de diode 2 |
| V_t | (J/C) | Représentant la potentielle thermodynamique |
| I_{rs1}, I_{rs2} | (A) | Les courants de diode inversée |
| q | (C) | Charge de l'électron. |
| K | (J/K) | Constant de Boltzmann |
| I_{sh} | (A) | Le courant circulant dans la résistance R_{sh} |
| G_{ref}, G | [W/m ²]. | L'éclairement réels et a la condition de référence |
| $T_c, T_{c\ ref}$ | (°C) | La température de cellule, réelle et la condition de référence. |
| I_{pv} | (A) | Le courant électrique produit par la cellule |
| E_{gap} | (eV) | énergie de gap |

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. Les Besoins énergétiques des sociétés industrialisées ainsi que ceux des pays en voie de développement ne cessent de se multiplier. Cette production a triplé depuis les années 60 à nos jours. Cette consommation donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le recours au développement des énergies non polluantes est alors apparu comme l'ultime solution face à ce problème.[1].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une énergie verte inépuisable qui représente une source d'énergie alternative qui peut être utilisée par l'humanité. Cette énergie est de plus en plus appliquée dans différents domaines allant des installations résidentielles et commerciales jusqu'aux systèmes spatiaux, en raison de nombreux avantages tels que l'absence de pollution, elle est sans bruit, facile à installer, et nécessite une courte période de construction.

Dans les grandes installations, une station solaire PV peut comprendre des centaines voir des milliers de panneaux photovoltaïques, ou la stabilité et la qualité de la puissance générée sont en corrélation avec l'état de fonctionnement de chaque cellule. Le défi soulevé, dans ce type d'installation, est comment surveiller l'immense réseau de cellules photovoltaïques afin de maintenir le fonctionnement normal de la station. Généralement les générateurs PV sont considérés fiables par rapport aux autres systèmes, mais comme tous procédés, un système PV peut être exposé à plusieurs pannes provoquant le dysfonctionnement de ce dernier, plusieurs études ont constaté que la fiabilité des systèmes PV est fortement dépendante du matériel utilisé pour la construction des panneaux PV, de la température, de l'humidité et du rayonnement solaire. Un système PV peut avoir plusieurs défauts que ce soit les défauts de types construction, ou les défauts matériels et électriques causés par les conditions climatiques. A ce titre, nous pouvons citer le défaut le plus couramment rencontré dans un générateur PV qui est le défaut d'ombrage partiel.[10].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée pour faire fonctionner diverses applications terrestres comme l'éclairage, les Télécommunications, la réfrigération et le pompage, etc. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible, de plus, le générateur lui-même ne

contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [11].

L'objectif de ce travail est l'étude des différents modèles de la cellule photovoltaïque pour l'identification de ces paramètres.

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en trois chapitres selon le plan méthodologique suivant :

Au premier chapitre, on s'intéresse à la description générale et le principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques avec le réseau électrique.

Le second chapitre est très important, présente la modélisation du système photovoltaïque et ses caractéristiques, Influence des différents paramètres.

Au troisième chapitre, nous allons donner des généralités sur l'identification des paramètres de la cellule toute en proposant une technique basée sur l'algorithme génétique pour l'identification de ces paramètres.

CHAPITRE I

Les systèmes photovoltaïques

I-1 Introduction

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

La plus part des utilisations est directe comme en agriculture. à travers la photosynthèse ou dans divers domaines comme, le domaine spatial qui est peut être l'acteur principal dans le développement de la technologie photovoltaïque comme nous la connaissons aujourd'hui. Lorsque les premières cellules photovoltaïques ont été élaborées, elles étaient trop chères. Cependant le domaine spatial a vu dans ces cellules une solution adaptée pour alimenter les satellites et a ainsi contribué à la dynamisation de la recherche et à l'émergence de cette technologie. [1].

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. Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques constituées de semi-conducteur en silicium.

On commencera par brève rappelle sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [14].

I-2 Historique

La conversion de la lumière en electricite, appelé effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique. L'utilisation des cellules solaires dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années septante pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

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

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie[8].

I-3 Futur

L'industrie du photovoltaïque se tourne aujourd'hui vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couche fine et les matériaux organiques constituent aujourd'hui les principaux axes de recherche et d'innovation future.

Enfin, la recherche sur le stockage d'électricité sera également importante. Ce thème transversal de l'énergie concerne plus particulièrement le solaire photovoltaïque puisque le caractère compétitif de cette technologie dépendra beaucoup de la capacité à adapter sa production pour répondre aux besoins ponctuels.[5].

I-4 Energie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Un système photovoltaïque (PV) est destiné à satisfaire un besoin d'énergie électrique selon des conditions spécifiques d'exploitation. Il est généralement constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage, de source auxiliaire d'appoint (groupe diesel, aérogénérateur, réseau, etc....), des systèmes d'interface (convertisseurs, réseau, etc..) d'un système de control et de commande (système de surveillance, armoires électriques, cartes électroniques..) et d'une

utilisation courant un usage déterminé. Cet usage (éclairage, réfrigération, pompage, communication,...) est exploité dans divers secteurs (santé, éducation, agriculture, énergie...).

La partie principale dans ces installations est le générateur photovoltaïque. Il est composé de divers modules formés par une association série_ parallèles de cellules élémentaires convertissant l'énergie solaire (sous formes de rayonnement) en une énergie électrique. Une cellule peut produire 1.5w pour un ensoleillement de 100W/m² avec une tension de 0.6V. Un module de 36 cellules produit une puissance moyenne de 40 à 50W et occupe une surface de 0.5m² environ. Le rendement énergétique moyen est de l'ordre de 12 à 15% est a atteint pour une phase de recherche 30%. La durée de vie d'un tel générateur est estimée à plus de 20 ans.

Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et le réseau de transport [3].

I-5 Le panneau solaire

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 permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique.



Figure I-1 : Panneau de solaire [6].

I-6 Choix du panneau

Nous avons choisi le module photovoltaïque BP-SX150S, en raison de son rendement le plus élevé si comparé avec d'autres panneaux de différents constructeurs, ainsi sa tension maximale est plus élevée, et il fournit une puissance rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges à courant continu, ou des charges à courant alternatif sur des systèmes munis d'onduleur. Le module se compose de 72 cellules poly cristallines en silicone connectées entre elles en série pour produire une puissance de 150W. [11].

I-6-1 Caractéristiques techniques du panneau BP-SX150S

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées (S.T.C) suivantes.

- Un spectre AM 1,5 ;
- Un éclairage de 1000W/m² ;
- Une température ambiante de 25°.

A partir des notices techniques fournies par le constructeur disponibles dans l'annexe, nous avons déterminé les paramètres du panneau choisi lesquels nous avons reporté dans le Tableau (I-1).

| Grandeurs | valeur |
|--|----------|
| Puissance nominale | 200.93 W |
| Tension au MPP (V_{mp}) | 26.3 V |
| Courant au MPP (I_{mp}) | 7.64 A |
| Courant de court- circuit (I_{cc}) | 8.25 A |
| Tension de circuit ouvert(V_{oc}) | 32.9 V |
| Nombre de cellule en parallèle (N_p) | 1 |
| Nombre de cellule en série (N_s) | 54 |
| Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température | 0.0032 |
| Coefficient de sensibilité de la tension à la température | -0.123 |

Tableau- I-1 : Paramètres du panneau BP-SX150S dans S.T.C.

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C). A partir de ces données et suivant les étapes illustrées dans le paragraphe précédent, nous avons illustré des résultats pour la modélisation du panneau BP-SX150S[11].

I-7 Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de la cellule repose sur l'effet photovoltaïque qui converti 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.

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type Opposé (jonction PN).

Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés figure (I -2) [1].

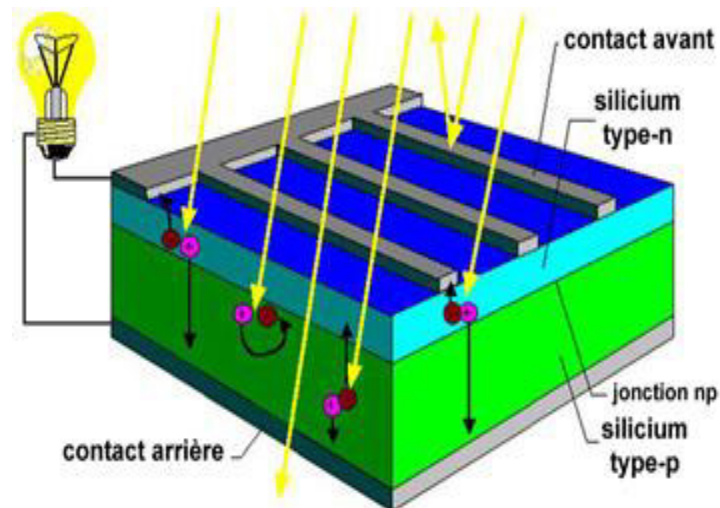


Figure I -2 : Représentation schématique d'une cellule solaire [1].

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire

en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.
- Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.
- Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N[1].

I-8 La cellule photovoltaïque

I-8-1 Définition

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

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif. [9].

I-8-2 Fabrication des cellules

Les lingots monocristallins et les briques multi cristallines sont ensuite découpés en tranches par une scie à fil, à une épaisseur d'environ 250 μm . [9] Une fois les plaques découpées viennent la fabrication des cellules, qui va permettre d'exploiter les propriétés de semi-conducteur du silicium et de transformer l'énergie lumineuse captée en énergie électrique.

I-8-3 Assemblage des modules et la réalisation du système PV

Cela fait par l'assemblage des modules et de les mettre en série ou en parallèle pour réaliser le système photovoltaïque.

La figure I -3 représente l'enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.[9].

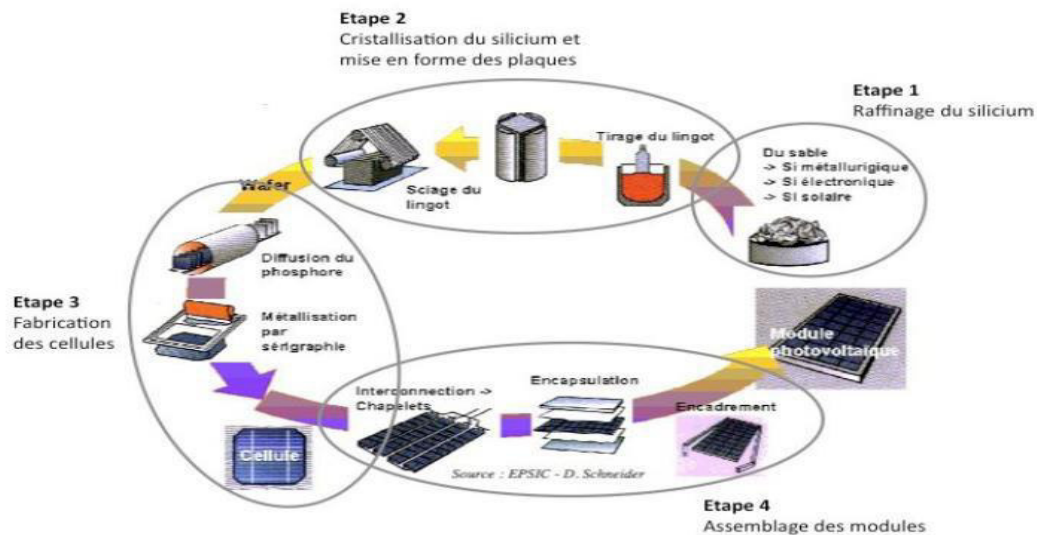


Figure I -3 : les étapes de fabrication d'un système PV [9].

I- 9 Les différentes technologies

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constitutants, la plupart des recherches se dirigent dans ce domaine, car c'est l'élément qui freine jusqu'à maintenant la production photovoltaïque et sa répartition à grande échelle.

Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue en général les cellules cristallines et les cellules à couches minces.

I-9-1 Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ 94% du marché. On reconnaît deux types des cellules sont :

. I-9-1-1 La cellule monocristalline

qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches (fig.I-4-a). Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 % [7]

I-9-1-2 Les cellules poly-cristallines

sont composées d'un agglomérat de cristaux (fig. I -4-b). Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [7].

I-9-1-3 Cellules à couches minces

La technologie des couches minces a l'avantage de produire les cellules par un procédé de revêtement à grande surface peu onéreux. Elles sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles ((fig. I -4-c).

Par contre leur rendement est plus bas que celui des cellules cristallines. Divers matériaux semi-conducteurs entrent en ligne de compte pour cette technologie: le silicium amorphe et micro-morphe, le Cd-Te (tellurure de cadmium), le CIS (sélénure de cuivre et d'indium), parfois aussi le CIGS (sélénure de cuivre, indium et gallium). Les nanotechnologies (cellules à colorants) ne jouent pas encore un grand rôle [7].

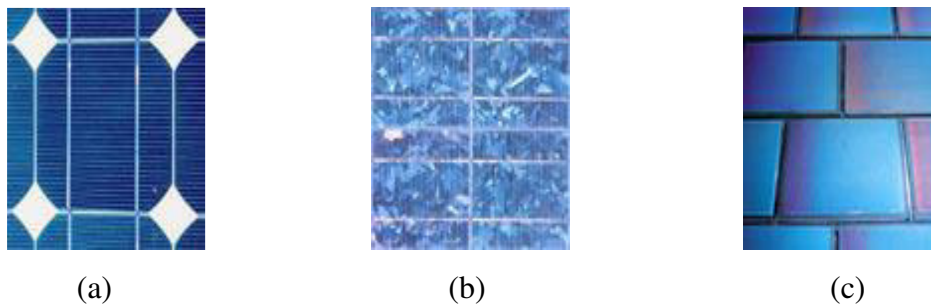


Figure I -4 : Différents technologie des cellules [7]

I-10 Performances

I-10-1 Caractéristiques d'un panneau

• Performances.

Le rendement d'une cellule PV est le rapport entre l'énergie électrique aux bornes de la cellule et l'énergie incidente (en %). Il dépend essentiellement de la puissance maximale du panneau solaire, de l'intensité de l'ensoleillement, du nombre d'heures d'exposition, de l'angle d'incidence des rayons sur le panneau et de la température.

La température extérieure influence le rendement du panneau d'environ 15% ; plus il fait froid et mieux on pourra produire.

Le paramètre qui joue le plus est l'angle d'incidence des rayons lumineux : ils doivent arriver perpendiculairement au panneau.[16].

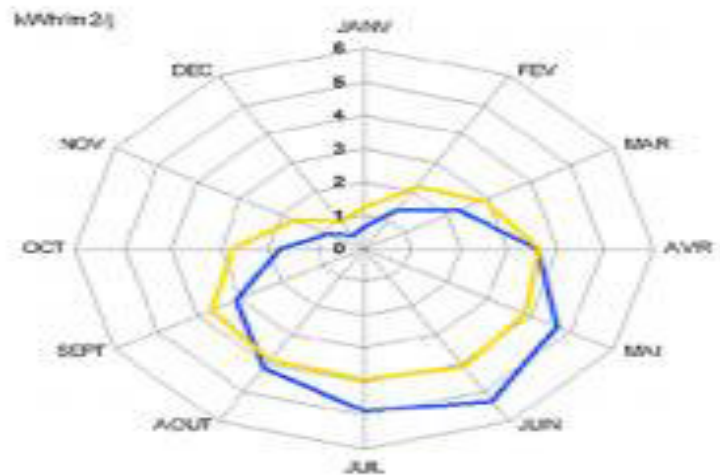


Figure I-5: Schéma Etude de l'enseillement et choix du meilleur angle d'inclinaison.[16]

I-11 Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque comporte plusieurs parties, il se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charge, injection dans le réseau). Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale.[10]

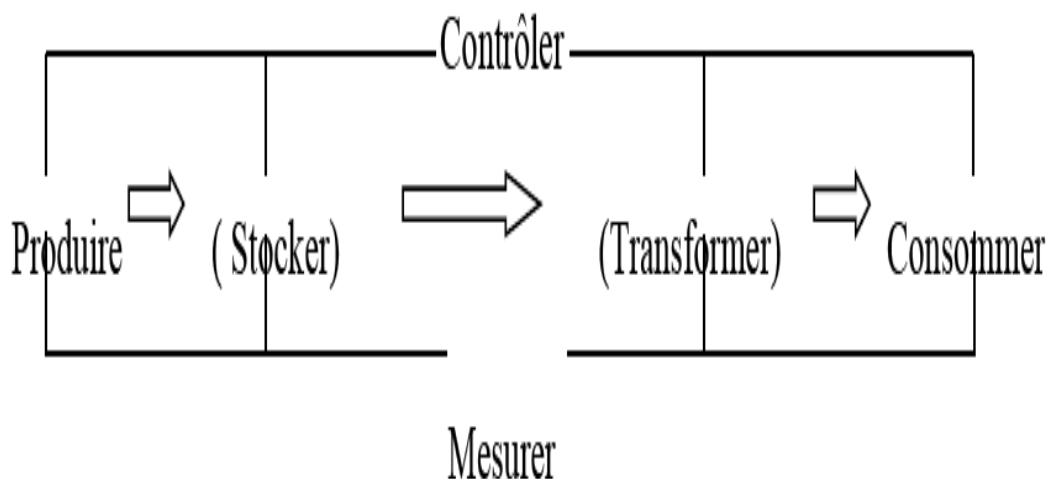


Figure I-6: Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.[10].

I-11-1: Eléments d'un système photovoltaïque

Les composants d'un système photovoltaïque dépendent de l'application considérée : habitation isolée ou à proximité d'un réseau, utilisation de batterie ou « au

fil du soleil », convertisseurs de puissance. Il existe plusieurs composants d'un système photovoltaïque :

- ✓ Les cellules solaires ou panneau solaires qui forment le champ photovoltaïque
- ✓ Les régulateurs de charge qui ont pour rôle de transférer le maximum de charge aux batteries
- ✓ Les convertisseurs, soit des convertisseurs DC/DC ou bien DC/AC.
- ✓ Les batteries de stockage comme leurs noms l'indiquent, ont pour rôle de stocker l'énergie afin de l'utiliser ultérieurement.
- ✓ Autres composants. [10]

I-11-2 Les différents types de systèmes photovoltaïques

I-11-2-1 Système PV autonome

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge. Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur [10].

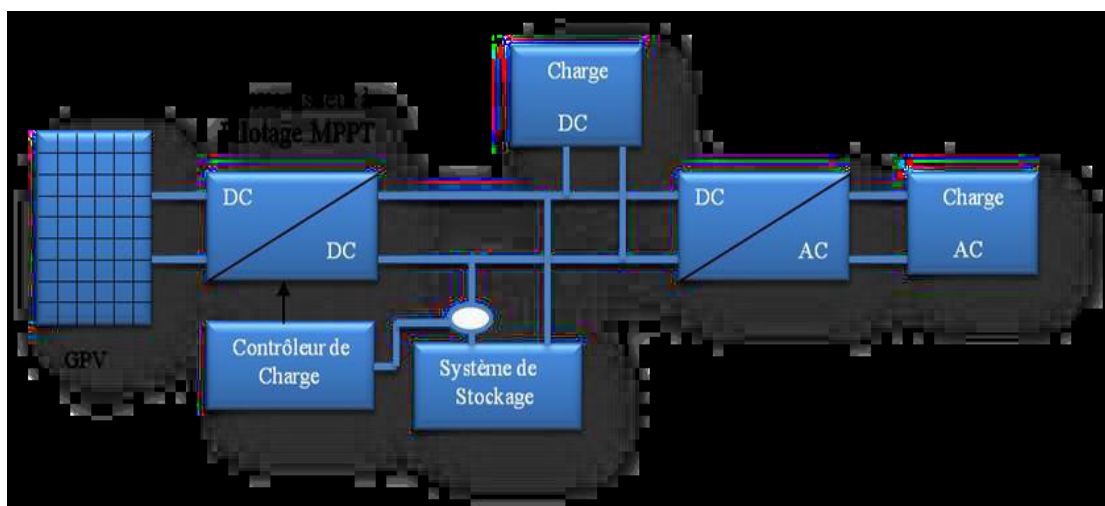


Figure I-7: Installation photovoltaïque autonome[10].

I-11-2-2 Système PV connecté directement au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique (Figure I-8). L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau. [10]

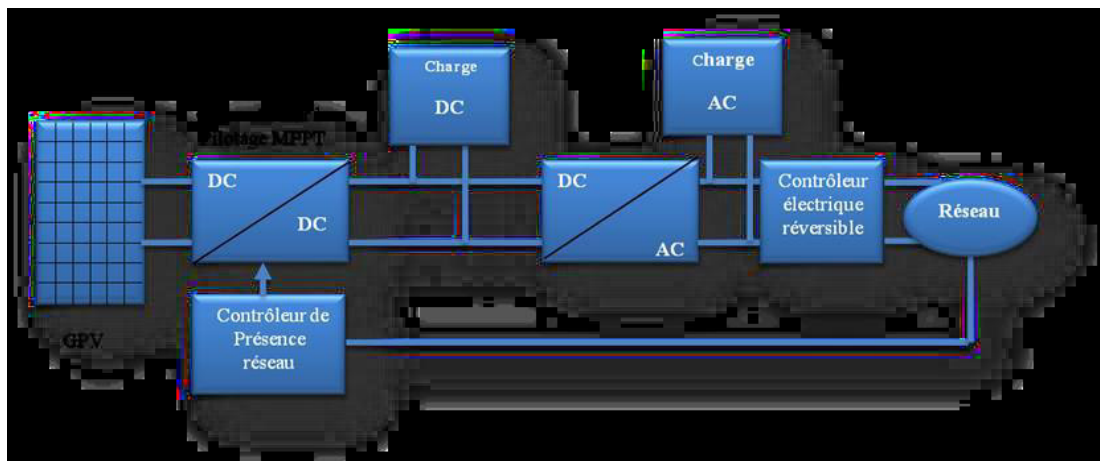


Figure I-8: Installation photovoltaïque couplée au réseau.[10].

I-12 Avantages et inconvénients d'une installation PV

I-12-1 Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes

peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.[6]

I-12-2 Inconvénients

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

électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.[6]

I-13 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un générateur PV .Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque (l'effet photovoltaïque). Ensuite, nous avons cité les différents types de systèmes photovoltaïques et avantages et inconvénients d'une installation PV.

CHAPITRE II

Modélisation des cellules photovoltaïques

II –1 Introduction

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est l'un des moyens d'exploitation du gisement solaire. La production de l'électricité par des moyens propres est devenue une nécessité primordiale dans un monde où l'environnement est menacé par la pollution et l'effet de serre. Le photovoltaïque (PV) est une énergie propre et non épuisable. Il représente une composante essentielle des énergies renouvelables qui peut aider le monde à répondre à ses besoins énergétiques toujours croissants, tout en limitant l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et en diminuant la pollution de l'environnement[11]

L'objectif de ce travail est de présenter les résultats concernant la caractérisation électrique et la modélisation dans l'environnement « Matlab » des générateurs photovoltaïques. Nous analysons le courant débité par le générateur ainsi que la puissance électrique fournie par ce générateur en fonction de la tension de sortie du générateur. Le modèle électrique utilisé dans cette modélisation est fonction d'une part de la température de jonction des cellules et d'autre part de l'ensoleillement afin de faire sortir les graphes en analysant les résultats et on conclut le travail [9].

II –2 Modélisation des cellules photovoltaïques

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

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments ,de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément ,en prenant plus ou moins de détails .Selon cette philosophie , plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire ,résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont a la base de leurs réalisations .Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

On présentera deux modèles du GPV a savoir

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

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

II –2-1 Modèle à deux diodes

II –2-1-1 Modèle à sept paramètres (2M7P)

Il est connu aussi par le nom 2M7P (Lumped ,2 Mécanisme model with 7 parameters) Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant les schéma électrique équivalent ci- dessous figure(II-1).Il consiste en la description mathématique d' un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diode ayant les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} , les facteurs de diode a_1 et a_2 une source de courant produisant un photo-courant I_{ph} , qui dépend de l'éclairement solaire .

La résistance série R_s rend compte de la résistivité du matériau ,de celle des électrodes et du contact semi –conducteur-Métal.Sa valeur est déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour une tension V égal a V_{co} ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule .Cest est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques a haute température perce l'émetteur .Elle peut aussi être due a un court-circuit sur les bords de la cellule cette valeur devra être la plus élevée possible .

Le modèle a deux- diodes est représenté par une équation implicite du courant qui ne peut être résolue qu'a l'aide de méthodes itératives.[2]

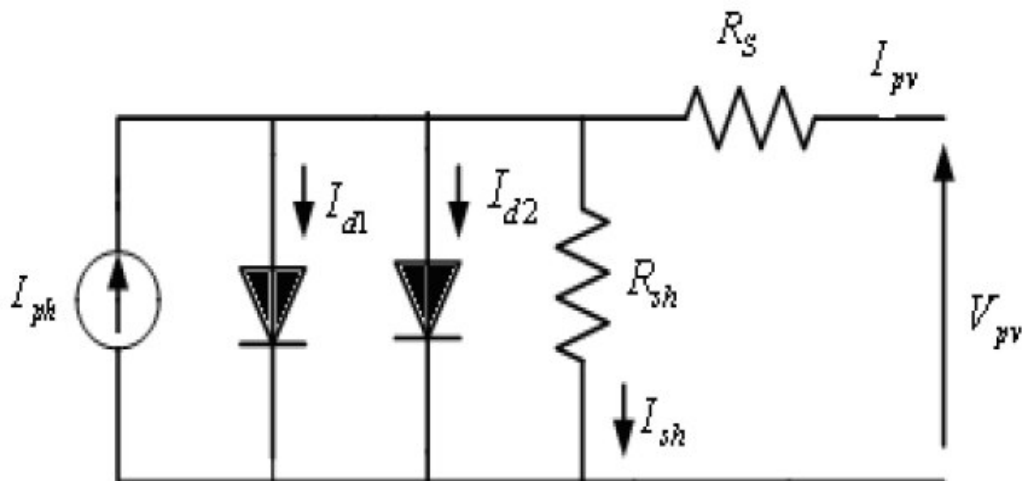


Figure II-1 : Modèle à 7 paramètres

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_{d1} : courant de diode 1

I_{d2} : courant de diode 2

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

$$I_{d1} = I_{s1} (e^{\frac{v_d}{a_1 \cdot v_t}} - 1) \quad (\text{II-2})$$

$$I_{d2} = I_{s2} (e^{\frac{v_d}{a_2 \cdot v_t}} - 1) \quad (\text{II-3})$$

Avec :

$v_t = \frac{N_s \cdot K \cdot T_c}{q}$: Représentant la potentielle thermodynamique

T_c :est la température absolue

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

K : Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K) .

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh}

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{v_t \cdot a_1}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{v_t \cdot a_2}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-4})$$

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

$$I_{ph} = [I_{ph \text{ ref}} + K_i (T_c - T_{c \text{ ref}})] \left(\frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) \quad (\text{II-5})$$

Avec :

$I_{ph \text{ ref}}$: Le courant photonique sous condition de référence.

K_i : Coefficient de sensibilité de l'intensité a la température [A/K].

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

$T_c, T_{c \text{ ref}}$: La température de cellule, réelle et la condition de référence.

Les courants de saturation I_{s1} et I_{s2} sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{s1} = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left[\frac{q.E_g}{a_1.K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (\text{II-6})$$

$$I_{s2} = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \exp\left[\frac{q.E_g}{a_2.K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (\text{II-7})$$

Les courants de diode inversée I_{rs1} et I_{rs2} sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{rs1} = \frac{I_{scn}}{\exp\left(\frac{V_{ocn}}{a_1.V_{tn}}\right) - 1} \quad (\text{II-8})$$

$$I_{rs2} = \frac{I_{scn}}{\exp\left(\frac{V_{ocn}}{a_2.V_{tn}}\right) - 1} \quad (\text{II-9})$$

$$V_{tn} = \frac{N_s.K.T_{c\ ref}}{q} \quad (\text{II-10})$$

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

$a=1$: la zone de charge d'espace est dépeuplée (cas idéal).

$1 < a < 2$: le niveau piège est peu profond dans la zone de charge d'espace et γ dépend de la polarisation

$a=2$: les centres de recombinaison sont distribués dans la zone de charge d'espace et sur un seul niveau au milieu de la bande interdite.

$2 < a < 4$:

Les centres de recombinaison sont distribués uniformément avec une densité réduite au centre de zone de charge d'espace par rapport à la surface

E_{gap} : énergie de gap (silicium cristallin -1.12 eV, silicium amorphe -1.7eV, CIS-1.03eV, CdTe -1.5eV).[2]

II –2-1-2 Modèle à six paramètres

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

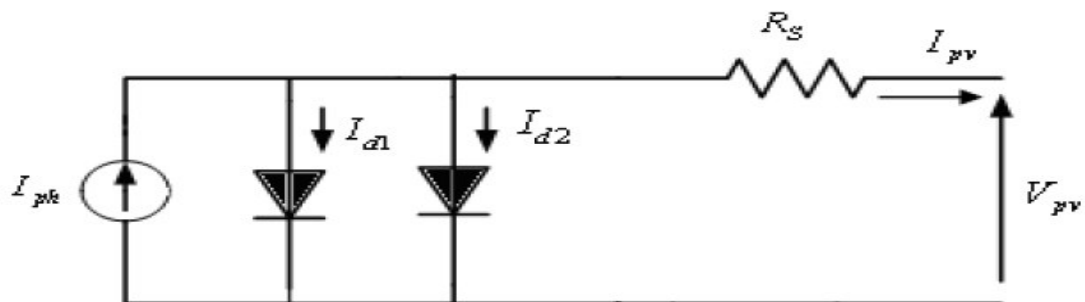


Figure II-2 : schéma équivalent du modèle a deux exponentielles 2M6P.

Dans ce modèle la résistance shunt a été omise ou mise a l'infini ce qui donne courant de fuite nul .La relation I(v) de ce circuit est donnée par la formule [12] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \tag{II-11}$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_S}{V_t \cdot \alpha_1}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_S}{V_t \cdot \alpha_2}} - 1 \right) \tag{II-12}$$

II –2-1-3 Modèle à cinq paramètres 2M5P

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une simplification au circuit du modèle a six paramètres représenté sur la figure (II-3) et le nom du modèle dans ce cas est 2M5P (Lumped ,2 Mécanisme model with 5 paramètres).cette simplification se Le circuit équivalent sera représenté comme suit ,figure (II-3)

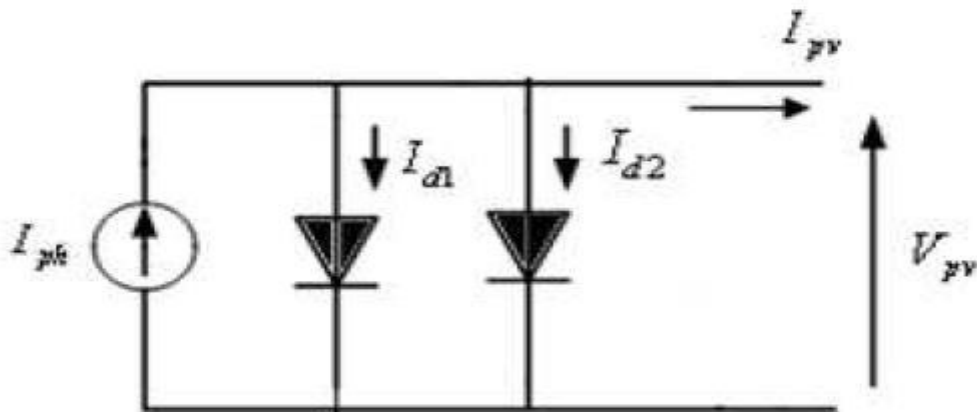


Figure II-3 : Schéma équivalent du modèle a deux exponentielles, 2M5P

Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation I_{s1} (équation(II-6)) et I_{s2} (équation -(II-6)),les facteurs de diode γ_1 et γ_2 .une source de courant prouduisant un photo-courant I_{ph} (équation (II-5)),qui dépend de l'éclairement solaire et de la température .

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe a partir de la loi de Kirchoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} \tag{II-13}$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :[2]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_{pv}}{V_{t.a1}}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V_{pv}}{V_{t.a2}}} - 1 \right) \tag{II-14}$$

II -2-2 Modèle à une diode

II -2-2-1 Modèle à trois paramètres (L3P)

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 photo porteurs en parallèle avec une diode idéale qui modélise la jonction PN [12].

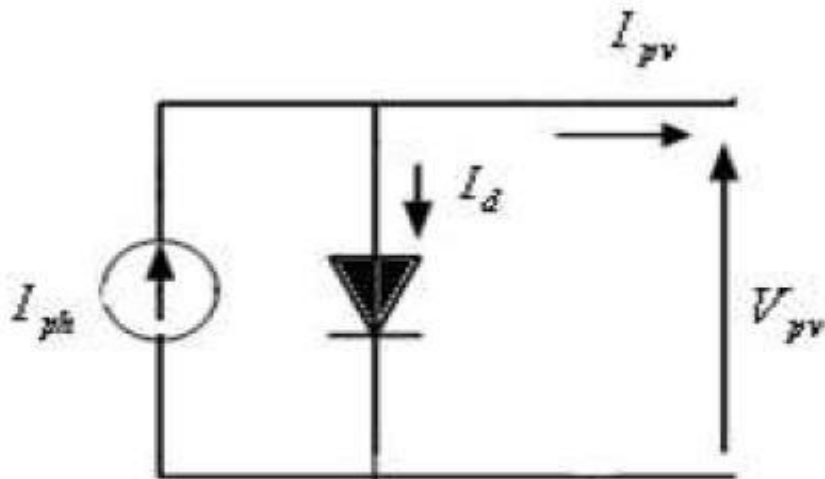


Figure II-4 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle L3P

L'omission des plusieurs paramètres nous amène à la relation décrivant ce modèle [11] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II-15}$$

La diode étant un élément non linéaire .sa caractéristique I-V est donnée par la relation [2]:

$$I_d = I_{s1} \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \tag{II-16}$$

Le courant débité équivalant à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{II-17})$$

Le module possède les caractéristiques suivantes à 1000 (w/m²) et 25°C.

Grace à « **MATLAB** », en utilisant le model mathématique qui représente le module photovoltaïque en se basant sur la méthode « **NEWTON-RAPHSON** » on peut tracer les courbes I-V et P-V

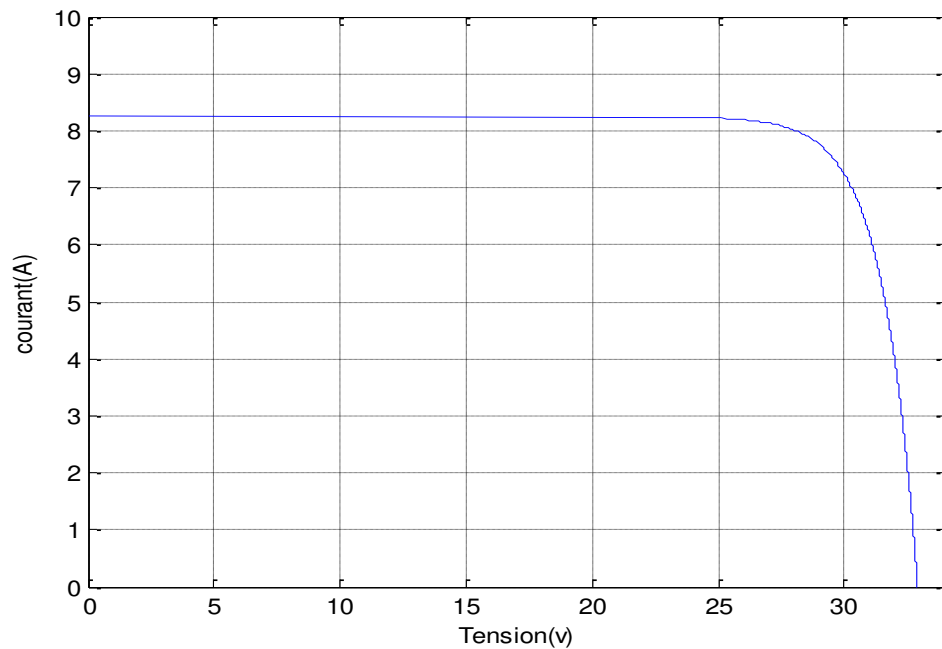


Figure II-5: Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire (L3P) T=25°C

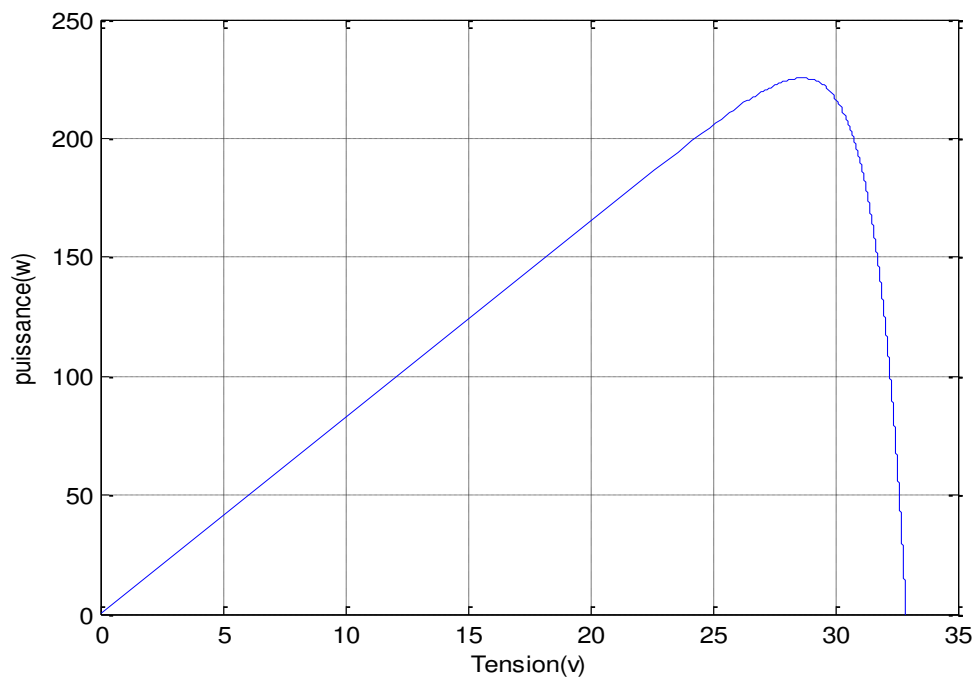


Figure II-6 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire (L3P) T=25°C.

II –2-2-2 Modèle à quatre paramètres (L4P)

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

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I(V) sont : le courant photonique I_L , la résistance série R_S , et deux caractéristiques de la diode I_0 et n , ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants [7].

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

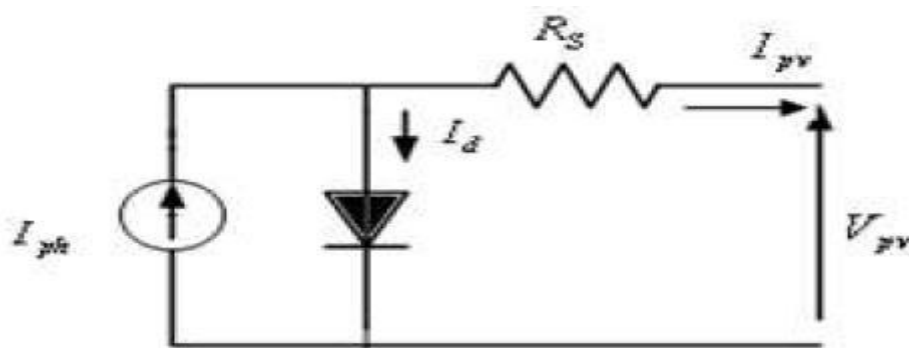


Figure II-7 : Schéma équivalent du modèle a une exponentielle(L4P)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{V_{t,a}}} - 1 \right) \tag{II-18}$$

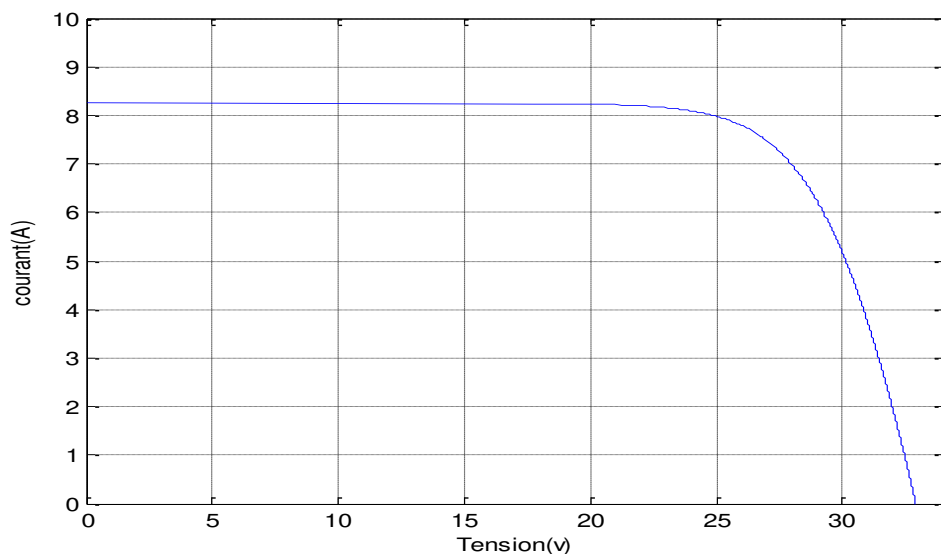


Figure II-8 : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire (L4P) T=25°C

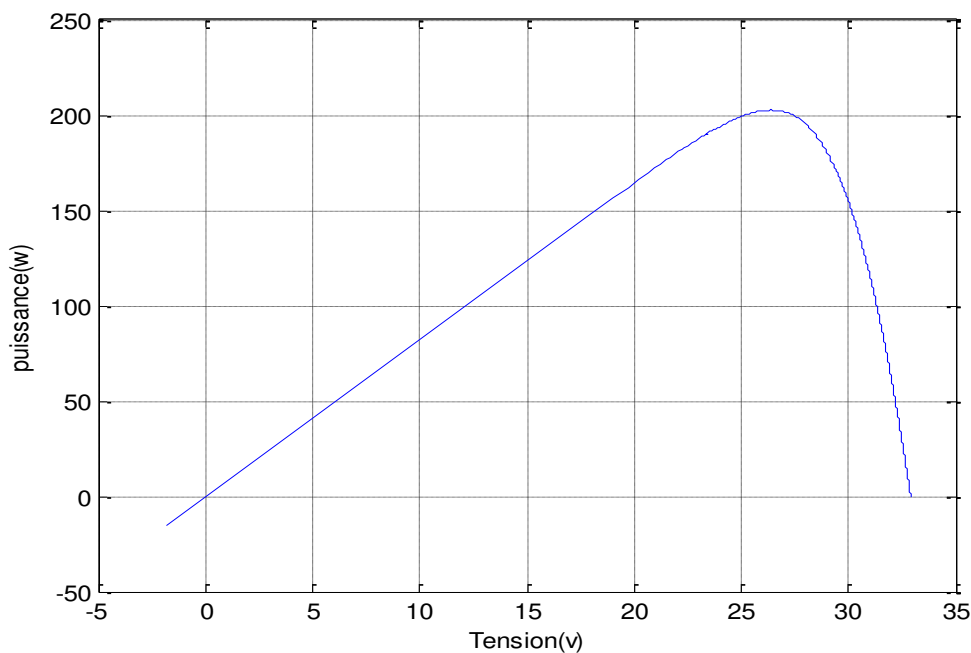


Figure II-9: Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire (L4P) T=25°C

II –2-2-3 Modèle à cinq paramètres (L5P)

Le comportement des cellules photovoltaïques peut être modélisé avec un circuit équivalent.

Ce circuit peut être utilisé pour une cellule individuelle, pour un module se composant de plusieurs cellules, ou pour un panneau se composant de plusieurs modules.

Comme il est montré dans la figure (II-10), le modèle à une seule exponentielle avec une résistance parallèle R_{sh} , l'équation (II-19) [13].

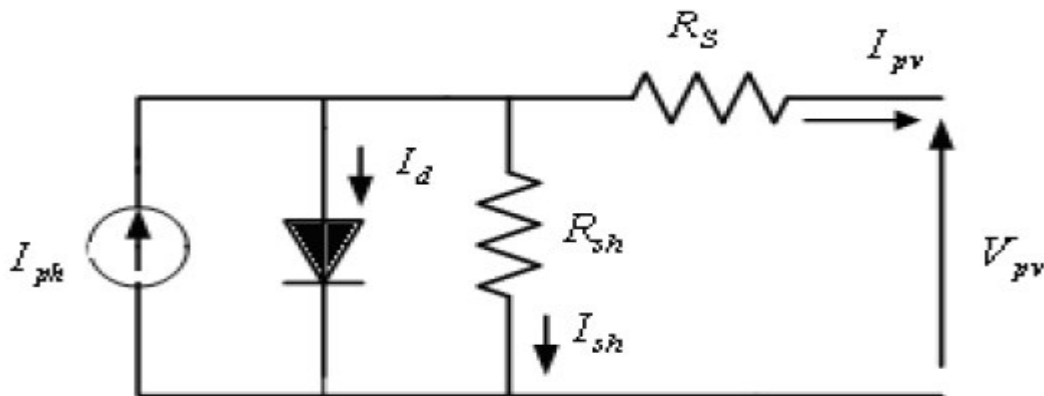


Figure II-10 : Schéma équivalent du modèle a une exponentielle(L5P)

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_S}{V_t \cdot a}} - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_S}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-19})$$

II-3 Caractéristique d'un module solaire

II-3 -1 Caractéristique courant-tension I(V)

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire type BP-SX150S d'un nombre de cellule ($N_s=54$) 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 (II-11). [15].

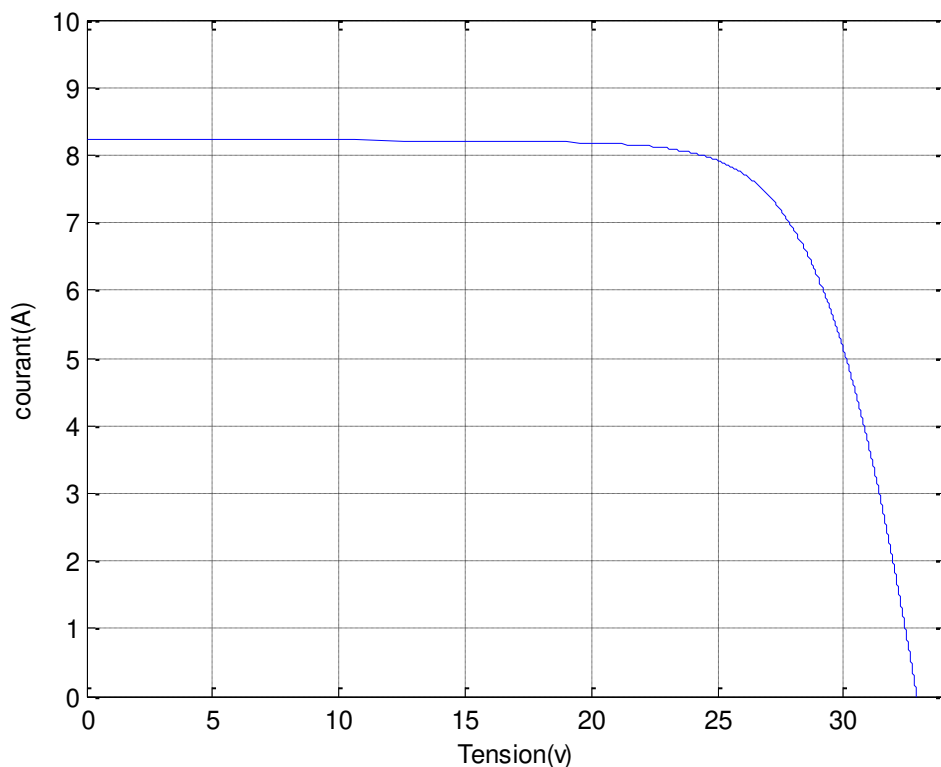


Figure II-11 : Caractéristiques I (V) d'un panneau solaire (L5P) T=25°C

II-3 -2 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 figure (II-12). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module. [15].

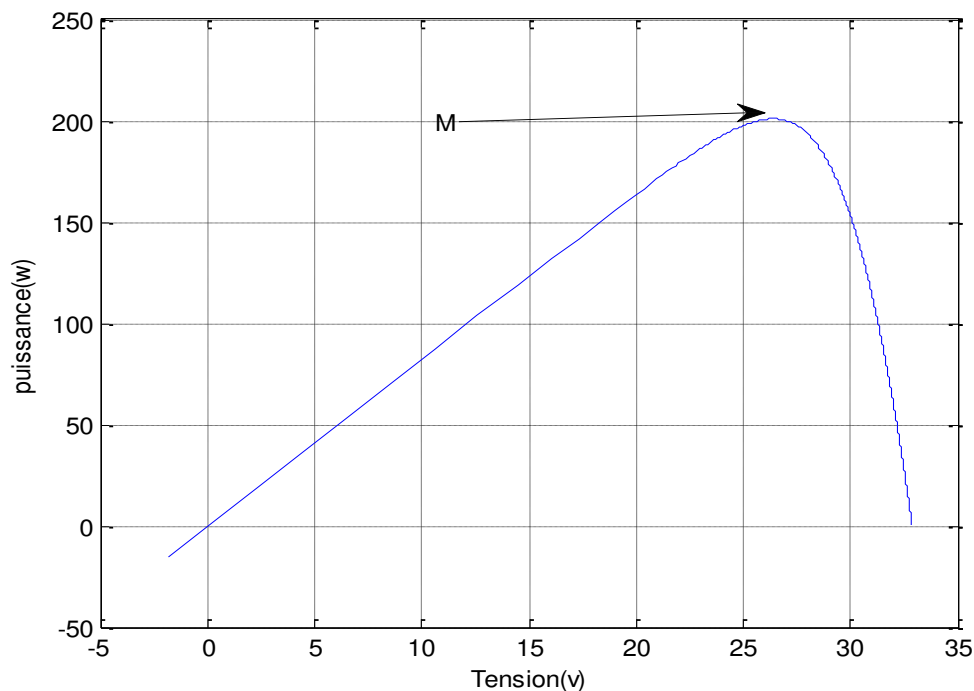


Figure II-12 : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire (L5P) T=25°C

II-4 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un Éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de Fonctionnement; seule la courbe $I \square V \square$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (II-13) représente trois zones essentielles :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension. [15] .

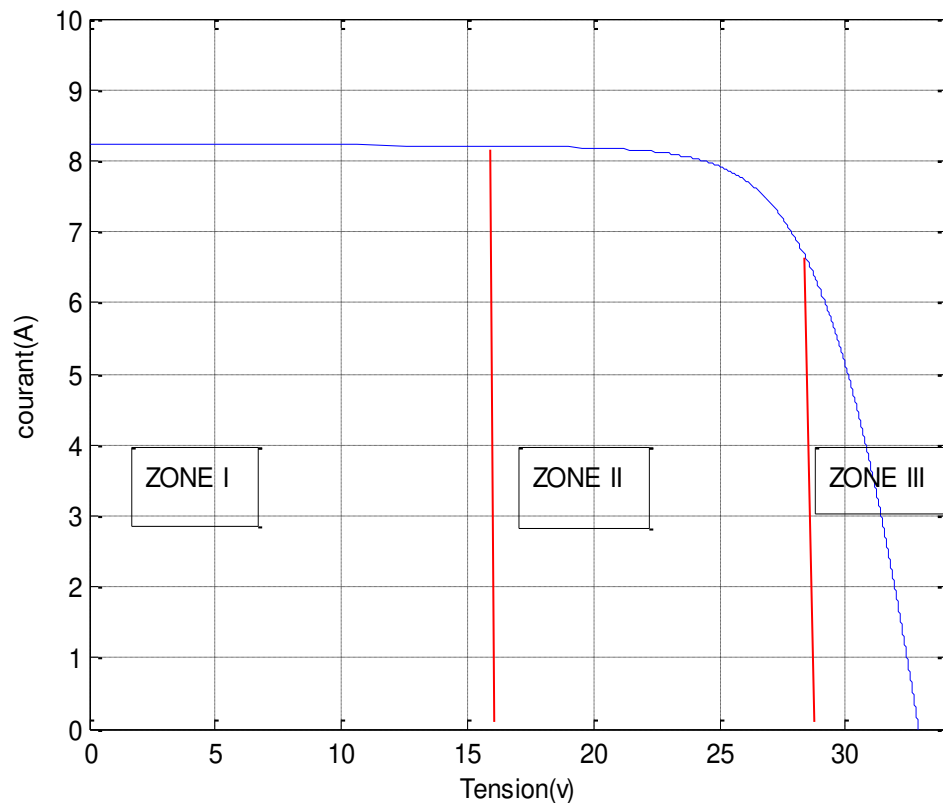


Figure II-13 : Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C[10].

II-5 Influence des différents paramètres

II-5-1 Influence de la Température

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 100C, la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) est donnée par les figures (II-14, II-15). On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte.[4].

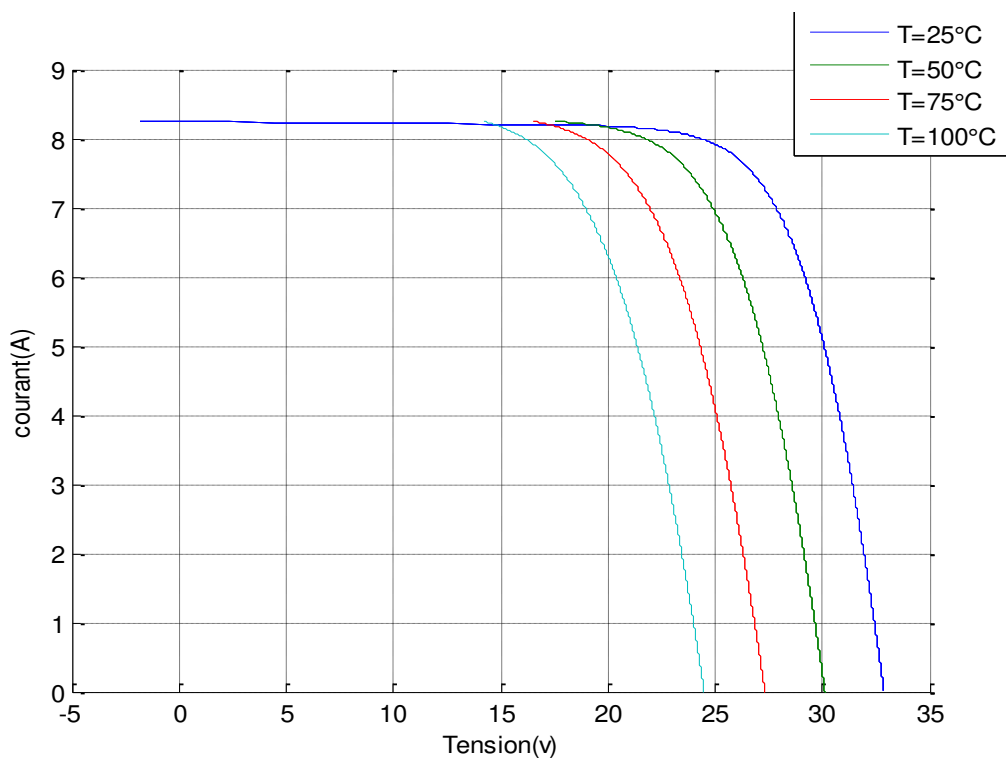


Figure II-14 : La caractéristique I(V) du module PV selon la température.

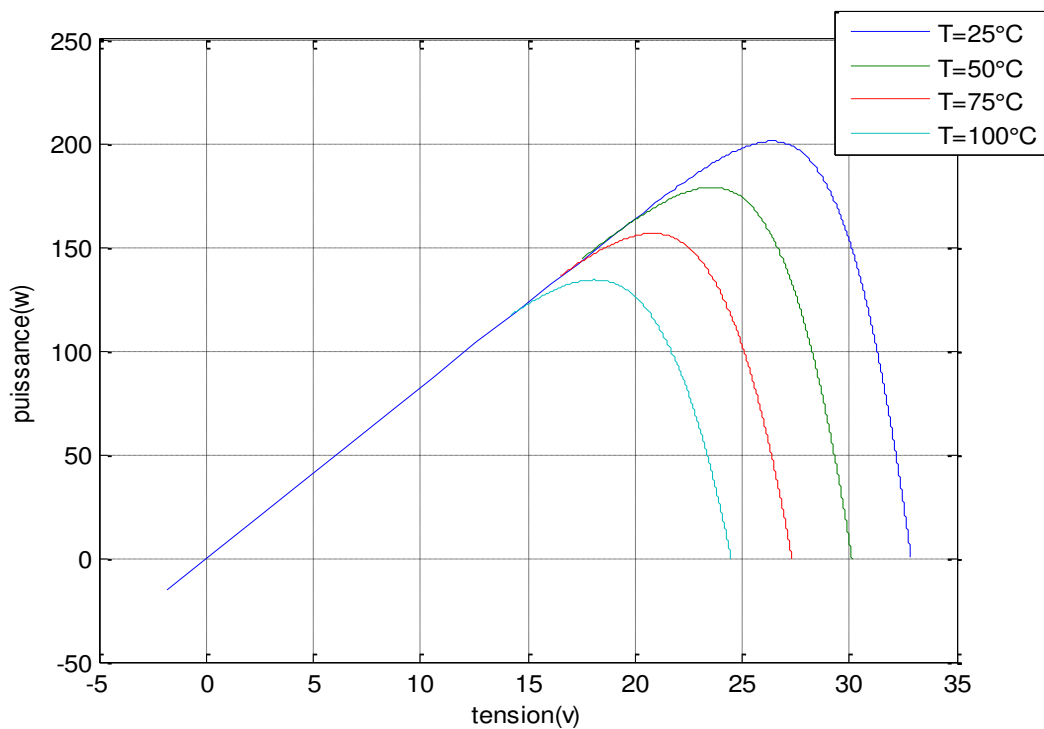


Figure II-15 : Caractéristique P-V du module PV selon la température.

II-5-2 Influence de la résistance série

La figure (II-16) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique I-V de la cellule qui se traduit par une diminution de la pente de la courbe de puissance P-V dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension constante.[4]

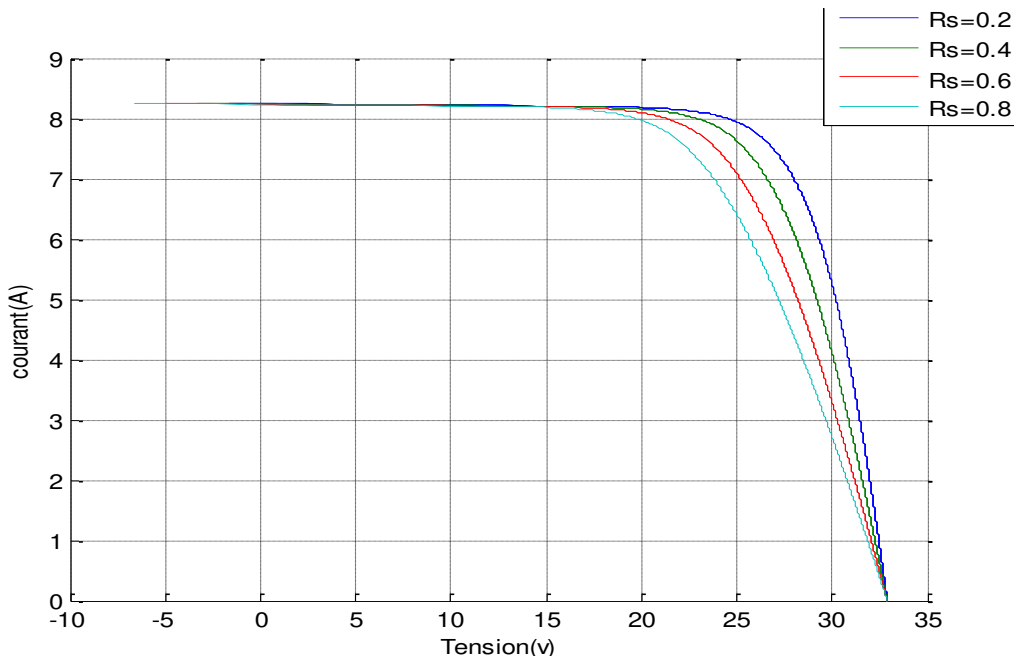


Figure II-16 Caractéristique I(V) de module PV selon la résistance série.

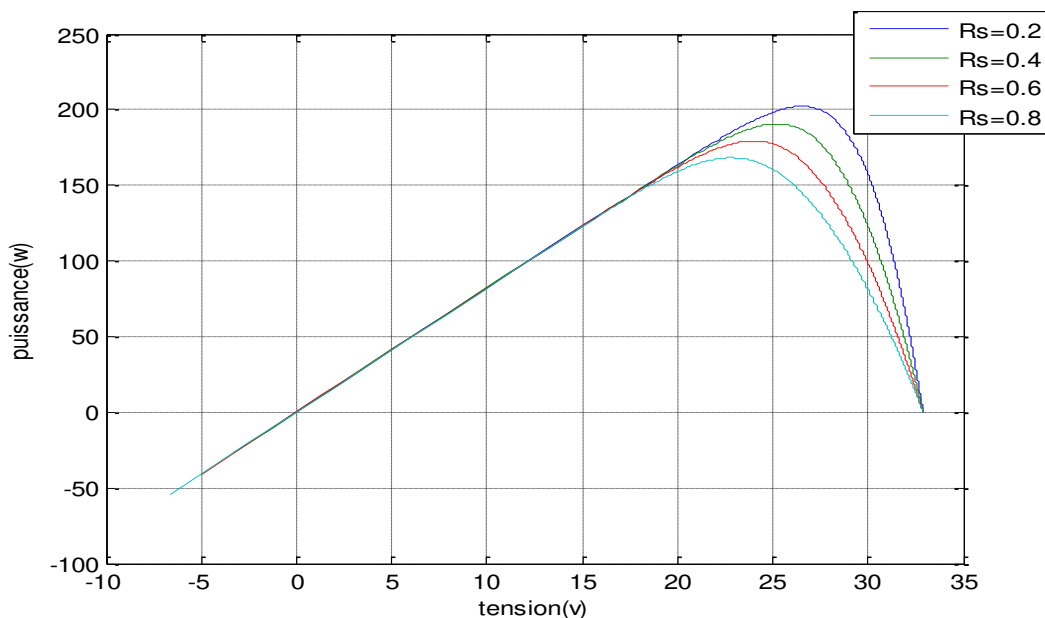


Figure II-17 : Caractéristique P(V) de module PV selon la résistance série.

II-5-3 Influence du facteur de qualité

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

Une valeur de 1,3 est suggérée comme valeur typique en fonctionnement normal et peut être utilisé au départ.

Jusqu' à une valeur plus précise et estimée plus tard par ajustement de courbe, l'effet de la variation du facteur d'idéalité peut être vu dans le modèle BP-SX150S dans S.T.C. figure (II-18). [17].

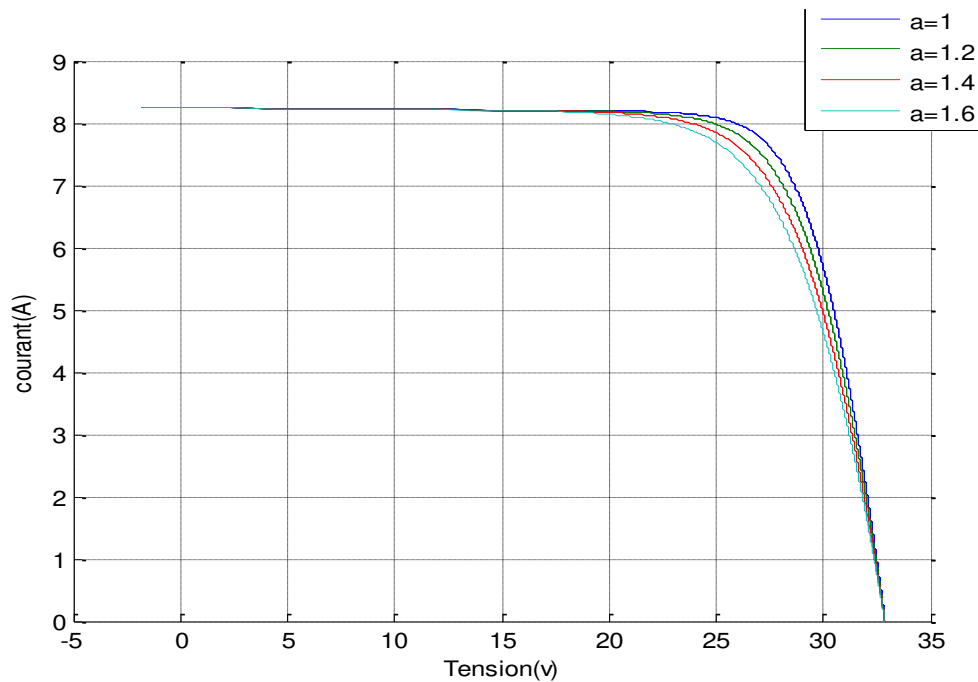


Figure II-18 : Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité.

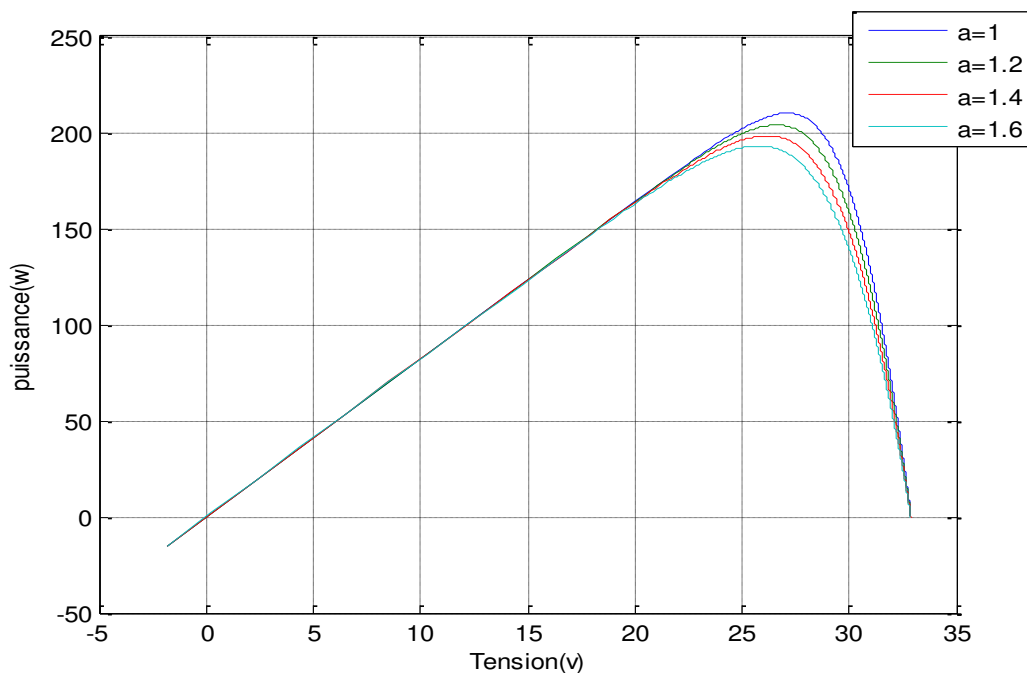


Figure II-19 Caractéristique I (V) d'un module pour divers facteurs de qualité.

II-6 Comparaison entre les différents modèles électriques

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations VI- à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou issues de la mesure directe sur le module. Dans ce cadre, nous allons ci-après étudier les méthodes d'identification des différents paramètres de la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.[23].

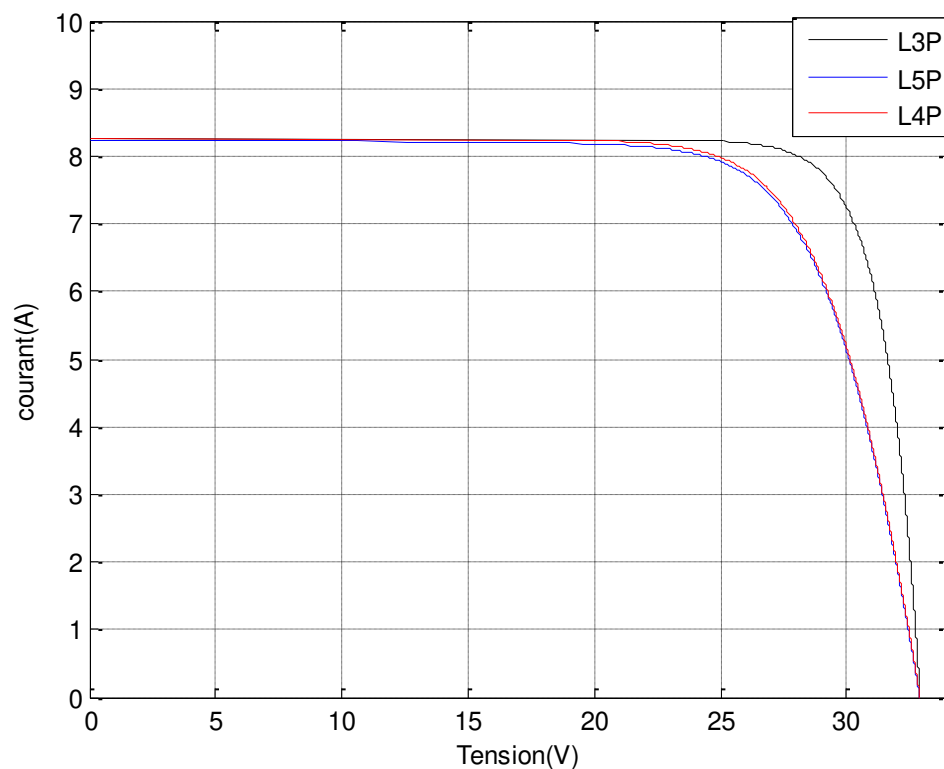


Figure II-20 : Caractéristiques I(V) pour les modèles à une exponentielle

II-7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'une centrale photovoltaïque. Influence des différents paramètres,

Les caractéristiques du générateur PV avec ses performances. Ensuite, nous avons cité les Zones de fonctionnement du module solaire.

CHAPITRE III

Identification des Paramètres de la cellule photovoltaïque

III -1 Introduction

Dans ce chapitre on va introduire une technique intelligente afin de l'utiliser pour l'identification des paramètres de la cellule photovoltaïque. Il s'agit principalement des algorithmes génétiques.

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser (ou minimiser) une fonction donnée. Les complexités relatives de l'espace de recherche et de la fonction à maximiser conduisent à utiliser des méthodes de résolution radicalement différentes. En première approximation, on peut dire qu'une méthode déterministe est adaptée à un espace de recherche petite et complexe et qu'un espace de recherche grand nécessite plutôt une méthode de recherche stochastique (algorithme génétique)

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur les techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle. [12].

III -2 Identification des systèmes

L'identification consiste à choisir la classe du modèle à adopter puis les valeurs des paramètres qui le caractérisent.

Les étapes de la procédure d'identification sont résumées comme suit :

- Détermination d'un protocole de test qui compte les propriétés statistiques des signaux d'entrée pour balayer toutes les fréquences intéressantes, le rapport signal/bruit doit être suffisamment important et le nombre de points de mesures doit être significatif pour le test (>1000).
- Choix de la structure du modèle ou du type de modèle.
- Identification paramétrique qui consiste à déterminer les paramètres du modèle choisi en minimisant les erreurs entre les sorties mesures et les sorties du modèle.
- Validation du modèle : Réalisation de plusieurs tests de vérification. Il est nécessaire

Pour cette étape d'utiliser des mesures différentes de celles utilisées lors de l'identification.

Ces choix doivent être modifiés, si la vérification donne de grande différence entre le système et le modèle, les causes peuvent être différentes, le modèle ne représente pas au mieux la physique du système, le critère n'est pas bien adapté à l'exigence

demandé, l'algorithme d'optimisation n'est pas performant à cause du temps de calcul ou des problèmes de convergence.[19].

Ces étapes sont schématisées dans la figure (III -1).

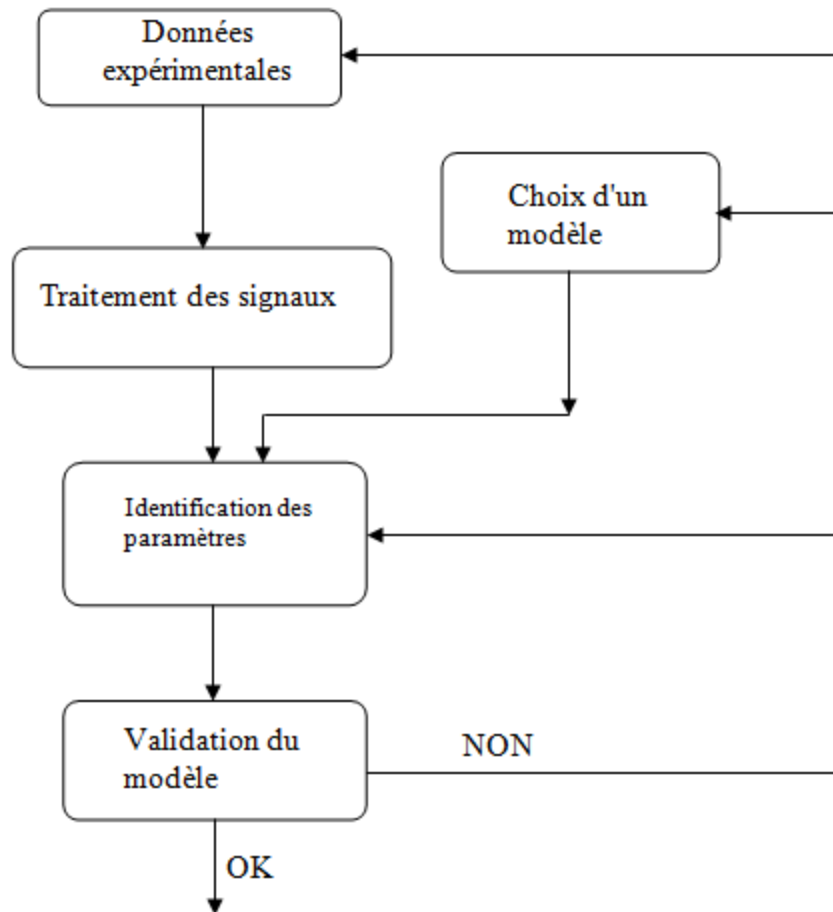


Figure III -1: Etapes de l'identification des systèmes [19]

Identifier un système consiste à obtenir ces caractéristiques à partir d'observations. Des réponses du système aux tests d'entrée, le monde de l'identification est très vaste. Nous retrouvons une multitude de techniques d'identifications classées en deux grandes familles.

- 1- L'identification non paramétrique.
- 2- L'identification paramétrique.[19].

Une procédure d'identification implique différents choix, notamment:

- Le type du modèle à utiliser.
- Le critère

- L'algorithme d'optimisation.
- Le type d'essai à effectuer.
- La vérification des résultats.[19].
-

III -3 L'algorithme d'optimisation

Différents types d'algorithme d'optimisation sont disponibles dans la littérature en

Fonction de la méthode de convergence désirée:

- Méthode du gradient.
- Méthode Newton.
- Gauss- Newton.
- Algorithmes génétiques...etc. [20].

III -4 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques tentent de simuler le processus d'évolution naturelle suivant le modèle darwinien dans un environnement donné. Ils utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique naturelle. Cependant, les processus naturels auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. On parlera ainsi d'individu dans une population. L'individu est représenté par un chromosome constitué de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. Les principes de sélection, de croisement, de mutation s'inspirent des processus naturels de même nom.

Pour un problème d'optimisation donné, un individu représente un point de l'espace D'états, une solution potentielle. On lui associe la valeur du critère à optimiser, son Adaptation. On génère ensuite de façon itérative des populations d'individus sur lesquelles on applique des processus de sélection, de croisement et de mutation. La Sélection a pour but de favoriser les meilleurs éléments de la population pour le critère considéré (les mieux adaptés), le croisement et la mutation assurent l'exploration de l'espace d'états.[18].

Le but est de résoudre un problème d'optimisation où nous cherchons une solution optimale en termes de paramètres. Dans le cas de la caractéristique (I-V), le problème est de retrouver les valeurs optimales de R_s , R_{sh} et a qui minimisent l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs théoriques et celles de la caractéristique (I-V) simulée.[21].

$$\chi = \sum_{i=1}^m [I_i^{\text{exp}} - I(V_i, \theta)]^2$$

Avec $\theta = [R_s, R_{sh}, a]$ et $\text{Exp } i$ le courant expérimentale correspondant à la tension V_i .

L'organigramme à la figure 3 fournit une vue d'ensemble d'un algorithme génétique continu.

Nous commençons le processus de l'ajustage de précision par l'algorithme génétique en définissant un chromosome comme un choix de valeurs de paramètres à optimiser. Le chromosome est défini par le vecteur de paramètres donnés par $[R_s, R_{sh}, a]$.

$\text{Chromosome} = [R_s, R_{sh}, a]$.

Pour commencer l'algorithme génétique, nous définissons une population initiale des chromosomes appelée **IPOP** définie par la matrice donnée par l'équation

$$\text{IPOP} = (h_i - l_o) \cdot \text{random}[N_{\text{ipop}}, N_{\text{par}}] + l_o$$

Où :

N_{ipop} : Nombre des chromosomes à la population Initiale

N_{par} : Nombre des paramètres à estimer.

$\text{random}[N_{\text{ipop}}, N_{\text{par}}]$: une fonction qui produit une matrice

$N_{\text{ipop}} \times N_{\text{par}}$ à partir de nombres aléatoires uniformes entre zéro et un.

h_i : la valeur la plus grande de chacun des paramètres.

l_o : la valeur la plus petite de chacun des paramètres.[21].

III-4-1. Codage réel

La représentation réelle élimine toutes les opérations de conversion des solutions, qui se répètent un grand nombre de fois à chaque génération et qui sont très coûteuse en temps machine. Mais cette représentation peut rendre les algorithmes génétiques plus dépendant des problèmes [12].

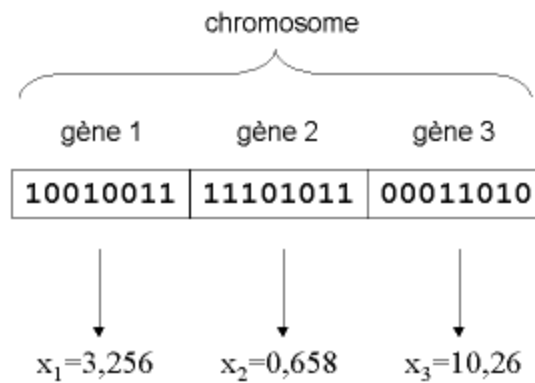


Figure III-2 : illustration schématique du codage des variables réelles.[24].

III -4 -2 La sélection

La sélection choisit et détermine quels membres d'une population peuvent survivre et peuvent se reproduire. Cette sélection est déterminée en fonction des valeurs de la fonction f à optimiser (dite aussi fonction coût). Intuitivement cette fonction peut être envisagée comme une mesure de profit, d'utilité ou encore de qualité, que l'on souhaite minimiser. Sélectionner des chromosomes en fonction des valeurs de leur fonction coût revient à donner aux individus dont la valeur est plus petite une probabilité plus élevée de produire un ou plusieurs descendants dans la prochaine génération et de contribuer ainsi à l'évolution de la solution.[21].

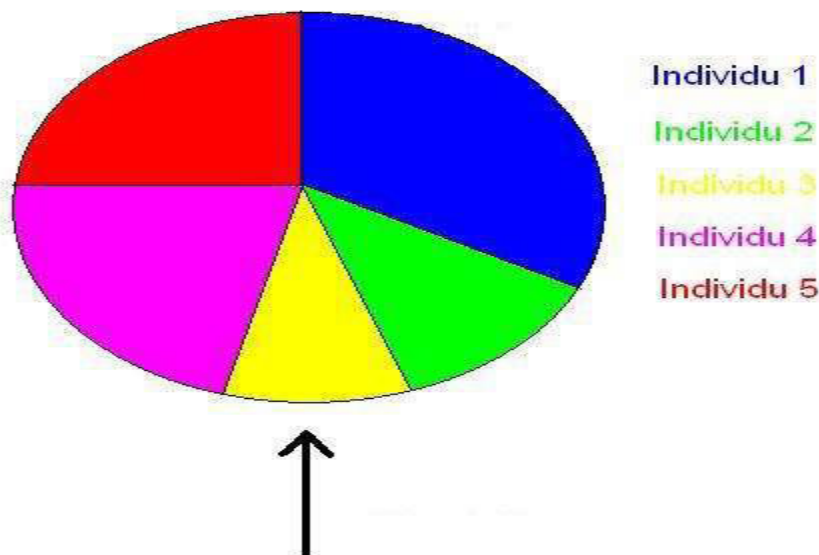


Figure III-3 : La roulette[24].

III -4 -3 Le croisement

Le croisement est un opérateur qui assure le brassage et la recombinaison des gènes parentaux pour former des descendants aux potentialités nouvelles, il correspond à un échange des matériels génétiques entre deux reproducteurs (parents) choisis d'une manière aléatoire parmi les géniteurs sélectionnés précédemment pour former deux nouveaux chromosomes (ou enfants). L'opérateur de croisement étant aléatoire .plusieurs stratégies de croisement sont utilise dans ce travaille :[21].[12]

III -4 -3 -1Croisement a un point simple

Dans ce type, un seul site de croisement est choisi .chaque enfant alors, se construit par des l'une des deux sous chaines terminales de chacun des deux chromosomes. [12].

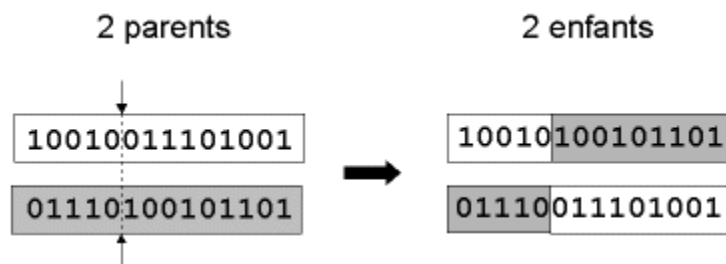


Figure III-4 : Exemple de croisement a un point simple[24].

III -4 -4 La mutation

Nous avons implémenté trois operateurs de mutations différents. Le principe est le même pour chacun d'eux, seul l'ensemble des valeurs que peuvent prendre les gènes mutés varie.

Lorsque la mutation a lieu, comme pour le croisement, deux gènes sont tirés aléatoirement pour délimiter la zone de mutation. La taille de cette zone est un pourcentage de la taille de l'image.[22].

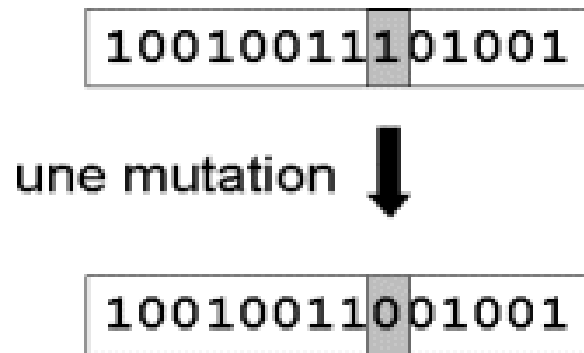


Figure III-5 : une mutation

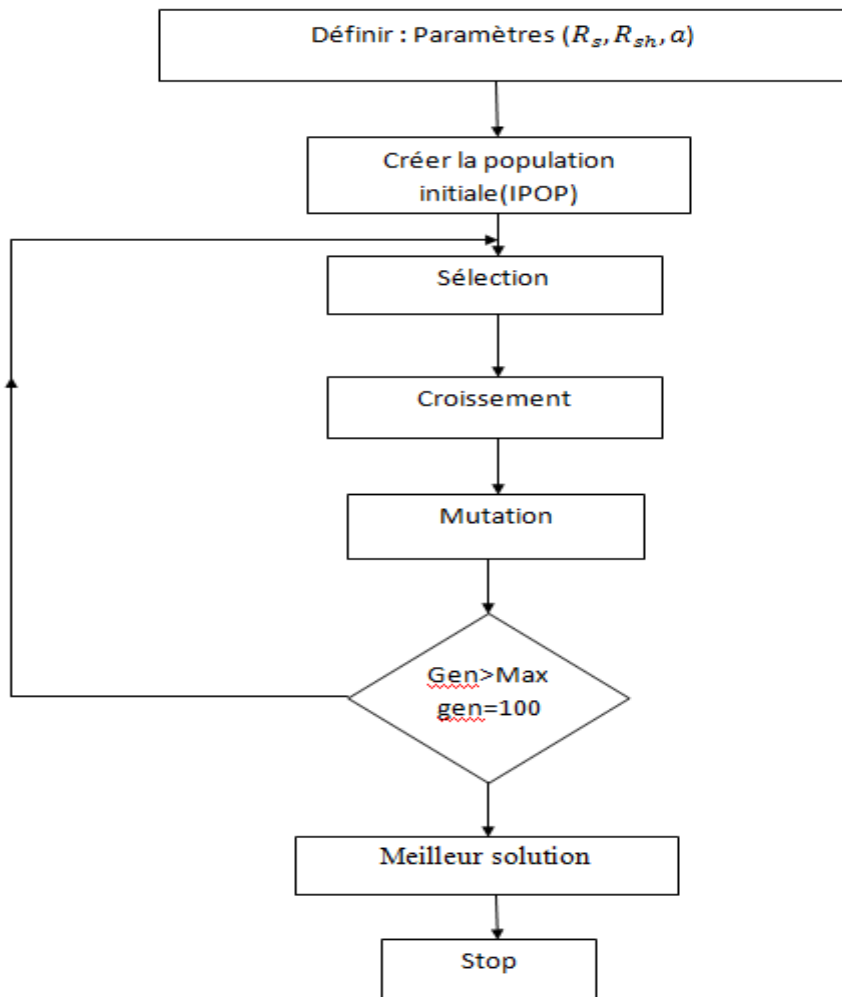


Figure III -6 : schéma générale d'un algorithme génétique.[12].

III-5 Identification des paramètres « R_s, R_{sh}, a »

Dans notre étude, on va optimiser les paramètres réels du système pour monter l'efficacité du AG proposé.

La figure (III -7) présente l'évolution de la meilleure valeur de la fonction objectif au cours des générations pour les paramètres « R_s, R_{sh}, a ». On remarque que l'AG a convergé vers le voisinage de meilleures valeurs rapidement (environ la 55^{ème} générations).

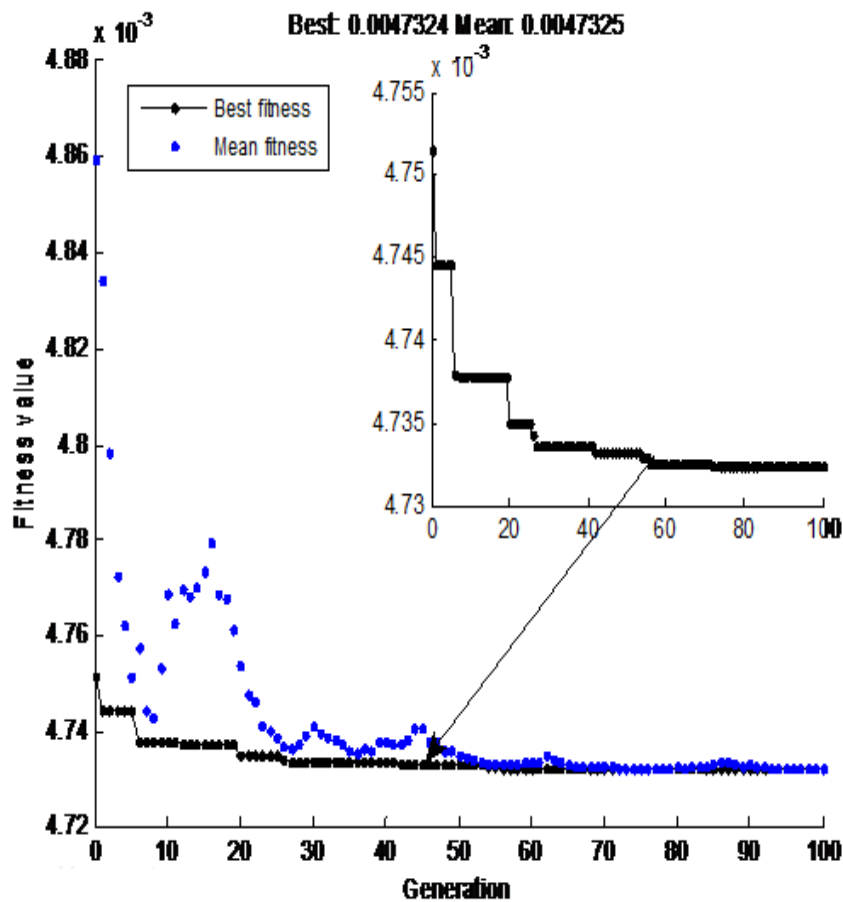


Figure III -7: L'évolution de la meilleure valeur de fonction objective au cours des générations.

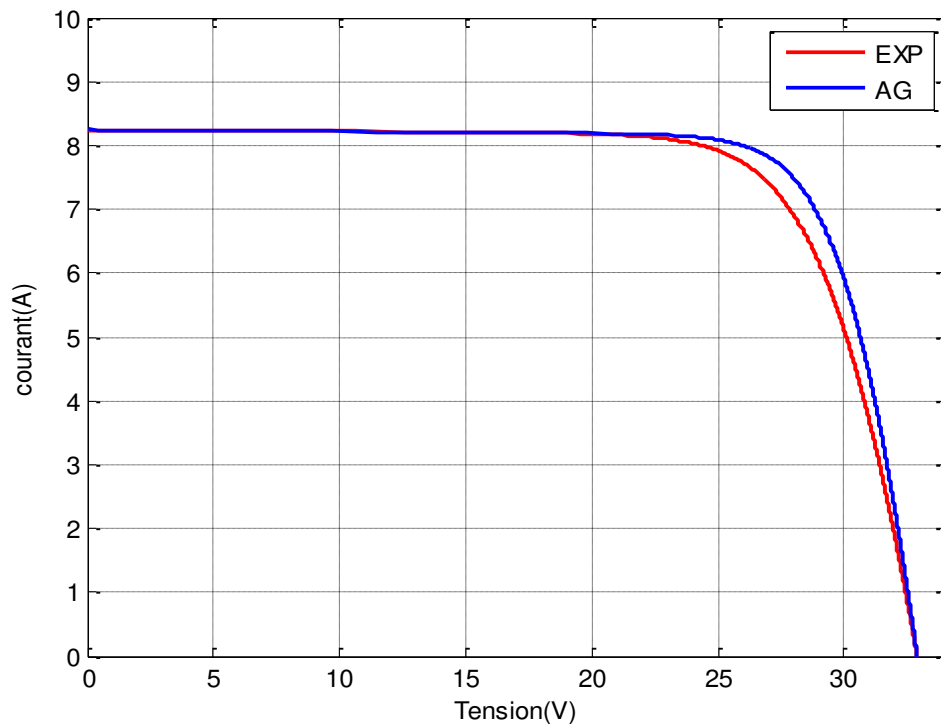


Figure III-8: Ajustement théorie expérience de la caractéristique (I-V) obtenu à la dernière génération

III-6 Résultat

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des paramètres trouvées après traitement Numérique de la caractéristique courant-tension (I-V) d'un panneau sous éclairage. Cette course de l'algorithme a trouvé un minimum après 55 générations.

On remarque que d'une génération à la suivante la diminution de la moyenne « meancost » des coûts et que l'algorithme développé converge rapidement et il a trouvé des résultats théoriques satisfaisants proches de la réalité. Ainsi on va passer maintenant à la détermination des coordonnées du point de fonctionnement optimal en exploitons les valeurs des paramètres trouvées par l'algorithme.

| Paramètres | théorique | Algorithme Génétique |
|------------------|----------------|----------------------|
| $R_s(\Omega)$ | 0.221 | 0.1768 |
| $R_{sh}(\Omega)$ | 415.405 | 370.4498 |
| A | 1.3 | 1.0400 |

Tableau III-1: Valeurs de R_s , R_{sh} et a obtenus par la méthode d'AG.

III-7 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons présenté une étude non exhaustive sur l'identification en introduisant les notions de système, étapes d'identification, nous avons utilisé l'algorithme génétique pour identifier les paramètres de la cellule photovoltaïque « R_s, R_{sh}, a ».

Conclusion Général

Dans ce mémoire:

- Nous avons présenté les différents modèles de la cellule photovoltaïque toute en effectuant une simulation sous environnement Matlab des caractéristiques électriques des modèles suivants :
 - Modèles à deux diodes :
 - Modèle à sept paramètres
 - Modèle à six paramètres
 - Modèle à cinq paramètres
 - Modèles à une diode :
 - Modèle à trois paramètres
 - Modèle à quatre paramètres
 - Modèle à cinq paramètres
- Nous avons présenté aussi par simulation l'influence des paramètres pour différentes valeurs sur les caractéristiques électriques courant tension I-V et puissance tension P-V de la cellule photovoltaïque.
- Afin de d'identifier les paramètres de la cellule photovoltaïque « R_s, R_{sh}, a », nous avons utilisé une technique intelligente : L'algorithme génétique. La technique basée sur l'approche algorithmique est une voie très prometteuse dans la détermination des paramètres électrique des cellules solaires à partir des mesures expérimentaux de leurs caractéristiques I(V). L'algorithme développé a convergé vers le minimum globale de l'erreur quadratique (fonction du cout) après 55 générations. Les résultats obtenus nous semblent très satisfaisant.