

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

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines Électriques

Présenté par

DJOUAMA Souheil

&

KHOUIDMI Mohamed

Application de méthode d'optimisation d'ordre zéro à l'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque

Proposé par : Mme BOUDISSA E. & Mr BOUNEKHLA M.

Année Universitaire 2019-2020

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier éternellement Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener a terme ce modeste travail.

Nous remercions très sincèrement notre promotrice, Mme Boudissa El Ghalia pour ses conseils pertinents, ses orientations judicieuses, sa patience et diligence. Ses suggestions et remarques ont énormément facilité ce travail.

Nous remercions aussi Mr. Bounekhla Mohamed qui a contribué à l'amélioration du manuscrit, on tient à lui exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury qui ont bien voulu examiner notre travail.

Nous remercions vivement tous les enseignants et tous ceux qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

KHOUIDMI Mohamed

DJOUAMA Souheil

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Ma chère femme

Mes chères fils Khalil, Yacine et Salah eddine

Mon collègue Souheil

Tous mes amis

KHOUIDMI Mohamed

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Ma chère femme

Mes chères filles Maroua et Maram

Mon collègue Mohamed

Tous mes amis

DJOUAMA Souheil

Listes des acronymes et abréviations

AM : Air masse

PV : Photovoltaïque

CPV: Cellule photovoltaïque

ddp : Différence de potentiel

c-Si : Silicium cristallin

a-Si : Silicium amorphe

m-Si : Silicium monocristallin

p-Si : Silicium polycristallin

SUP : Silicium ultra pur

SC : Semi conducteur

$E_{\text{électrique}}$: Energie disponible aux bornes d'une cellule

$E_{\text{lumineuse}}$: Energie incidente

RS : Réponse spectrale

h: Constante de Planck

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

λ : Longueur d'onde

c: Célérité de la lumière

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

I_s : Courant de saturation [A]

I_d : Courant de polarisation de la diode [A]

V : Tension au borne de la cellule [V]

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

T : Température ambiante [K]

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

A : Facteur d'idéalité

R_s : Résistance série [Ω]

R_{sh} : Résistance shunt [Ω]

G_{sh} : Conductance shunt [Ω^{-1}]

I_{cc} : Courant de court circuit [A]

V_{oc} : Tension de circuit ouvert [V]

P_{max} : Puissance maximale [W]

P : Puissance électrique [W]

I_m (I_{max}) : Intensité de courant à puissance maximale [A]

V_m (V_{max}) : Tension à puissance maximale [V]

FF : Facteur de forme

V_t : potentielle thermodynamique

N_s : Nombre de cellule en série

N_p : Nombre de cellule en parallèle

G : Ensoleillement (w/m^2)

η : Rendement

STC: ("Standard Test Conditions", 1000 W/m², 25 °C, specter AM1.5)

Les autres symboles utilisés sont définis dans le texte.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.....	04
Figure I.2 : Représentation des spectres solaires AM0 et AM1	05
Figure I.3 : Composants du rayonnement solaire	06
Figure I.4 : Fonctionnement d'une cellule PV	08
Figure I.5 : Lingot de silicium	10
Figure I.6 : La jonction PN	10
Figure I.7 : Dopage de type N	11
Figure I.8 : Dopage de type P	11
Figure I.9 : Structure d'une cellule photovoltaïque.	12
Figure I.10 : Photos d'une cellule monocristalline.....	13
Figure I.11 : Photo de cellule poly cristallin... ..	13
Figure I.12 : Photo d'une cellule amorphe.....	14

Chapitre II

Figure II.1 : Sous module constitué de N_s cellules connectées en séries.	21
Figure II.2 : Module constitué de sous modules montés en séries	22
Figure II.3 : Champ photovoltaïque composé de strings en parallèle.....	22
Figure II.4 : Association en série de N_s cellules solaires.	23
Figure II.5 : Association en parallèle de N_p cellules solaires identique	24
Figure II.6 : Caractéristique I(V) d'une connexion mixte... ..	25
Figure II.7 : Modèle idéal d'une cellule PV.....	25
Figure II.8 : Modèle simplifié d'une cellule PV.....	27
Figure II.9 : Modèle à une diode d'une cellule PV	28
Figure II.10 : Modèle à deux diodes d'une cellule PV	29
Figure II.11 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque	30
Figure II.12 : Influence de l'ensoleillement à température constante sur la courbe I-V.....	33
Figure II.13 : Influence de la température à l'ensoleillement constante sur la courbe I-V.....	33
Figure II.14 a: Influence de la résistance série	34
Figure II.14 b: Influence de la résistance parallèle.....	35

Chapitre III

Figure III.1 : Circuit équivalent au modèle à trois paramètres.....	36
Figure III.2 : Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres	37
Figure III.3 : Circuit équivalent au modèle à cinq paramètres	37
Figure III.4 : Circuit équivalent au modèle à six paramètres.....	38
Figure III.5 : Circuit équivalent au modèle à sept paramètres	38
Figure III.6 : Les points utilisés pour définir le système d'équations	42
Figure III.7 : Principe d'identification	44
Figure III.8 : Illustration de la méthode de relaxation cyclique à deux dimensions.....	46
Figure III.9 : Organigramme de la méthode de relaxation cyclique	47
Figure III.10 : Caractéristique I(V) expérimentale à 25°C.....	48
Figure III.11 : Caractéristique P(V) expérimentale à 25°C.....	48
Figure III.12 : Caractéristique I(V) estimés à 25°C.....	49
Figure III.13 : Caractéristique P(V) estimés à 25°C.....	49
Figure III.14 : Caractéristique I(V) expérimentales et estimés à 25°C.....	50
Figure III.15 : Caractéristique P(V) expérimentales et estimés à 25°C.....	50
Figure III.16 : L'erreur entre les valeurs expérimentales et estimés à 25°C.....	51
Figure III.17 : Caractéristique I(V) expérimentale à 50°C.....	51
Figure III.18 : Caractéristique P(V) expérimentale à 50°C.....	52
Figure III.19 : Caractéristique I(V) estimés à 50°C.....	52
Figure III.20 : Caractéristique P(V) estimés à 50°C.....	53
Figure III.21 : Caractéristique I(V) expérimentales et estimés à 50°C.....	53
Figure III.22 : Caractéristique P(V) expérimentales et estimés à 50°C.....	54
Figure III.23 : L'erreur entre les valeurs expérimentales et estimés à 50°C.....	54
Figure III.24 : Caractéristique I(V) expérimentale à 75°C.....	55
Figure III.25 : Caractéristique P(V) expérimentale à 75°C.....	55
Figure III.26 : Caractéristique I(V) estimés à 75°C.....	56
Figure III.27 : Caractéristique P(V) estimés à 75°C.....	56
Figure III.28 : Caractéristique I(V) expérimentales et estimés à 75°C.....	57
Figure III.29 : Caractéristique P(V) expérimentales et estimés à 75°C.....	57
Figure III.30 : L'erreur entre les valeurs expérimentales et estimés à 75°C.....	58

LISTE DES TABLEUX

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques typiques du panneau PV	47
Tableau III.2 : Résultats des paramètres identifiés à 25°C.....	49
Tableau III.3: Résultats des paramètres identifiés à 50°C.....	52
Tableau III.4 : Résultats des paramètres identifiés à 75°C.....	56

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

CHAPITRE I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1	Introduction.....	03
I.2	Définition et historique du photovoltaïque.....	03
I.3	Notions sur la nature du rayonnement solaire	04
I.4	Différents types de rayonnement solaire.....	06
I.4.1	Rayonnement direct.....	06
I.4.2	Rayonnement diffus.....	07
I.4.3	L'albédo ou réfléchi.....	07
I.4.4	Rayonnement global.....	07
I.5	Semi conducteur.....	07
I.6	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	07
I.7	La fabrication des cellules photovoltaïques.....	08
I.7.1	La silice.....	08
I.7.2	Extraction et purification du silicium.....	09
I.7.3	Obtention des lingots de silicium.....	09
I.7.4	Dopage du silicium.....	10
I.8	Structure d'une cellule PV.....	11
I.9	Type et rendement des cellules photovoltaïques.....	13
I.9.1	Silicium mono-cristallin.....	13
I.9.2	Silicium poly-cristallin.....	13
I.9.3	Silicium amorphe (a-si).....	14
I.9.4	Cellule tendem.....	14
I.9.5	Cellule multi-jonction.....	15
I.9.6	La cellule photovoltaïque CIGS.....	15
I.9.7	La cellule en couche mince de tellure de cadmium.....	15
I.9.8	Les cellules photovoltaïques de demain.....	15
a.	La cellule CZTS.....	15
b.	Les cellules solaires organiques.....	16
I.10	Secteurs d'application du photovoltaïque.....	16
I.10.1	Les systèmes isolés.....	16
I.10.2	Les systèmes connectés au réseau électrique.....	17
I.11	Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	18
I.11.1	Les avantages.....	18
I.11.2	Les inconvénients.....	19
I.12	Avenir du photovoltaïque.....	19
I.13	Conclusion.....	20

CHAPITRE II : Modélisation de panneaux photovoltaïques

II.1	Introduction.....	21
II.2	Structure des cellules photovoltaïques.....	21
II.2.1	Une série de cellules photovoltaïques.....	21
II.2.2	Module photovoltaïque.....	22
II.2.3	Panneau et champ photovoltaïque.....	22
II.3	Association des cellules solaire.....	23
II.3.1	Association en série.....	23

Sommaire

II.3.2	Association en parallèle.....	23
II.3.3	Association en mixte.....	24
II.4	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	25
II.4.1	Modèle idéal.....	25
II.4.2	Modèle simplifié (avec pertes Ohmiques).....	26
II.4.3	Modèle à une diode.....	27
II.4.4	Modèle à deux diodes.....	29
II.5	Les caractéristiques électriques d'une cellule solaire.....	30
II.5.1	La caractéristique courant-tension.....	30
II.5.2	Paramètres caractéristiques.....	30
a.	Courant de court circuit I_{CC}	30
b.	Tension en circuit ouvert V_{oc}	31
c.	La puissance caractéristique d'une cellule PV.....	31
d.	Puissance maximale P_{max}	31
e.	Le facteur de forme FF.....	31
f.	Le rendement de conversion, η	32
II.6	Influence des paramètres externes sur la caractéristique $I(V)$	32
II.6.1	Influence de l'ensoleillement.....	32
II.6.2	Influence de la température.....	33
II.6.3	Influence des résistances série et parallèle.....	34
II.7	Conclusion.....	35

CHAPITRE III : Identification et optimisation des paramètres PV

III.1	Introduction.....	36
III.2	Modèle d'extraction des paramètres d'un panneau photovoltaïque.....	36
III.2.1	Modèle à une seule diode (simple exponentielle).....	36
a.	Modèle d'extraction à trois paramètres (modèle idéal).....	36
b.	Modèle d'extraction à quatre paramètres.....	37
c.	Modèle d'extraction à cinq paramètres.....	37
III.2.2	Modèle à deux diodes (double exponentielles).....	38
a.	Modèle d'extraction à six paramètres.....	38
b.	Modèle d'extraction à sept paramètres.....	38
III.3	Méthodes d'identification des paramètres de la cellule solaire.....	39
III.3.1	Méthode analytique.....	39
III.3.2	Méthode des cinq points.....	41
III.3.3	Méthode du modèle de référence.....	43
III.4	Techniques d'optimisation.....	45
III.4.1	Méthodes d'optimisation d'ordre 1 et 2.....	45
III.4.2	Méthodes d'optimisation d'ordre zéro.....	46
a.	Relaxation cyclique.....	46
III.5	Résultats des données expérimentales	47
III.5.1	Discussion des résultats.....	58
III.6	Conclusion.....	59
	Conclusion générale.....	60
	Bibliographie.....	61

Résumé

ملخص: الهدف من هذا العمل هو استخراج الوسائط المميزة للوحة الكهروضوئية، تحت إضاءة ثابتة ودرجات حرارة مختلفة. استخدمنا النموذج الآسي الفردي المتضمن: مولد التيار، صمام ثنائي التوصيل، مقاومة على التسلسل و مقاومة على التفرع، لاستخراج الوسائط المميزة للوحة الكهروضوئية تم استخدام طريقة النموذج المرجعي بإدماج طريقة من الدرجة صفر تسمى الاسترخاء الدوري. تم تطوير هذا الأخيرة لتقليل العلاقة المحددة بواسطة الخطأ التربيعي بين التيار المقاس و تلك المحسوبة بواسطة طريقة نيوتن رافسن من النموذج المعتمد للوحة الكهروضوئية. تم التحقق من صحة النتائج المتحصل عليها باستخدام البيانات التجريبية المسجلة لثلاث درجات حرارة مختلفة (25 درجة مئوية، 50 درجة مئوية، 75 درجة مئوية) وذلك من خلال التطابق الجيد للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد للوحة الكهروضوئية.

الكلمات المفتاح: استخراج، اللوحة الكهروضوئية، طريقة من الدرجة صفر، الاسترخاء الدوري.

Abstract:The aim of this work is to identify the characteristic parameters of a photovoltaic panel (PV), under constant illumination and different temperatures. We used the single exponential model which includes: a current generator, a junction diode, a series resistor and a parallel resistor. The identification approach is determined by the Reference Model method using a zero-order method called cyclic relaxation. The latter is developed for the minimization of the objective function defined by the squared error between the measured current and that calculated by the Newton-Raphson method from the adopted model of the PV. The validation of the results obtained using experimental data recorded at three different temperatures (25° C, 50° C and 75° C) is confirmed by the correct superposition of the measured currents and those calculated by the adopted model of the PV.

Keywords: Identification; solar panel; zero-order method; cyclical relaxation.

Résumé: Le but de ce travail est d'identifier les paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque (PV) sous une illumination constante et différentes températures. On a utilisé le modèle à une seule exponentielle qui comporte : un générateur de courant, une diode de jonction, une résistance série et une résistance parallèle. L'approche d'identification est déterminée par la méthode du modèle de référence à l'aide d'une méthode d'ordre zéro nommée relaxation cyclique. Cette dernière est développée pour la minimisation de la fonction objectif définie par l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui calculé par la méthode de Newton-Raphson à partir du modèle adopté du PV. La validation des résultats obtenus à l'aide de données expérimentales relevées sur trois températures différentes (25°C, 50°C et 75°C), est confirmée par la bonne superposition des courants mesurés et ceux calculés par le modèle adopté du PV.

Mots clés : Identification; panneau photovoltaïque; méthode d'ordre zéro; relaxation cyclique.

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de chercher de nouvelles solutions pour fournir et développer, et même de rationaliser l'exploitation des énergies.

L'énergie électrique est la source la plus utilisée dans les différents domaines, dans les plus grandes usines aux plus petits appareils électroniques domestiques. Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées. On trouve notamment les générateurs, basés sur l'énergie fossile, particulièrement le pétrole, ou bien utilisant l'énergie nucléaire. Ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, ceci à orienter les recherches vers un autre type d'énergie propre et écologique : les énergies renouvelables.

Cependant, il existe plusieurs façons d'utiliser ces énergies pour produire de l'électricité. Nous nous intéressons dans ce mémoire, au principe du photovoltaïque dont on cite les principaux avantages : non polluant, souple et fiable. La première cellule photovoltaïque a été réalisée en 1954, à base du silicium. Aujourd'hui, il reste encore le matériau le plus couramment utilisé.

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable, car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil. Elle constitue donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres : elle est inépuisable, elle peut être produite localement et selon les besoins locaux. Elle préserve l'environnement car elle n'émet pas de gaz à effet de serre. Elle ne produit pas de déchets et n'entraîne aucun risque majeur et aucune nuisance significative. Cette énergie est produite par l'intermédiaire d'un dispositif appelé « cellule photovoltaïque ou photopile » qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique.

Les cellules solaires photovoltaïques fournissent l'énergie d'alimentation la plus importante et de longue durée pour des satellites et des véhicules spatiaux. Comme elles sont utilisées dans des applications terrestres. Les cellules solaires sont habituellement évaluées en mesurant les caractéristiques courant tension du dispositif dans des conditions

Introduction Générale

standard d'illumination et puis en extrayant un ensemble de paramètres à partir des données obtenus. Ces paramètres sont le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité, le photo-courant et la résistance shunt. Ils peuvent être employés pour le contrôle de la qualité pendant la production ou fournir des perspectives dans le fonctionnement des dispositifs, menant de ce fait aux améliorations de ces dispositifs.

L'objectif de ce travail est d'identifier les paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque (PV) sous une illumination constante et différentes températures. Une bonne identification des paramètres du PV permet de réaliser une bonne commande. Le mémoire est structuré en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur la technologie photovoltaïque, le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules solaires en donnant un aperçu sur les notions du rayonnement solaire. Nous exposons les différents secteurs d'application, ainsi que les avantages, les inconvénients et l'avenir de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons la structure des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque. Nous donnons un aperçu général sur la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque et les différentes caractéristiques électriques de la cellule. Puis, nous montrons l'influence des paramètres externes sur la caractéristique $I(V)$, tels que l'ensoleillement, la température et les résistances série, parallèle et l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule solaire.

Dans le dernier chapitre, nous abordons les différentes méthodes d'identification des paramètres caractéristiques du PV, ainsi que les techniques d'optimisation. L'approche d'identification est déterminée par la méthode du modèle de référence à l'aide d'une méthode d'ordre zéro nommée relaxation cyclique. Les résultats obtenus à l'aide de données expérimentales relevées sur trois températures différentes, sont illustrés par la bonne superposition des courants mesurés et ceux calculés.

En fin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie

photovoltaïque

I-1 Introduction

La cellule photovoltaïque est l'élément de base dans l'étude des systèmes photovoltaïques.

Pour comprendre le fonctionnement de cette cellule et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances, les différents types et technologies existantes, ainsi que les domaines d'applications et l'avenir de cette technologie.

I.2 Définition et historique du photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [1].

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est 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 [2].

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [2].

1.3 Notions sur la nature du rayonnement solaire

Le soleil est constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. La fusion des atomes d'hydrogène en atomes d'hélium permet en effet d'atteindre des températures de l'ordre de 20 millions de degrés Kelvin. Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes [3].

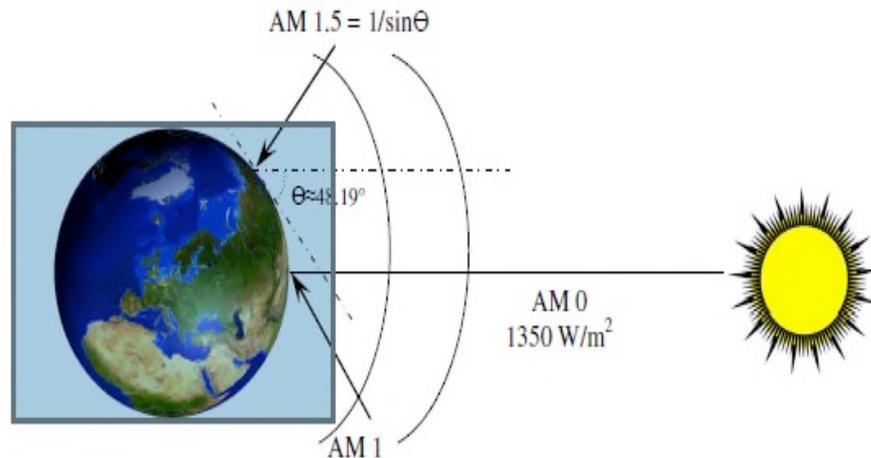


Figure I.1 Spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} , qui répond-elle même à la relation suivante :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Dans laquelle λ représente la longueur d'onde, h la constante de Planck et c la vitesse de la lumière. La distribution des radiations lumineuses émises par le soleil est déterminée par la température de la surface de ce dernier, à savoir 5800 K environ.

Les matériaux photovoltaïques réagissent différemment selon la longueur d'onde de la lumière à laquelle ils sont soumis. La connaissance de la distribution en longueur d'onde de l'énergie solaire s'avère donc primordiale. La figure I.2 représente le spectre solaire [4] [5] [6].

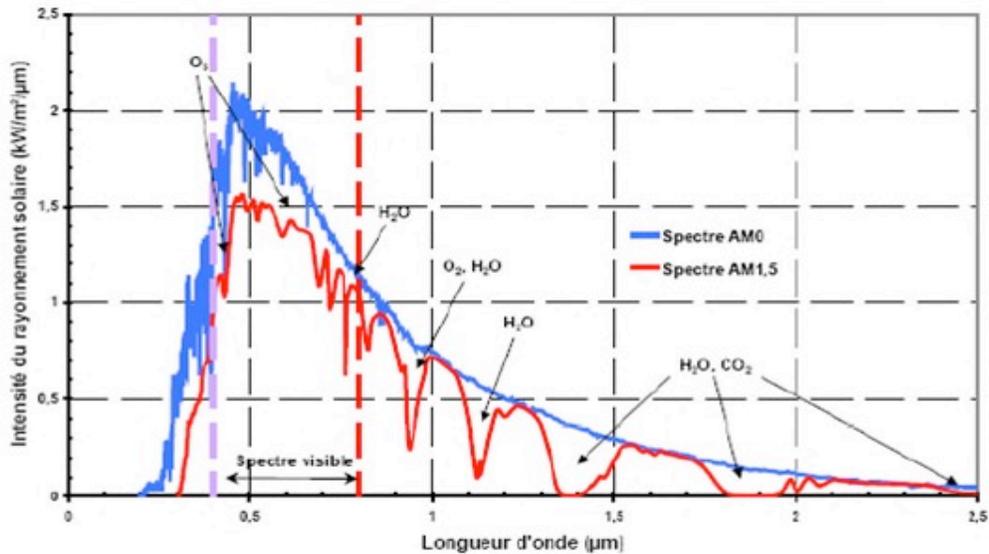


Figure I.2 Représentation des spectres solaires AM0 et AM1.

L'énergie par unité de surface où irradiante, fournie par le soleil, hors atmosphère et sous incidence normale, est constante, voisine de $1,36 \text{ kW/m}^2$. Afin d'établir un système de référence, la notion d'air masse (AM) a été introduite. L'air masse prend en compte l'angle ϑ formé par le soleil par rapport au zénith.

AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, AM1 correspond à une position du soleil au zénith du lieu d'observation. Le spectre AM1.5, correspondant à un angle du soleil de $48,19^\circ$ par rapport au zénith, est le plus couramment utilisé (Figure I.1). L'irradiance correspondante est arrondie à 1 kW/m^2 .

La traversée de l'atmosphère induit une atténuation non négligeable de l'énergie incidente. Cette atténuation est due aux phénomènes d'absorption par les molécules de l'atmosphère (H₂O, H₂, CO₂, O₃ pour l'essentiel) [5].

I.4 Différents types de rayonnement solaire

Par ensoleillement, nous faisons référence à l'intégrale de l'irradiance solaire sur une période donnée [kWh/m²]. Par conséquent, le rayonnement tombant sur une surface horizontale est constitué d'un rayonnement direct, associé à l'irradiance directe sur la surface, d'un rayonnement diffus qui frappe la surface depuis l'ensemble du ciel et non depuis une partie spécifique de celui-ci et d'un rayonnement réfléchi sur une surface donnée par le sol et l'environnement (Figure I.3). En hiver, le ciel est couvert et le composant diffus est donc supérieur au composant direct [7-8].

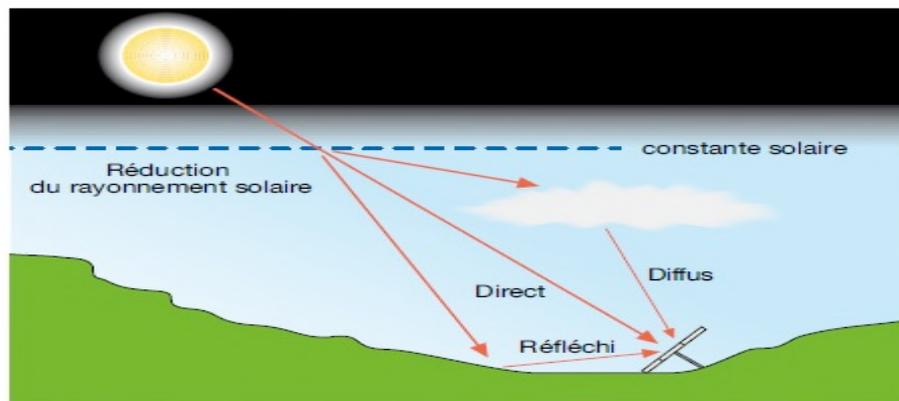


Figure I.3 Composants du rayonnement solaire.

I.4.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [7].

Si I est le rayonnement direct.

Dans le cas d'un plan horizontal rayonnement s'écrit :

$$I_h = I \sin h \quad (I.2)$$

I.4.2 Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus (D_h) est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions, Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil [8].

I.4.3 L'albédo ou réfléchi

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$\text{L'albédo Alb} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie recue}} \quad (1.3)$$

I.4.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est le rayonnement émis par le soleil incident sur un plan donné, et c'est la somme du rayonnement direct et diffus, il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran [8].

Dans le cas d'une surface horizontale, le rayonnement global s'écrit:

$$G = I \cdot \sin h + D_h \quad (1.4)$$

h : hauteur angulaire.

I.5 Semi conducteur

La filière la plus avancée sur le plan technologique et industrielle est la réalisation de cellules à base de silicium. Ce dernier est l'élément semi-conducteur le plus utilisé car il est peu coûteux et il se trouve en très grande quantité sur terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre, sous forme de silice, parfaitement stable et non toxique [9].

I.6 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés

par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [11].

La Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré dans la figure I.4 ci-dessous.

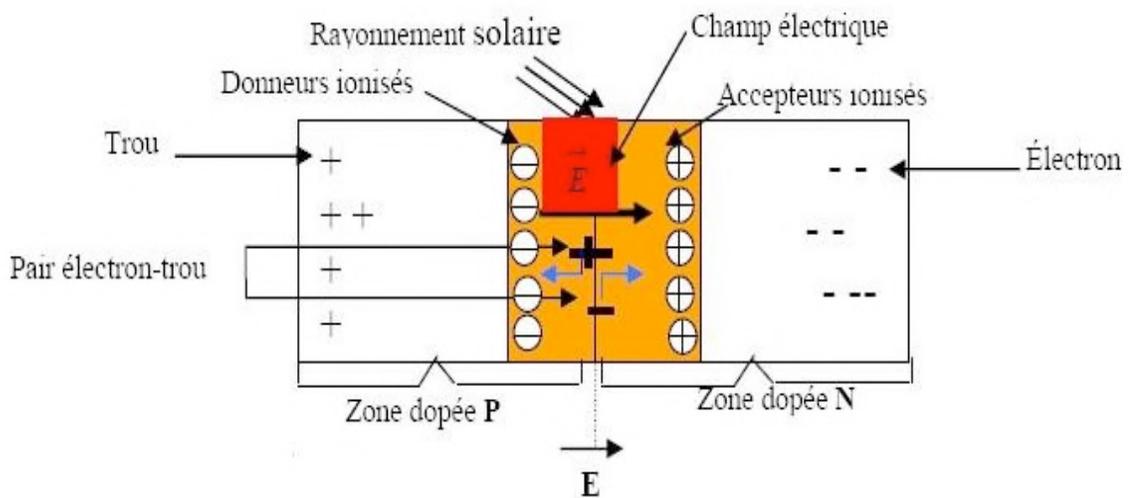


Figure I.4 Fonctionnement d'une cellule PV.

I.7 La fabrication des cellules photovoltaïques

I.7.1 La silice (matière première d'une cellule photovoltaïque)

La silice est un composé chimique nommé aussi dioxyde de silicium, de formule chimique SiO_2 . La silice est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente 25 % de la masse de la croûte terrestre [10].

La silice se présente sous la forme d'un minéral dur. Dans la nature, on la trouve en grande quantité dans :

- ✓ Les roches sédimentaires détritiques (sables, grès),
- ✓ Les roches métamorphiques, (schistes, gneiss, quartzites), les roches métamorphiques sont formées par la recristallisation (et généralement la déformation) de roches sédimentaires ou de roches magmatiques sous

l'action de la température et de la pression qui croissent avec la profondeur dans la croûte terrestre ou au contact d'autres roches.

- ✓ Les roches magmatiques [10].

1.7.2 Extraction et purification du silicium

a. Extraction du silicium à partir de la silice

Le silicium est un élément chimique de symbole Si. Il n'existe pas à l'état pur dans la nature. Le silicium est donc extrait de la silice (SiO_2) grâce à la réaction chimique simplifiée suivante : $\text{SiO}_2 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$.

Cette réaction se réalise dans un four à arc car elle nécessite de faire fondre la silice. La température du four peut atteindre 3000°C . La puissance du four peut aller jusqu'à 30 MW, afin d'enclencher les réactions chimiques.

Après cette opération, le silicium est obtenu sous forme liquide. Sa pureté est de 98 %. Il faut le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur afin d'obtenir un matériau adéquate pour les applications photovoltaïques.

b. Purification du silicium

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique, de faire une purification chimique. De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium.

Au final, le procédé de purification aboutit à l'obtention de lingots de silicium purifiés à 99.99 %.

1.7.3 Obtention des lingots de silicium

Une fois l'étape de purification terminée, vient l'étape de cristallisation du silicium liquide. Le produit issu de cette étape est un lingot de silicium à l'état solide. Il existe deux grandes méthodes de cristallisation. La première permet d'obtenir du silicium polycristallin (composé de plusieurs cristaux). La deuxième permet d'obtenir du silicium monocristallin (composé d'un seul cristal) [10].

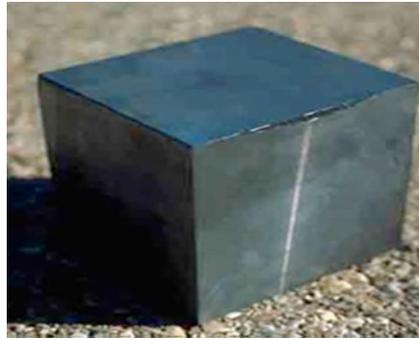


Figure I.5 Lingot de silicium.

I.7.4 Dopage du silicium

Les wafers de silicium obtenus à l'issue de l'étape de sciage sont alors introduits dans un réacteur de croissance dans lequel va se dérouler l'étape de dopage. Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques [10].

Le semi-conducteur dopé est alors appelé « semi-conducteur extrinsèque ». Il existe deux types de dopage : le type N (Négatif) et le type P (Positif).

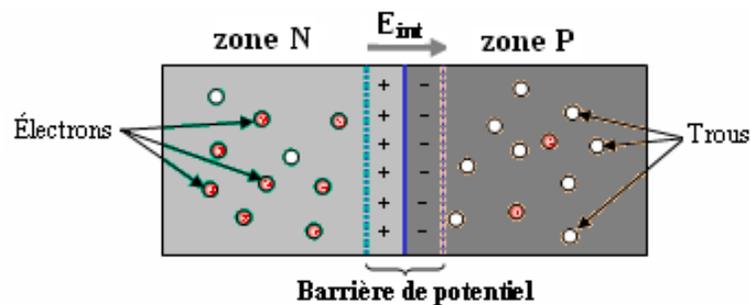


Figure I.6 La jonction PN.

a. Dopage de type N

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore au sein de la structure cristalline du silicium. Le phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative [10].

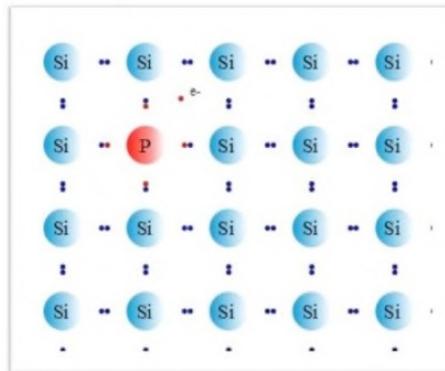


Figure I.7 Dopage de type N.

b. Dopage de type P

Le dopage de type P consiste à ajouter un atome de bore au sein de la structure cristalline du silicium. Le bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de silicium, laissant ainsi libre un trou : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive [10].

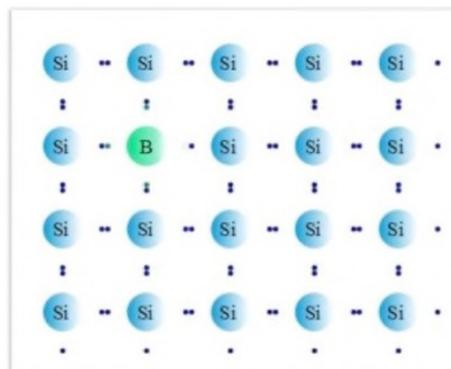


Figure I.8 Dopage de type P.

I.8 Structure d'une cellule PV

Pratiquement, il existe plusieurs technologies de fabrication des cellules PV en vue d'optimiser les caractéristiques suivantes :

La puissance électrique produite par une cellule (très faible actuellement et de valeur de 1 à 3W avec une tension de moins d'un volt).

Le rendement de conversion des cellules (atteint actuellement 15 à 19% pour le silicium monocristallin, 12 à 16% pour le silicium poly-cristallin, 7 à 9% pour le silicium amorphe).

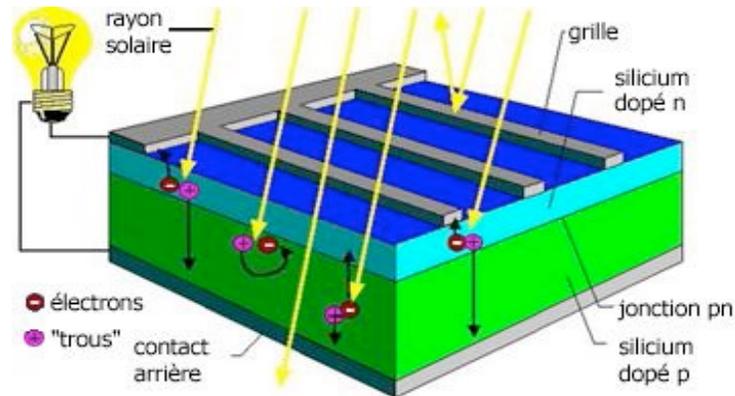


Figure I.9 Structure d'une cellule photovoltaïque.

En fin, la structure de base d'une cellule PV est une jonction PN (Figure I-22) constituée de la manière suivante où l'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre [11] :

- Un cristal semi-conducteur (Silicium) dopé P.
- Zone mince (Silicium) dopée N (quelques millièmes de mm).
- Entre les deux zones se développe une jonction.
- La zone N est couverte par une grille métallique (Contacte de front) qui sert de cathode.
- Une plaque métallique (contacte arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode.

Une couche de protection transparente (verre fumé) qui laisse passer la lumière dans un sens unique (anti-réflexion).

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal à travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. Le dessus et le dessous de la cellule doivent alors être recouverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée.

I.9 Type et rendement des cellules photovoltaïques

I.9.1 Silicium monocristallin

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes, son rendement de conversion est de (14 à 20%) [12].



Figure I.10 photos d'une cellule monocristalline.

I.9.2 Silicium poly cristallin

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium poly cristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commerciale s'étend entre 10 et 14 % [12].



Figure I.11 photo de cellule poly cristallin.

I.9.3 Silicium amorphe (a-si)

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi conduction.

Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est faible (de 7 à 10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière [12].



Figure I.12 : photo d'une cellule amorphe.

I.9.4 Cellule Tandem

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbantes dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines [13].

I.9.5 Cellule multi-jonction

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible, de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire [14].

I.9.6 La cellule photovoltaïque CIGS

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau semi-conducteur fait d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est disposé en couche très fine sur un support.

I.9.7 La cellule en couche mince de tellure de cadmium

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé lui aussi à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, c'est du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.

I.9.8 Les cellules photovoltaïques de demain

a. La cellule CZTS

Les laboratoires technologiques sont sans cesse à la recherche de nouveaux matériaux semi-conducteurs afin de créer les cellules photovoltaïques de demain. La cellule CZTS n'est encore qu'un projet en cours d'élaboration. Elle marie du cuivre, du zinc, de l'étain et du soufre (ce qui forme le sigle CZTS). Ce sont des matériaux non toxiques et disponibles en grande quantité sur la surface de la Terre. Ces cellules sont composées de pellicules fines qui absorbent l'énergie solaire sur leur support (verre, plastique, etc.). Le rendement est toutefois moyen, tandis qu'on ne peut pas encore définir sa durée de vie, ni le coût de ces panneaux solaires [14].

b. Les cellules solaires organiques

Déjà développées pour fabriquer des panneaux solaires, ces cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs de synthèse. On les connaît sous le nom de cellules à colorants, cellules à polymères ou encore cellules à pérovskites. Ces cellules photovoltaïques sont élaborées à partir de fines couches organiques qui sont déposées dans une solution liquide placée entre deux électrodes. Le faible coût de la fabrication et la non-toxicité des matériaux renouvelables utilisés en font une solution d'avenir très intéressante [14].

I.10 Secteurs d'application du photovoltaïque

Les applications de l'énergie obtenue à l'aide de générateurs photovoltaïques sont extrêmement variées. De façon générale, elles peuvent être classées en deux grandes sections [15]:

- Les systèmes isolés ;
- Les systèmes raccordés au réseau.

I.10.1 Les systèmes isolés

Tel que les Télécommunications, électrification rurale, applications agricoles, applications pour l'élevage, éclairage public, signalisation, contrôle et le développement rural [16].

a. Télécommunications : Téléphonie mobile, répéteurs radio et télévision, bornes d'appel d'urgence, télécommande, contrôle des réseaux d'arrosage à distance, télémétrie, radars, radiotéléphonie générale ou militaire, ou pour les postes de surveillance des forêts, téléphonie rurale par satellite, micro-ondes, cabines téléphoniques publiques, centrales de commutation, liaisons radio, systèmes TRUNKING, Couverture radio et communications dans les tunnels ferroviaires.

b. Électrification rurale : Habitat temporaire, habitat permanent, électrification centralisée permettant le contrôle individuel des consommations pour chaque habitation, dans les agglomérations rurales, électrification de refuges et auberges de montagne, postes de soins de premier niveau (éclairage, conservation de médicaments et vaccins dans

des réfrigérateurs), écoles et établissements communaux, postes de police et de frontière et l'installations religieuses (ermitages, missions, etc.).

c. Applications agricoles : Pompage d'eau en CC ou en CA (avec batterie), pompage d'eau à entraînement direct (sans batterie), électrification de bâtiments industriels, contrôle de l'irrigation, Serres (Automatisation des fenêtres et de l'éclairage).

d. Applications pour l'élevage : Pompages d'eau pour l'abreuvement du bétail, électrification de fermes (éclairage, moteurs, tondeuses, etc.), Systèmes de traite et de refroidissement du lait, Électrification de clôtures.

e. Éclairage : Panneaux publicitaires, lampadaires pour l'éclairage public, arrêts de bus, éclairage de tunnels, grottes...etc.

f. Signalisation : Phares et bouées de signalisation maritime, radiophares et radiobalises à usage aéronautique, signalisation routière de virages, obstacles, ronds-points, indicateurs de l'heure et la température sur la voie publique, passages à niveau, plates-formes pétrolières.

g. Contrôle : Débitmètres et anémomètres, actionnement de vannes (électrovannes), contrôles et stations météorologiques et sismiques, cameras de TV pour la surveillance et la mesure du trafic routier, monitoring et automatisation de portes, répéteurs à fibre optique, stations de mesure environnementale, contrôle de gazoducs et d'oléoducs, collecte de données, contrôle et maîtrise à distance du fonctionnement des barrages, protection cathodique.

I.10.2 Les systèmes connectés au réseau électrique

Les systèmes connectés au réseau sont aujourd'hui prisent sérieusement pour compléter la génération conventionnelle d'énergie dans plusieurs pays industrialisés. Il y a certainement plusieurs projets de démonstrations connectés aux réseaux qui étudient cette possibilité. Bien qu'ils sont devenus viables dans le développement économique, la participation des Photovoltaïques dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée à cause des effets environnementaux défavorables des sources conventionnelles d'énergie. Les installations photovoltaïques peuvent être raccordées au réseau, ce qui représente une économie importante en investissement et en

fonctionnement. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380V, ainsi que le photovoltaïque est la seule filière qui peut être installée n'importe où. On distingue deux types d'installations connectées au réseau [16]:

- Installation centralisée : génération de la puissance Photovoltaïque à grande échelle centralisée dans les stations de puissance Photovoltaïque.
- Installation décentralisée : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur.

De jour, les installations photovoltaïques couplées au réseau injectent de l'énergie dans le réseau à travers le convertisseur. Au contraire, pendant la nuit le propriétaire de l'installation peut "récupérer" cette énergie, dans le cas des installations décentralisées, et travaillent en cas de charges de pic avec le réseau, dans le cas des installations centralisées. Comme la consommation électrique est importante de jour, cette manière de procéder est très raisonnable.

I.11 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.11.1 Les avantages

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples [17] :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...).

- ✓ L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- ✓ Technologie encore émergente, son coût lui permet d'être souvent compétitive par rapport aux solutions classiques dans les sites éloignés du réseau électrique ne demandant pas de très grosse quantité d'électricité fournie, ou dans des sites urbains lorsqu'elle évite des coûts de raccordement au réseau électrique public .
- ✓ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement.
- ✓ Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.

I.11.2 Les inconvénients [17]

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- ✓ Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans).
- ✓ Pollution à la fabrication.

I.12 Avenir du photovoltaïque

Source d'énergie 100% propre et fiable pour des usages très variés, elle figurera à l'avenir parmi les principales sources mondiales. Son handicap majeur reste un coût encore élevé comparée aux sources conventionnelles et aux filières renouvelables. Ce coût diminue de 10% par an, et pour accélérer cette baisse, les autorités nationales et internationales doivent engagés une politique de soutien à long terme de la filière photovoltaïque. C'est précisément l'objectif des programmes lancés depuis quelques années dans plusieurs pays industrialisés [17].

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, et leurs applications dans le domaine photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs processus de fabrication.

Aussi, nous avons décrit les différentes technologies et le rendement des cellules photovoltaïque ainsi que les domaines d'applications de cette énergie.

Finalement, nous avons présenté les avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque et sont avenir.

Chapitre II
Modélisation
de panneaux
photovoltaïques

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le panneau photovoltaïque ainsi que la modélisation des cellules associées. Nous présentons également l'association des cellules (série, parallèle et mixte) dans un panneau.

Nous donnons également les différentes caractéristiques des panneaux photovoltaïques.

Pour trouver le modèle de représentation d'un générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent pour la cellule PV qui est l'élément de base de ce GPV. Pour cela plusieurs modèles électriques ont été représentés dans ce chapitre.

II.2 Structure des cellules photovoltaïques.

Un module est constitué d'association de cellules photovoltaïques. Ces derniers sont regroupés en série ou bien en parallèle selon la puissance demandée. Pour protéger les modules PV contre le point chaud (hot-spot) causé par un déséquilibre d'éclairage, une diode au silicium "diode de by-pass" montée en parallèle tête-bêche (Figure II.1) sur une branche de dix-huit cellules en série. Cette diode sera conductrice dans le cas de l'ombrage d'une ou plusieurs cellules dans une branche et bloquée dans le cas normal [18].

II.2.1 Une série de cellules photovoltaïques

On nomme sous module, l'ensemble de cellules en séries connectées en parallèle avec une diode de protection (Figure II.1), [18, 24].

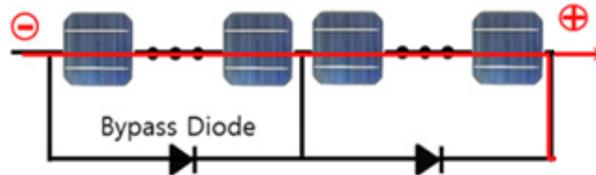


Figure II.1 Sous module constitué de N_s cellules connectées en séries.

II.2.2 Module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est constitué d'un groupe de sous modules connectés en série pour avoir une tension plus ou moins élevée [18, 25][26].

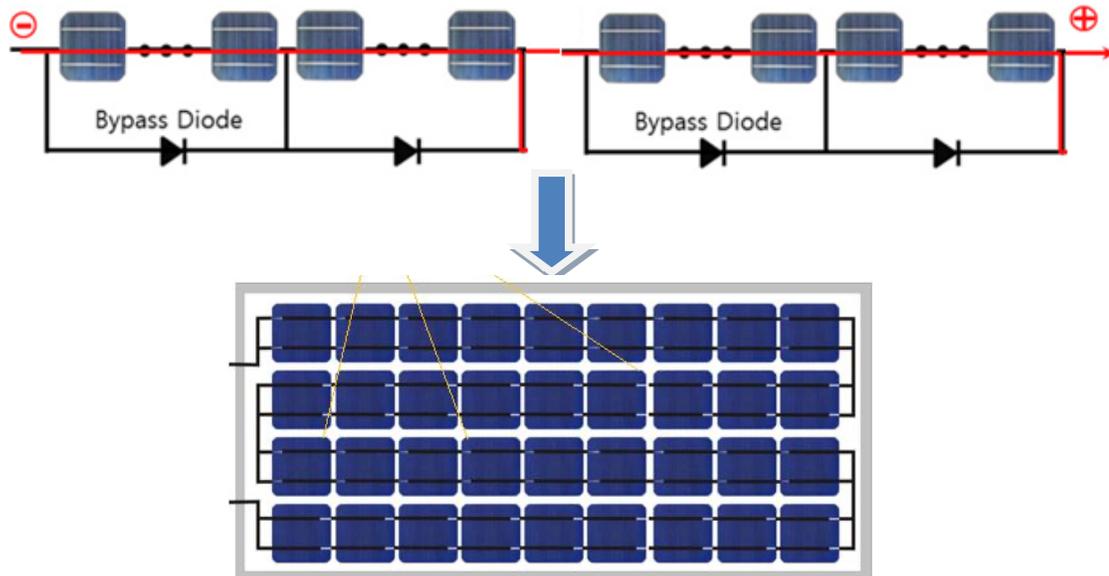


Figure II.2 : Module constitué de sous modules montés en séries

II.2.3 Panneau et champ photovoltaïque

Suivant la puissance du panneau, le string est constitué de plusieurs modules connectés généralement en série. Ces strings sont connectés en parallèle pour former un champ photovoltaïque, comme indiquée dans la Figure II.3.

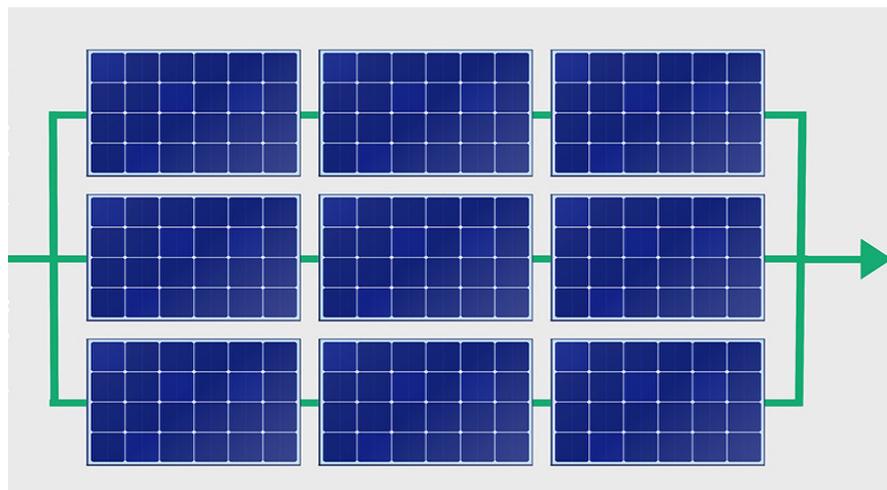


Figure II.3 Champ photovoltaïque composé de strings en parallèle

II.3 Association des cellules Solaire

II.3.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules produisent le même courant dans toute la branche. On prendra soin de ne pas connecter en série que des cellules de caractéristique identique. La tension du panneau sera l'addition de toutes les tensions des cellules qui le compose. La caractéristique courant tension d'un groupement série sera homothétique de la courbe $I(V)$ d'une cellule base [27].

$$\begin{cases} V_{co(tot)} = \sum_{i=1}^{N_s} V_i = N_s \cdot V_{co} \\ I_{cc(tot)} = I_{cc} \end{cases} \quad (II.1)$$

La figure II.4 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série cellules identiques.

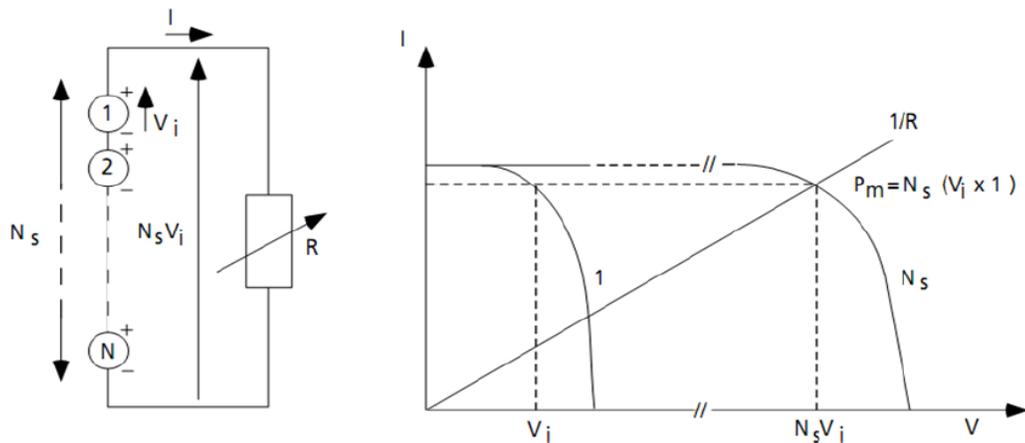


Figure II.4 Association en série de N_s cellules solaires.

II.3.2 Association en parallèle

Pour un groupement en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension. Les courants dans ce cas s'ajoutent. La caractéristique du module est obtenue en

multipliant point par point pour chaque valeur de tension, le courant de la cellule élémentaire par N_p . Pour les résistances on additionne les inverses des résistances série et parallèle [27].

$$\begin{cases} V_{co(tot)} = V_{co} \\ I_{cc(tot)} = \sum_{i=1}^{N_p} I_i = N_p \cdot I_{cc} \end{cases} \quad (II.2)$$

La figure suivante montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles cellules identiques.

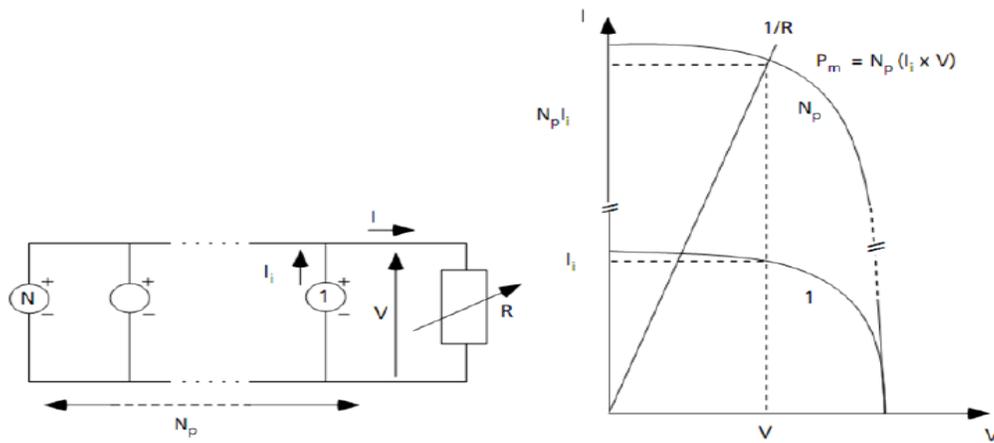


Figure II.5 Association en parallèle de N_p cellules solaires identique.

II.3.3 Association en mixte

Selon l'association en série et/ou parallèles de ces cellules, les valeurs de courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par la relation suivante [27] :

$$\begin{cases} V_{oc(tot)} = N_s \cdot V_{oc} \\ I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \end{cases} \quad (II.3)$$

Avec :

N_p : nombre des cellules en parallèle.

N_s : nombre des cellules en série.

La figure suivante montre la caractéristiques résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p , cellules identiques.

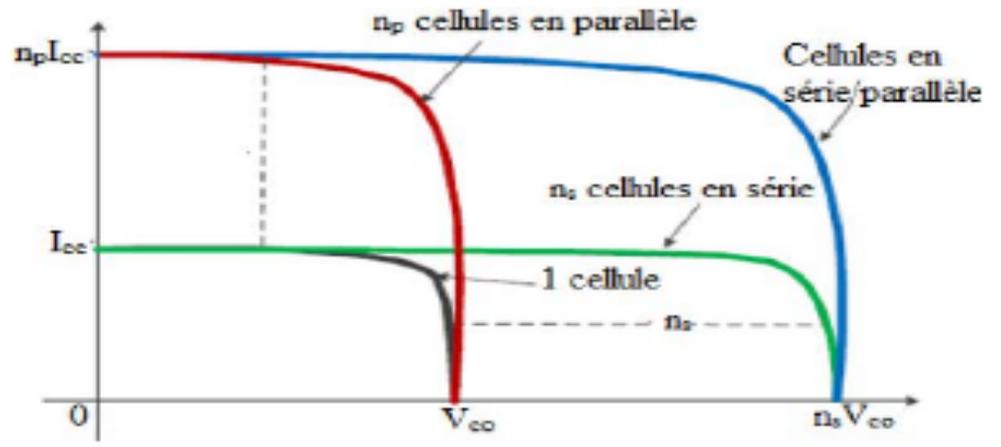


Figure II.6 Caractéristique I(V) d'une connexion mixte.

II.4 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

II.4.1 Modèle idéal

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque représentée dans la figure II.7, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle [20]. La source du courant produit le photon courant I_{ph} qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire.

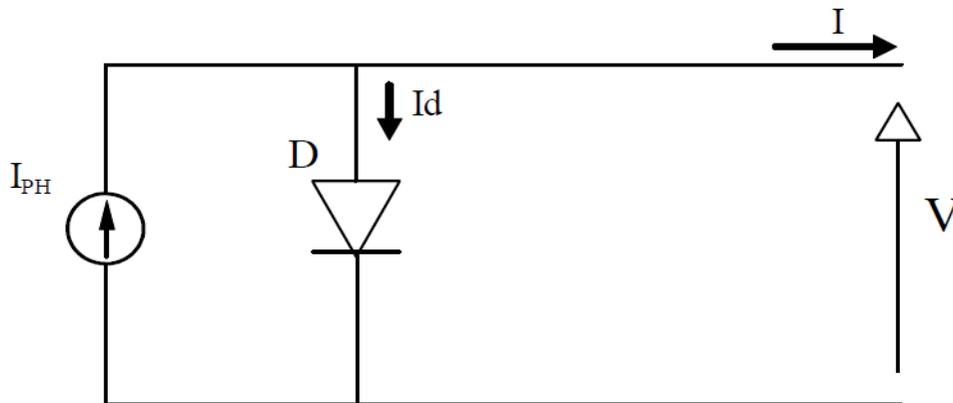


Figure II.7 : Modèle idéal d'une cellule PV

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

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

Avec :

I : Courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Constant pour un ensoleillement donné.

$$I_d = I_s \left[e^{\left(\frac{V}{A V_t} \right)} - 1 \right] \quad (II.5)$$

Avec : $V_t = \frac{k.T}{q}$

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

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{V}{A V_t} \right)} - 1 \right] \quad (II.6)$$

Avec :

I_s : courant de saturation inverse de la diode.

I_d : courant traversant la diode.

V_t : potentielle thermodynamique.

k : la constante de BOLTZMANN (1.38×10^{-23} Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en Kelvin.

q : la charge d'un électron = 1.6×10^{-19} C.

V : la tension aux bornes de la cellule.

II.4.2 Modèle simplifié (avec pertes Ohmiques)

La cellule sera modélisée par une source du courant I_{ph} en parallèle avec une diode et pour tenir compte de quelques phénomènes au niveau de la cellule, le modèle comme le montre la figure II.8 contient une résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques [18].

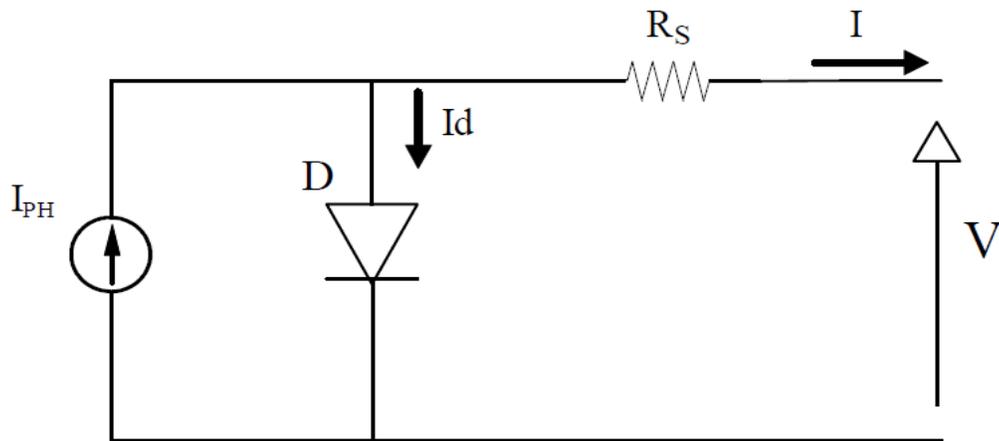


Figure II.8 Modèle simplifié d'une cellule PV.

Ce modèle électrique modélise la cellule en un générateur du courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d$$

$$I_d = I_s \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{A V_t} \right)} - 1 \right] \quad (II.7)$$

Avec :

A : Facteur d'idéalité de la diode.

I_{ph} : Constant pour un ensoleillement donné.

Le courant fourni par ce modèle est donc donné par :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{A V_t} \right)} - 1 \right] \quad (II.8)$$

Le modèle de l'expression (II.8) est nommé aussi « modèle à quatre paramètres » (I_{ph} , I_s , R_s , A) [28].

II.4.3 Modèle à une diode

C'est un modèle semblable au modèle simplifié. Comme le montre la figure II.9, une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série, mais dans ce modèle une résistance shunt R_{sh} est ajoutée ayant une grande influence sur le courant

généralisé par le modèle et qui est proche du courant d'une cellule réelle. Physiquement, la résistance shunt sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les coins de la cellule [18].

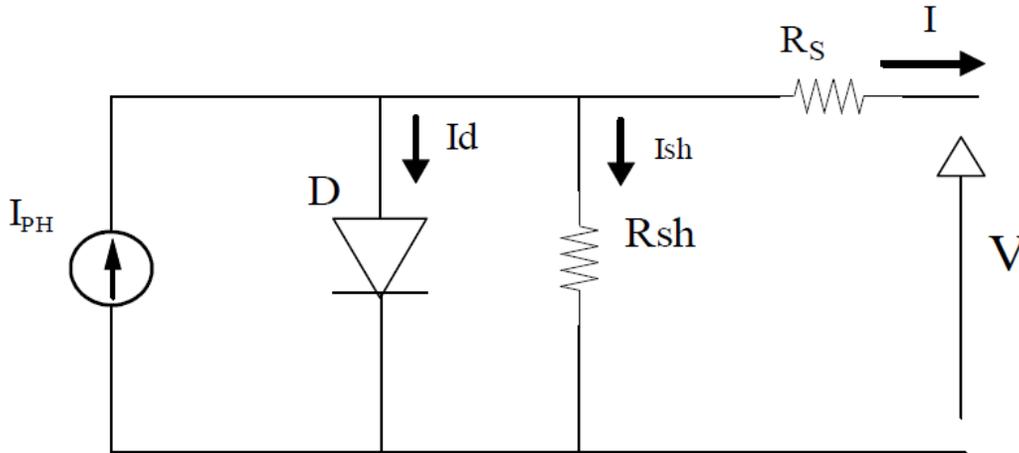


Figure II.9 Modèle à une diode d'une cellule PV.

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV par rapport au modèle à résistance série (simplifié) d'une part, et sa simplicité pour le calcul mathématique par rapport au modèle à deux diodes (décrit ci-après) d'une autre part [18].

Le courant généré par ce modèle est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.9)$$

Avec :

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right)$$

(II.10)

Donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V + R_s I}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (II.11)$$

Le modèle de l'expression (II.11) est nommé aussi « modèle implicite avec cinq paramètres » (I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , A) [28].

II.4.4 Modèle à deux diodes

Actuellement le modèle électrique le plus proche d'une cellule photovoltaïque est celui à deux diodes (double exponentiel), où la cellule est bien sûr présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant avec deux diodes en parallèle. Et pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, comme les modèles précédents, ce modèle est complété par les deux résistances série R_s et parallèle R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure II.10 [18].

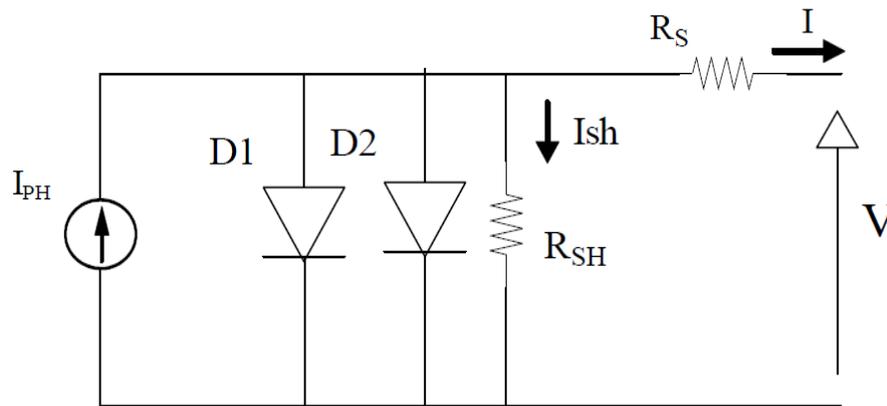


Figure II.10 Modèle à deux diodes d'une cellule PV.

Avec quelques difficultés de calcul et développement mathématique, ce modèle donne un courant presque semblable au courant d'une cellule PV selon la relation :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (II.12)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\left(\frac{V + R_s I}{A_1 V_t} \right)} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\left(\frac{V + R_s I}{A_2 V_t} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (II.13)$$

Avec :

A_1 et A_2 : Facteurs d'idéalité des diodes $D1$ et $D2$ respectivement.

I_{s1} et I_{s2} : Courants de saturation des diodes $D1$ et $D2$ respectivement.

II.5 Les Caractéristiques électriques d'une cellule Solaire

II.5.1 La caractéristique courant-tension

La courbe caractéristique d'une cellule PV représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule) [26].

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques dépend des conditions d'ensoleillement et de température à la surface de la cellule. Ainsi, chaque courbe courant tension correspond à des conditions spécifiques de fonctionnement [26].

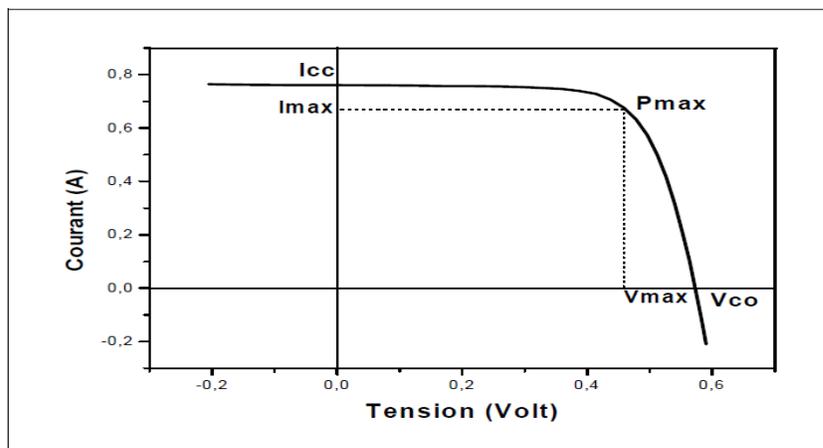


Figure II.11 Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

II.5.2 Paramètres caractéristiques

La caractéristique I-V d'une cellule solaire passe par trois points caractéristiques: I_{cc} , V_{oc} et P_{max} très important (voir figure II.11). Ils interviennent de manière déterminante dans le calcul du facteur de forme et du rendement de la cellule [26].

a. Courant de court circuit, I_{cc}

Le courant de court-circuit, I_{cc} , apparaît en un point de la courbe I-V où la tension est nulle. En ce point aussi, la puissance délivrée par la cellule est nulle. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule c'est-à-dire à l'éclairement Φ

(W/m²) et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température [26].

b. Tension en circuit ouvert, V_{oc}

La tension en circuit ouvert, V_{oc} apparaît en un point de la courbe où le courant est nul. En ce point, la puissance délivrée par la cellule est nulle. Elle ne varie presque pas avec l'intensité lumineuse, elle ne dépend pas des dimensions. Dans le cas idéal, V_{oc} est donnée par la relation [26] :

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (II.14)$$

c. La puissance caractéristique d'une cellule PV

La puissance électrique P (W) produite par une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V [26] :

$$P = V \cdot I \quad (II.15)$$

P (W), watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V (v), volt : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I (A), Ampère : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

d. Puissance maximale, P_{max}

Le courant I_m est la tension V_m correspondent respectivement au courant et à la tension pour les quelles la cellule solaire délivre sa puissance maximale P_{max} [26].

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (II.16)$$

e. Le facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions données, et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc} .

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (II.17)$$

Le nom « Facteur de Forme » dérive de la représentation graphique. Pour les bonnes cellules, FF est supérieur à 0.7. La résistance série et la conductance parallèle contribuent à la diminution de facteur de forme (FF) [26].

f. Le rendement de conversion, η

Le rendement est le paramètre le plus généralement utilisé pour comparée les performances d'une cellule à une autre. Le rendement η des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale, délivrée par la cellule à la puissance lumineuse incidente, P_0 [26].

$$\eta = \frac{P_{max}}{SP_0} = \frac{FF I_{cc} V_{oc}}{SP_0} = \frac{V_m \cdot I_m}{SP_0} \quad (II.18)$$

S : est la surface de la cellule (m²). Les valeurs typiques du rendement pour une cellule cristalline au silicium Si est de 6-25% et pour une cellule poly-cristalline de 6-20%.

Le rendement dépend du spectre, de l'intensité de la lumière incidente et de la température. Autrement les conditions sous les quelles le rendement est mesuré doit être contrôlé, à fin de comparer les performances d'un dispositif à un autre.

II.6 Influence des paramètres externes sur la caractéristique I (V)

II.6.1 influence de l'ensoleillement [21][22].

Le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel au flux lumineux.

Par contre, la tension (v) aux bornes de la jonction varie peu, car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour $T_j = 25^\circ\text{C}$). La tension de circuit ouvert ne diminuera pas que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ;

- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (voir figure II.12).

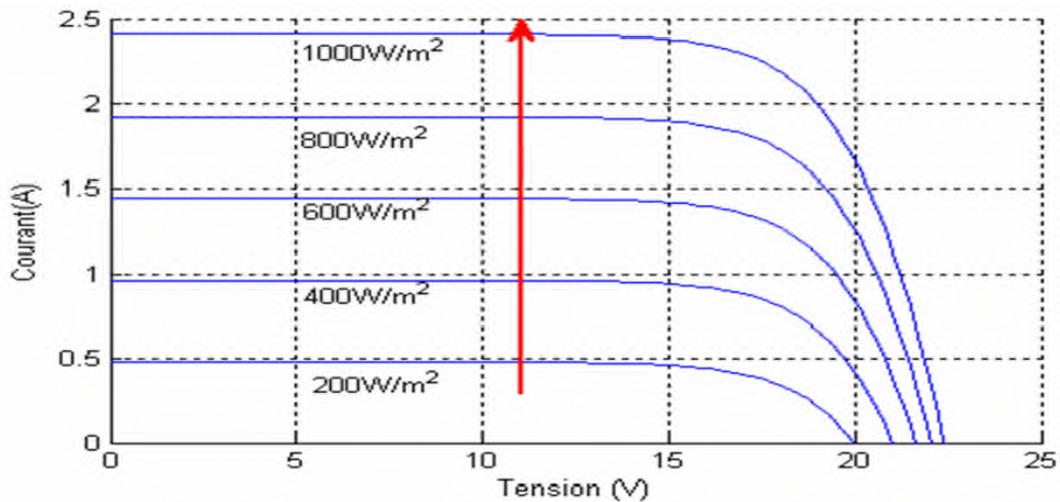


Figure II.12 Influence de l'ensoleillement à température constante sur la courbe I-V.

II.6.2 influence de la température [21][22].

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant / tension d'un semi-conducteur (voir la figure II.13). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augment d'environ $0.025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV/°C/cellule}$. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0.4\%/°\text{C}$. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

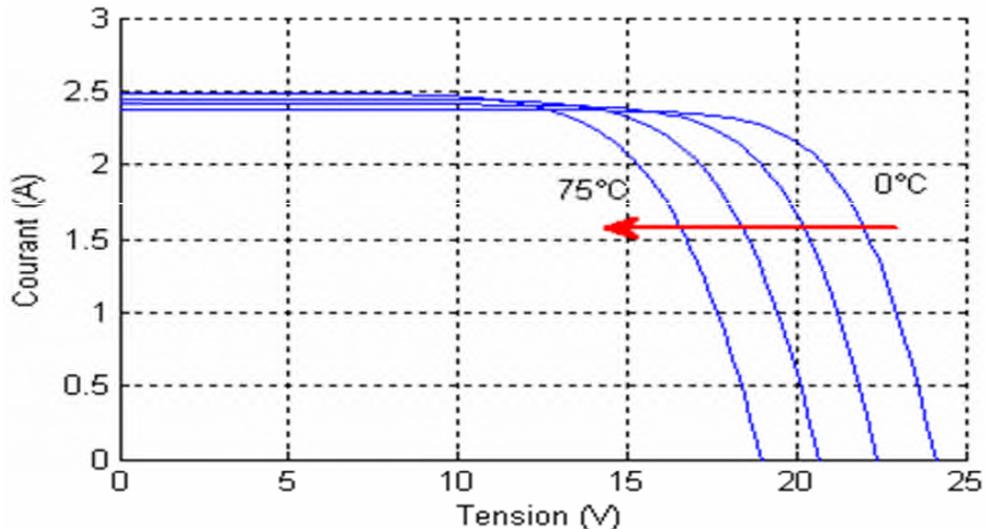


Figure II.13 Influence de la température à l'ensoleillement constante sur la courbe I-V.

II .6.3 Influence des résistances série et parallèle [21][22].

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure II.14.a montre l'influence de R_s sur la caractéristique $I(V)$. La courbe en bleu correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la R_{sh} est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant. La figure II.14.b montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

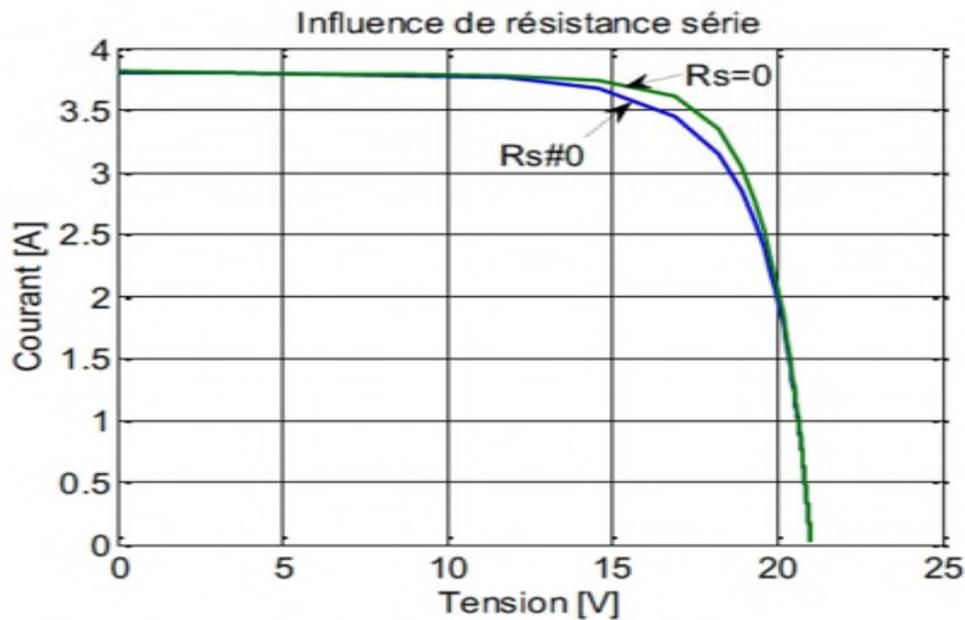


Figure II.14.a Influence de la résistance série.

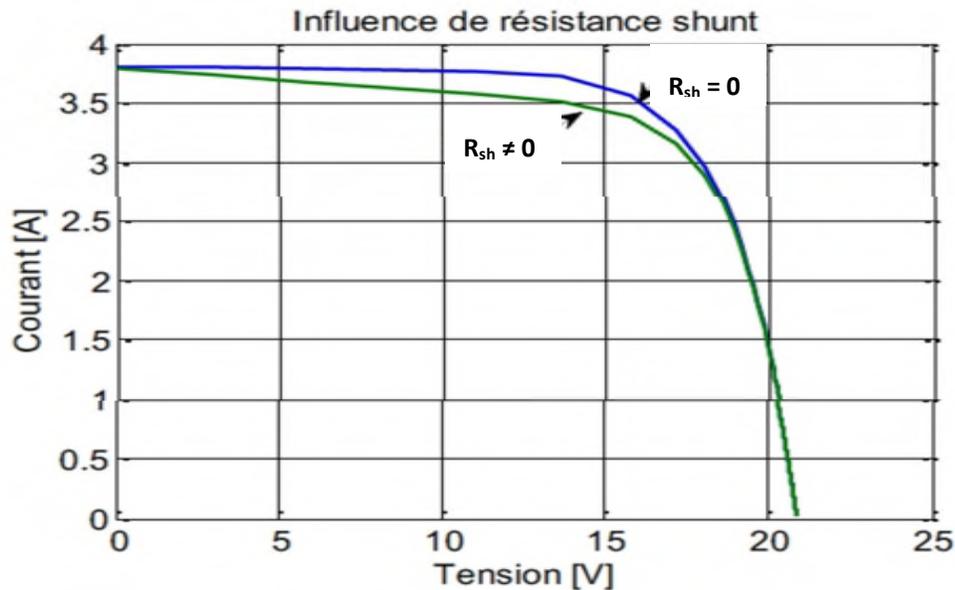


Figure II.14.b Influence de la résistance parallèle

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les définitions et les mécanismes de base du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ainsi, nous avons présenté les modèles électriques d'une cellule PV.

Les schémas de modèles présentés sont basés sur une analogie électrique définie à partir d'une source de lumière (photons), une diode (cellule ou panneau PV) et des résistances (pertes), cette analogie est une représentation parfaite pour une modélisation électrique d'une cellule et d'un panneau photovoltaïque.

Par ailleurs, nous avons pu montrer que le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque est non linéaire. En effet, ce modèle est fonction de plusieurs paramètres dont il s'agit d'identifier c'est ce qu'on va entamer dans le prochain chapitre.

Chapitre III
Identification et
optimisation des
paramètres PV

III.1 Introduction

La connaissance précise des paramètres des modules photovoltaïques est indispensable pour la commande MPPT d'un système photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter cinq modèles de la cellule photovoltaïque. Nous présentons également trois approches d'identification ainsi que des techniques d'optimisation. L'approche d'identification utilisée est la méthode du modèle de référence à l'aide d'une méthode d'ordre zéro nommée relaxation cyclique. Cette dernière est développée pour la minimisation de la fonction objectif définie par l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui calculé. Les essais sont effectués pour trois températures différentes.

III.2 Modèle d'extraction des paramètres PV

Plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque sont présentés dans la littérature [18]. Nous présentons cinq modèles ainsi que leurs paramètres.

III.2.1 Modèle à une seule diode (simple exponentielle)

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

Le modèle à trois paramètres fait intervenir les paramètres I_{ph} , I_s , A .

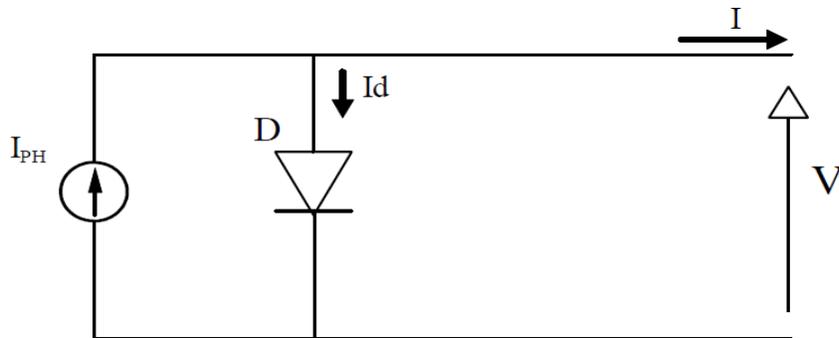


Figure III.1 Circuit équivalent au modèle à trois paramètres.

L'équation caractérisant le modèle à quatre paramètres est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{V}{AV_t}\right)} - 1 \right] \quad (\text{III.1})$$

b. Modèle d'extraction à quatre paramètres

Le modèle d'extraction à quatre paramètres fait intervenir les paramètres I_{ph} , I_s , A , R_s . Dans ce modèle, la valeur de la résistance parallèle est supposé infinie. Ce modèle est illustré sur la figure suivante :

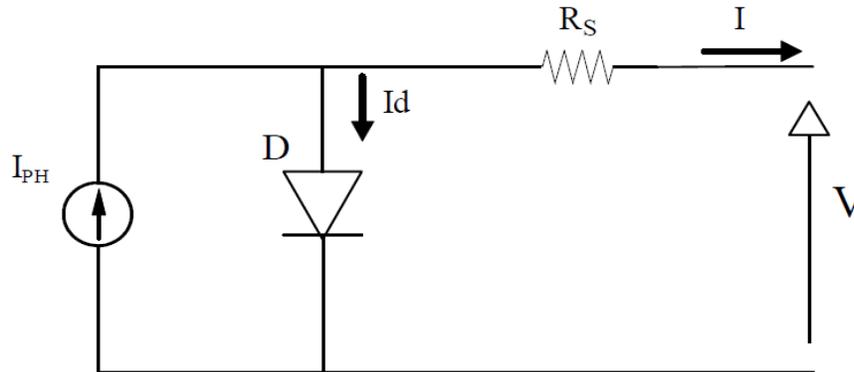


Figure III.2 Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres.

L'équation caractérisant le modèle à quatre paramètres est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{A V_t} \right)} - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

c. Modèle d'extraction à cinq paramètres

Le modèle à cinq paramètres est illustré dans la figure III.3. Les paramètres à estimés sont I_{ph} , I_s , A , R_s , R_{sh} .

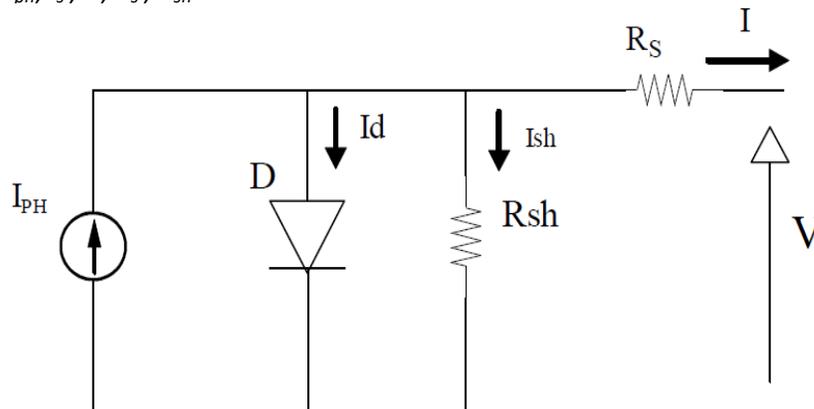


Figure III.3 Circuit équivalent au modèle à cinq paramètres.

III.2.2 Modèle à deux diodes (double exponentielles)

a. Modèle d'extraction à six paramètres

Dans ce modèle la résistance shunt a été omise à l'infinie ce qui donne un courant de fuite nul. Ce model est illustré dans la figure suivante :

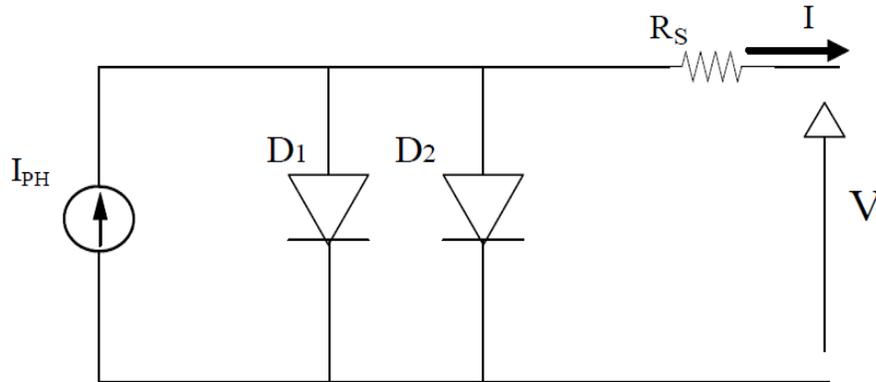


Figure III.4 Circuit équivalent au modèle à six paramètres.

La relation I-V de ce circuit est donnée par la formule suivante :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\left(\frac{V+R_S I}{A_1 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\left(\frac{V+R_S I}{A_2 V_t} \right)} - 1 \right] \quad (III.3)$$

Ce modèle fait intervenir les paramètres I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , A_1 , A_2 , R_S .

b. Modèle d'extraction à sept paramètres

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, Ce modèle est illustré sur la figure suivante :

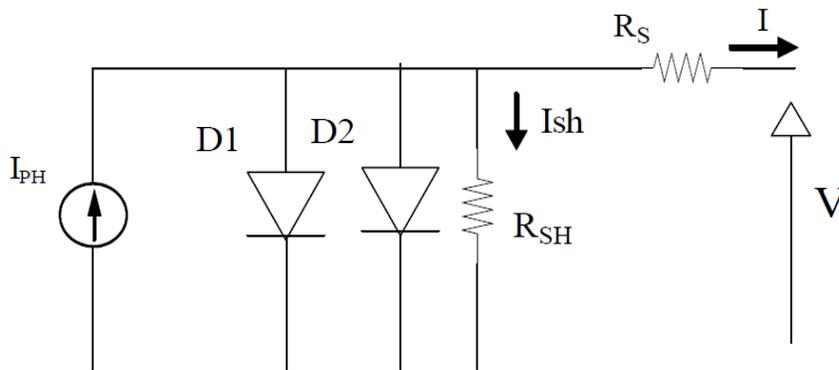


Figure III.5 Circuit équivalent au modèle à sept paramètres.

Ce modèle fait intervenir les paramètres I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , A_1 , A_2 , R_{sh} , R_s .

Ca caractéristique courant-tension est représentée par la relation suivante:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\left(\frac{V+R_s I}{A_1 V_t} \right)} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\left(\frac{V+R_s I}{A_2 V_t} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (III.4)$$

III.3 Méthodes d'identification des paramètres de la cellule solaire

La caractéristique courant-tension (I - V) de la cellule solaire peut être présentée soit par un modèle à deux diodes ou bien par un modèle à une seule diode. Sous des conditions de fonctionnement normal, le modèle à une seule diode est le modèle le plus utilisé pour les cellules solaires.

Dans la section suivante, différentes méthodes d'extraction des paramètres, proposées par plusieurs auteurs, ont été revues.

III.3.1 Méthode analytique

Cette méthode calcule facilement les paramètres du circuit équivalent en se basant sur des données que les fabricants fournissent habituellement. L'approximation analytique est basée sur une nouvelle méthodologie, puisque les méthodes développées jusqu'ici pour obtenir les paramètres mentionnés sur la figure. III.1 du circuit équivalent, et les données du fabricant ont toujours été numériques ou heuristiques. Les résultats de la méthode actuelle sont aussi précis que ceux qui résultent d'autres méthodes existantes (numériques) plus complexes en termes de processus et ressources de calcul. [34]

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{V+R_s I}{N_s A V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (III.5)$$

Où I_s est le courant de saturation de la diode, A est le facteur d'idéalité qui tient compte de la déviation de la diode de la théorie de diffusion de Shockley [34], N_s est le nombre de cellule en série. En conclusion, V_t est la tension thermique de la diode, une constante qui dépend de la température T , la constante de Boltzmann K , et les charges de l'électron q , avec l'équation:

$$V_t = \frac{K.T}{q} \quad (III.6)$$

Le modèle de circuit équivalent sur la figure.III.1 contient cinq paramètres inconnus: I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_s et A .

Le facteur d'idéalité A est déduit du fait que la dérivée de la puissance maximale soit nulle ($\frac{dP}{dV} = 0$),

$$\frac{dP}{dV} = 0 = \frac{\partial I}{\partial V} V + I \frac{\partial V}{\partial V} \quad (III.7)$$

On Trouve,

$$A = \frac{q(2V_m - V_{co})}{N_s \cdot K \cdot T \left[\frac{I_{cc}}{I_{cc} - I_m} + \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) \right]} \quad (III.8)$$

Pour la détermination du courant de court circuit, l'équation (III.5) au point de court circuit peut être réécrite comme suit:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{R_s \cdot I_{cc}}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (III.9)$$

Après simplification [35-36], on obtient l'équation suivant:

$$I_{ph} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{cc} \quad (III.10)$$

•En outre, au point de circuit ouvert, l'équation (III.5) peut être réécrite comme suit:

$$0 = I_{ph} - I_s \left[e^{\left(\frac{V_{co}}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (III.11)$$

En remplaçant l'équation (III.10) dans l'équation (III.11), on obtient l'expression de I_s avec des simplifications [37,38]

$$I_s = \frac{(R_{sh} + R_s) \cdot I_{cc} - V_{co}}{R_{sh} e^{\left(\frac{V_{co}}{A \cdot V_t} \right)}} \quad (III.12)$$

En conclusion, l'équation (III.5) peut être dérivée, au point de puissance maximum comme suit :

$$I_{mp} = I - I_s \left[e^{\left(\frac{V_{mp} + R_s \cdot I_{mp}}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (III.13)$$

L'équation (III.13) devient en injectant l'équation (III.12) avec des simplifications comme suit:

$$I_{mp} = I_{cc} - \left(I_{cc} \frac{V_{oc} - R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \right) e^{\left[\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s - V_{oc}}{A \cdot V_t} \right) \right]} - \frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s \cdot I_{cc}}{R_{sh}} \quad (III.14)$$

• La dérivée de la puissance au point maximum s'exprime comme suit [39]:

$$\left(\frac{\partial I}{\partial V} \right) \Big|_{[V_{mp}, I_{mp}]} = - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (III.15)$$

En utilisant les équations (III.5), (III.10), (III.12) et (III.14) suivi de simplification, il est possible d'obtenir l'expression suivante:

$$\frac{AV_t V_{mp} (2 \cdot I_{mp} \cdot I_{cc})}{(V_{mp} I_{cc} + V_{oc} (I_{mp} - I_{cc})) (V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s) - AV_t (V_{mp} I_{cc} - V_{oc} I_{mp})} = e^{\left[\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s - V_{oc}}{A \cdot V_t} \right) \right]} \quad (III.16)$$

En conclusion, à partir des équations (III.14) et (III.16), l'expression de la résistance parallèle R_{sh} peut être dérivée:

$$R_{sh} = \frac{(V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s) (V_{mp} - R_s (I_{cc} - I_{mp})) - AV_t}{(V_{mp} - I_{mp} \cdot R_s) (I_{cc} - I_{mp}) - AV_t} \quad (III.17)$$

La résistance série R_s peut être calculée à partir de l'équation III.16 ou bien par la méthode numérique de Newton-Raphson, car la relation (III.12) est une relation non linéaire. Après simplification, on obtient l'expression suivante:

$$R_s = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V=V_{oc}} + \frac{1}{X_V = I_s \cdot \frac{1}{A \cdot V_t} e^{\left(\frac{V_{oc}}{A \cdot V_t} \right)}} \right] \quad (III.18)$$

III.3.2 Méthode des cinq points

Cette méthode, présente une méthodologie pour l'extraction des paramètres des cellules photovoltaïques, par l'utilisation des modèles électriques à une exponentielle et double exponentiels. Le but de cette méthode est l'extraction des paramètres en utilisant uniquement les courbes expérimentales, en appliquant la Méthode de la région de confiance (trust région) pour résoudre un système d'équations $f(x_i)$. Les variables x_i sont les paramètres à identifier [40].

L'expression de la caractéristique courant – tension pour un modèle à deux diodes s'écrit:

$$I = I_{ph} - I_{s1} [e^{\beta_1(V+R_s I)} - 1] - I_{s2} [e^{\beta_2(V+R_s I)} - 1] - \left(\frac{V+R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (III.19)$$

Avec: $\beta_1 = \frac{q}{n_1 k T}$ et $\beta_2 = \frac{q}{n_2 k T}$

La définition du problème à optimiser, est de commencer par la détermination des équations qui composeront le système non linéaire à résoudre. Pour faire ainsi, et en raison du principe de cette méthode, qui a été la représentation des cinq points donnés sur la caractéristique I-V, et par conséquent les cinq équations nécessaires pour extraire les paramètres du modèle [40]. La Figure suivante montre les points utilisés dans chaque équation.

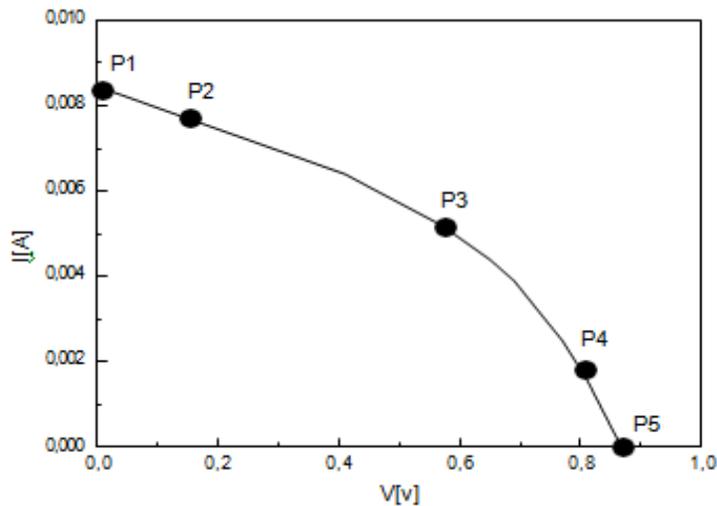


Figure III.6 Les points utilisés pour définir le système d'équations.

Le choix de ces points a été fait selon les définitions suivantes :

- P1: $(V_1, I_1) = (0, I_{sc})$ – tension en circuit ouvert. (les mesures doivent être effectuées pour des tensions très faibles).
- P2: $(V_2, I_2) = (0.3V_{oc}, I_{0.3V_{oc}})$ – la tension est de 30% de la tension en circuit ouvert.

- P3: $(V_3, I_3) = (V_{\max}, I_{\max})$ – point de la puissance maximale.
- P4: $(V_4, I_4) = (0.9V_{oc}, I_{0.9Voc})$ – la tension est de 90% de la tension en circuit ouvert.
- P5: $(V_5, I_5) = (V_{oc}, 0)$ – la tension égale à la tension en circuit ouvert et le courant égale à zéro.

L'avantage principal d'utiliser le modèle à une diode est la simplification de circuit électrique équivalent qui permet de décrire le comportement de la cellule avec le minimum d'équations. Par contre, le modèle à deux diodes permet une présentation plus exacte de la cellule solaire [40].

A partir des points prélevés, il est possible de démontrer le système d'équations à résoudre :

$$\begin{cases} f_1(x) = x_1 - x_2 [e^{\beta_1(V_1+x_4I_1)} - 1] - x_3 [e^{\beta_2(V_1+x_4I_1)} - 1] - \frac{V_1+x_4I_1}{x_5} - I_1 \\ f_2(x) = x_1 - x_2 [e^{\beta_1(V_2+x_4I_2)} - 1] - x_3 [e^{\beta_2(V_2+x_4I_2)} - 1] - \frac{V_2+x_4I_2}{x_5} - I_2 \\ f_3(x) = x_1 - x_2 [e^{\beta_1(V_3+x_4I_3)} - 1] - x_3 [e^{\beta_2(V_3+x_4I_3)} - 1] - \frac{V_3+x_4I_3}{x_5} - I_3 \\ f_4(x) = x_1 - x_2 [e^{\beta_1(V_4+x_4I_4)} - 1] - x_3 [e^{\beta_2(V_4+x_4I_4)} - 1] - \frac{V_4+x_4I_4}{x_5} - I_4 \\ f_5(x) = x_1 - x_2 [e^{\beta_1(V_5+x_4I_5)} - 1] - x_3 [e^{\beta_2(V_5+x_4I_5)} - 1] - \frac{V_5+x_4I_5}{x_5} - I_5 \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Pour résoudre ce système d'équation on utilise l'algorithme itératif de Newton-Raphson.

III.3.3 Méthode du modèle de référence

Cette méthode utilise des signaux d'entrée-sortie pour identifier les paramètres des modèles mathématiques de structures variées. La figure (III.7) montre le schéma de principe de la méthode [41].

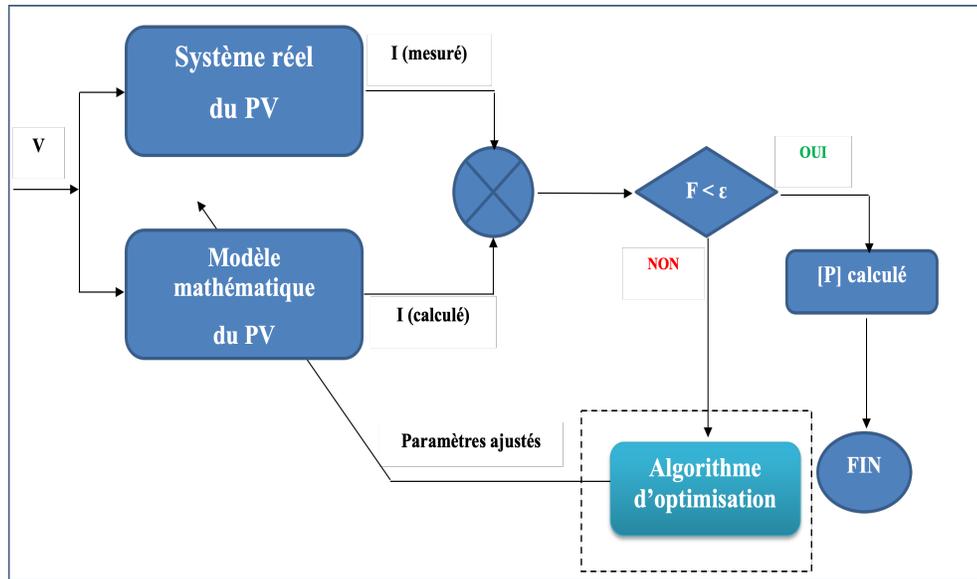


Figure III.7 Principe d'identification.

Les entrées-sorties sont mesurées pour le ou les régimes désirés (transitoire, permanent). L'estimation du vecteur paramètres est ensuite effectuée en minimisant le critère d'évaluation retenu. Ce dernier représente généralement l'erreur quadratique F entre les grandeurs mesurées sur le système et les grandeurs calculées avec la même tension V que le système [41].

Le problème consiste à trouver le minimum du critère quadratique F , fonction qui dépend des paramètres. Si le critère est linéaire par rapport aux paramètres, son minimum peut être calculé analytiquement par la méthode des moindres carrés par exemple. Par contre, si la fonction est non linéaire par rapport aux paramètres, la solution est approchée par des algorithmes itératifs de programmation non linéaire.

L'estimation des paramètres du panneau photovoltaïque à l'aide de la méthode du modèle de référence, c'est-à-dire l'approximation des valeurs expérimentales par un modèle mathématique, repose sur le choix d'un critère objectif qualifiant l'approximation mesure / modèle. L'écart entre les mesures effectuées sur le système réel et les valeurs calculées par simulation à partir du modèle est [41-42]:

$$\varepsilon(k) = I_m(k) - I_c(k) \quad k = 1, \dots, N \quad (\text{III.21})$$

Où N désigne la dimension du vecteur de mesure

Le but de l'estimation des paramètres est une minimisation de $\varepsilon(k)$ qui ne peut exactement s'annuler à cause des erreurs de mesures ou des erreurs de structure du modèle.

Si nous considérons comme critère F directement $\varepsilon(k)$, nous apercevons que les erreurs positives peuvent compenser les erreurs négatives sur l'ensemble des N mesures. Pour s'affranchir de cette contrainte, deux solutions existent:

- Considérer la valeur absolue de $\varepsilon(k)$;
- Considérer le carré de $\varepsilon(k)$.

L'élévation au carré est préférée à la valeur absolue car elle accorde plus d'importance aux grandes erreurs; elle permet donc une compensation mieux adaptée des paramètres.

Donc le critère quadratique s'écrit sous la forme suivante:

$$F = \sum_{k=1}^N \varepsilon(k)^2 = \sum_{k=1}^N (I_m(k) - I_c(k))^2 \quad (\text{III.22})$$

III.4 Techniques d'optimisation

Plusieurs méthodes d'optimisation sont proposées dans la littérature. Selon leurs approches de recherche de l'optimum, nous pouvons les classer comme suit [42]:

- Méthodes d'optimisation d'ordre zéro (ou déterministes sans calcul de dérivées)
- Méthodes d'optimisation d'ordre 1 et 2 (ou déterministes avec calcul de dérivées)
- Méthodes stochastiques

III.4.1 Méthodes d'optimisation d'ordre 1 et 2

Ces méthodes sont appelées aussi méthodes déterministes avec calcul de dérivées. Elles sont des méthodes analytiques. Elles sont basées sur une évaluation du gradient à chaque itération, et un déplacement suivant la direction du gradient. On peut citer parmi les méthodes d'optimisation d'ordre 1 : la méthode du gradient, la méthode du gradient conjugué, la méthode de Fletcher-Reeves. On peut citer parmi les méthodes d'optimisation d'ordre 2 : La méthode de Newton

III.4.2 Méthodes d'optimisation d'ordre zéro

Ces méthodes ne nécessitent aucun calcul de dérivées. Elles sont des méthodes d'exploration locale. Elles consistent, à partir d'une solution initiale, et par transformations successives, à construire une suite de solutions améliorant la fonction objectif. En explorant l'espace par essais successifs, elles recherchent les directions les plus favorables. De manière générale, le processus s'achève lorsqu'on ne peut pas améliorer la solution courante. On peut citer: Relaxation cyclique, Hooke et Jeeves, Rosenbrock, et la méthode du simplex de Nelder et Mead.

a. Relaxation cyclique

Dans notre travail, on applique la méthode du modèle de référence, en utilisant la technique de minimisation de l'erreur de sortie par la méthode de relaxation cyclique pour extraire les différents paramètres d'une cellule solaire avec une seule exponentielle.

Cette technique procède par minimisation unidirectionnelle successive le long des directions constituées par le vecteur paramètre en partant chaque fois du dernier point obtenu. Lorsque chaque variable a été examinée une fois, on peut recommencer un ou plusieurs cycles identiques jusqu'à ce que le critère d'arrêt de la procédure soit satisfait.

Le critère d'arrêt retenu est comme suit: $F \leq \text{eps}$, avec $\text{eps} = 10^{-6}$

Cette technique est présentée par la figure III.8 pour une itération et dans le cas de deux paramètres.

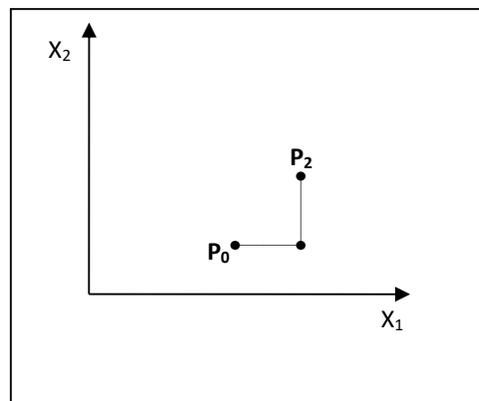


Figure III.8 Illustration de la méthode de relaxation cyclique à deux dimensions

L'organigramme de la méthode est présenté par la figure III.9

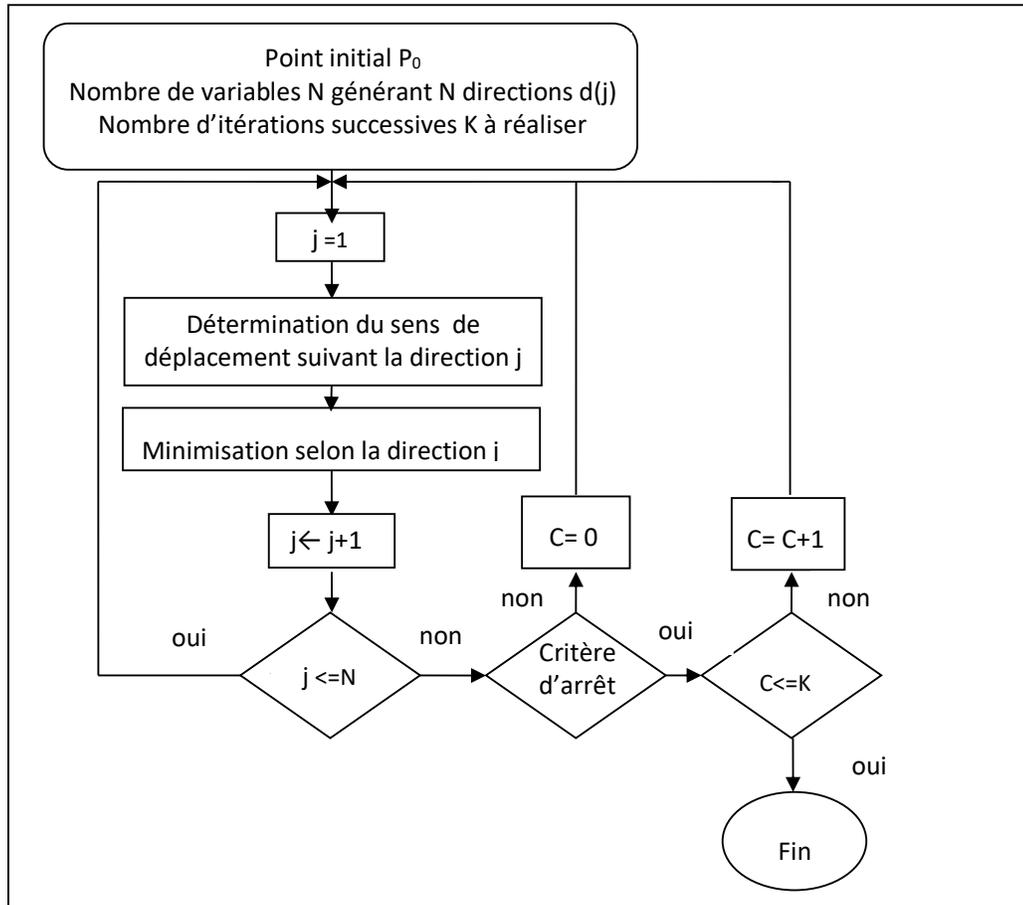


Figure III.9 Organigramme de la méthode de relaxation cyclique.

III.5 Résultats des données expérimentales

L'étude expérimentale a été réalisée sur un panneau solaire dont les caractéristiques électriques dans les conditions standard (1000 W/m², 25 °C, spectre AM1.5) sont récapitulées dans le Tableau III-1 suivant:

Paramètre	Valeur correspondante
Puissance maximale P_{max}	83.58 W
Tension en circuit ouvert V_{co}	21.21 V
Courant de court circuit I_{cc}	5.27 A
Tension puissance maximale V_{mp}	17.23 V
Courant puissance maximale I_{mp}	4.85 A
Nombre de cellule par module	72

Tableau III.1 Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.

Dans notre étude, nous avons effectué trois essais différents sur un panneau solaire, sous trois différentes températures (25° C, 50° C, 75° C).

Premier essai à T = 25° C.

La figure III.10 et la figure III.11 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V) mesurées pour le module solaire.

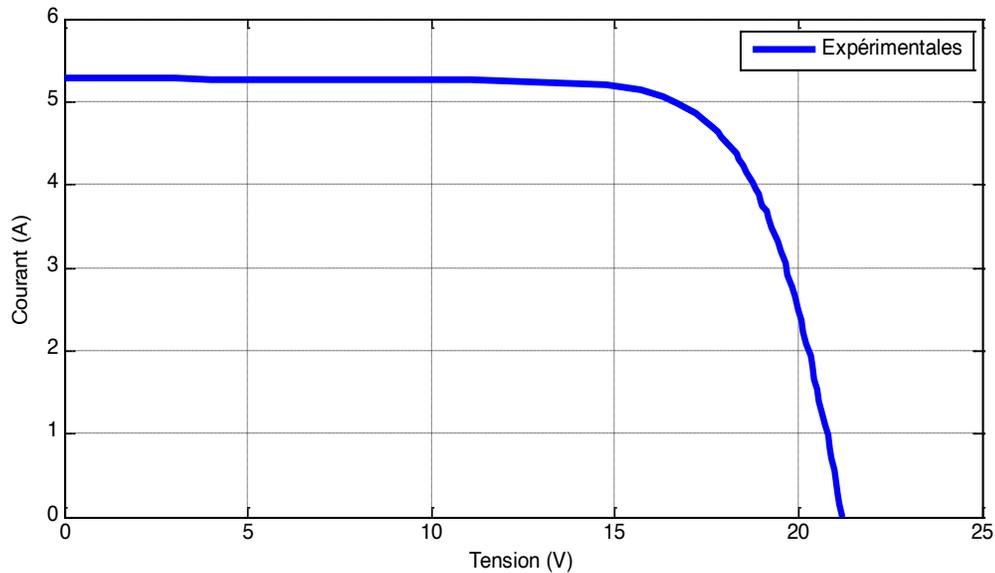


Figure III.10 Caractéristique I(V) expérimentale à 25°C.

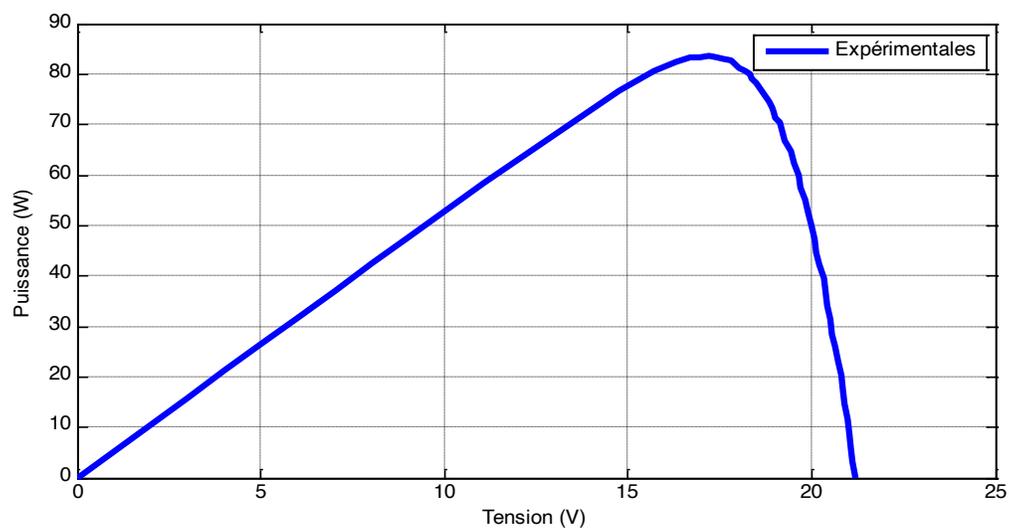


Figure III.11 Caractéristique P(V) expérimentale à 25°C.

L'identification du vecteur paramètres par le modèle de référence en utilisant la relaxation cyclique comme technique de minimisation est donnée comme suit:

I_{ph} (A)	I_s (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	A
5.3713	2.3958×10^{-10}	0.2592	67.3124	0.4638

Tableau III.2 : Résultats des paramètres identifiés à 25°C.

Les figures III.12 et III.13 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V), calculées à partir des paramètres identifiés.

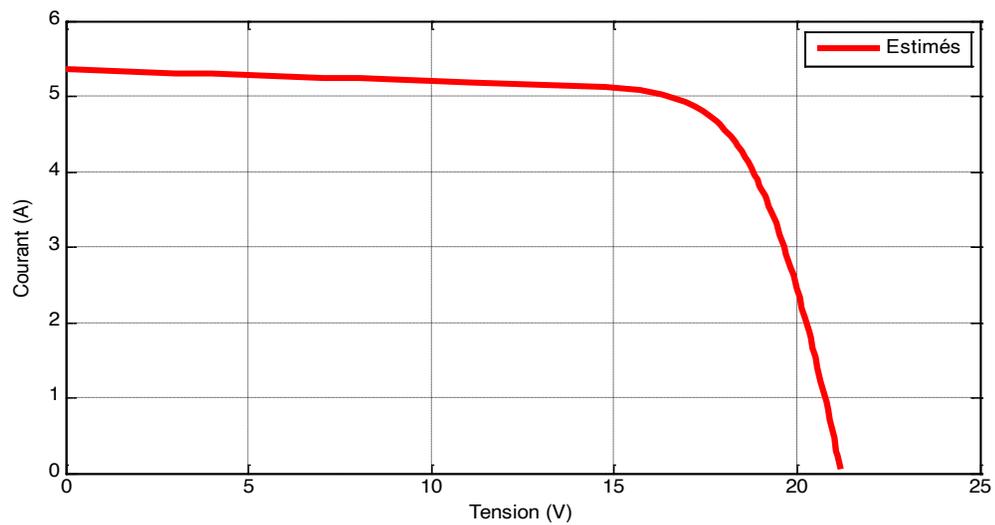


Figure III.12 Caractéristique I(V) estimée à 25°C.

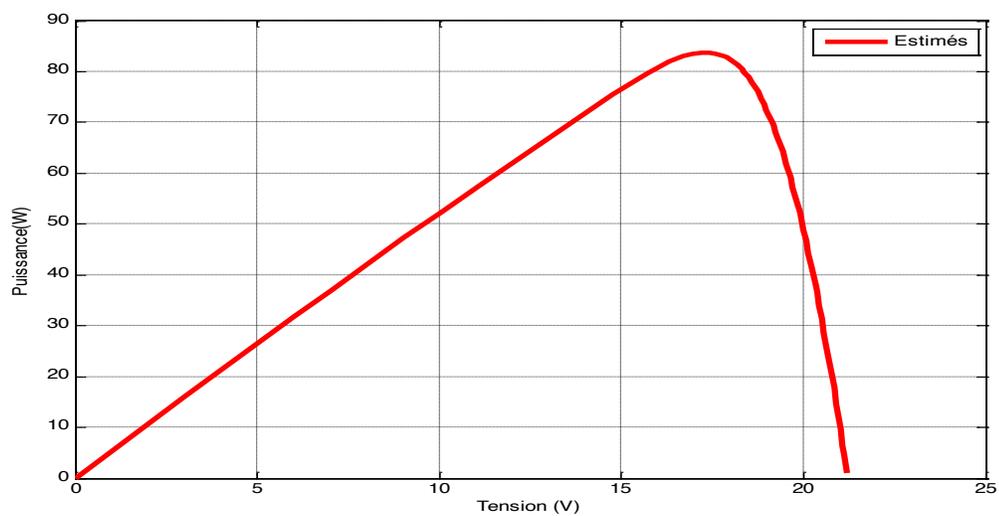


Figure III.13 Caractéristique P(V) estimée à 25°C.

Les superpositions des caractéristiques $I(V)$, $P(V)$, expérimentales et estimées sont illustrées par les figures suivantes :

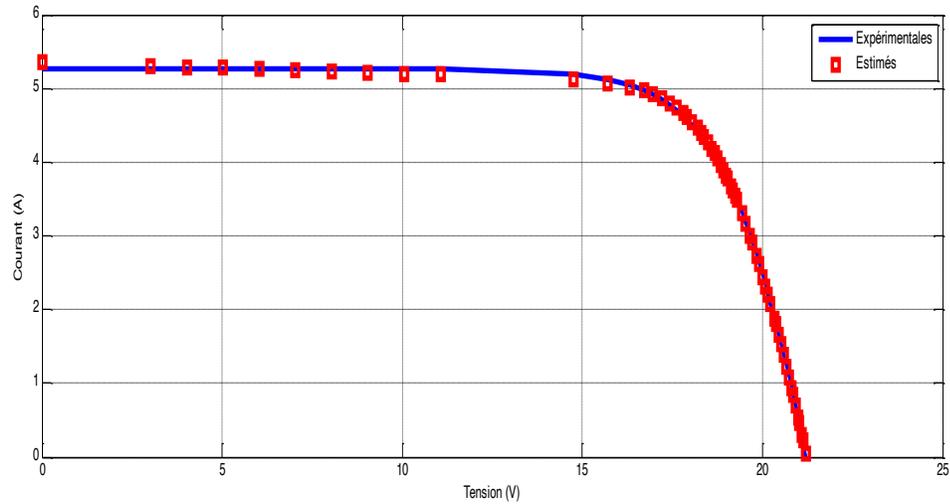


Figure III.14 Caractéristique $I(V)$ expérimentale et estimée à 25°C.

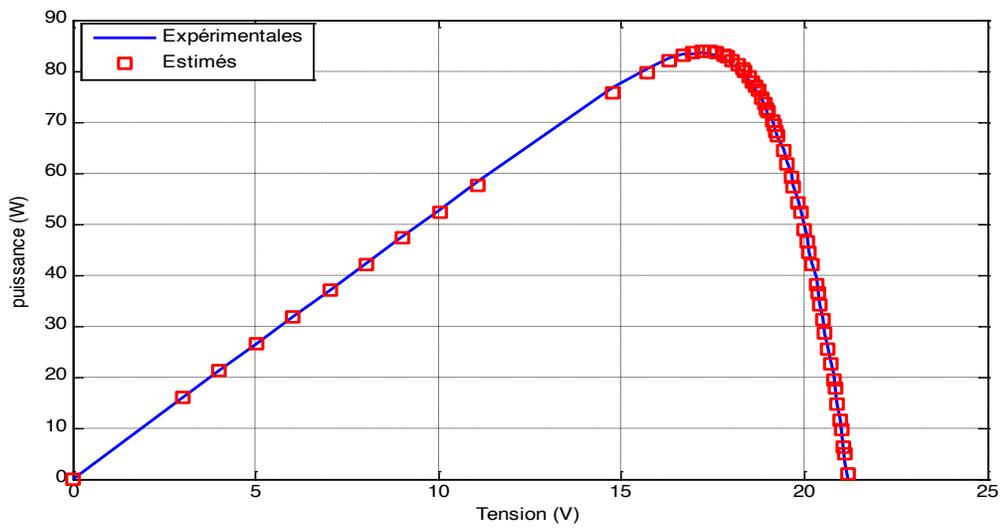


Figure III.15 Caractéristique $P(V)$ expérimentale et estimée à 25°C.

La figure III.16 représente l'écart entre les valeurs expérimentale et estimée

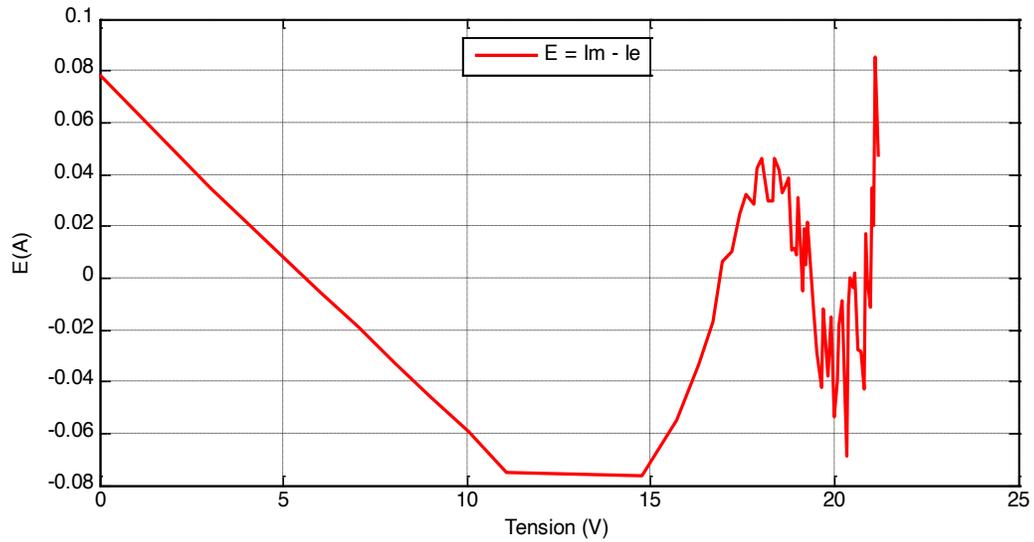


Figure III.16 L'erreur entre les valeurs expérimentale et estimée à 25°C.

Deuxième essai à $T = 50^\circ \text{C}$.

La figure III.17 et la figure III.18 représentent respectivement la caractéristique $I(V)$ et la caractéristique $P(V)$, mesurées pour le module solaire.

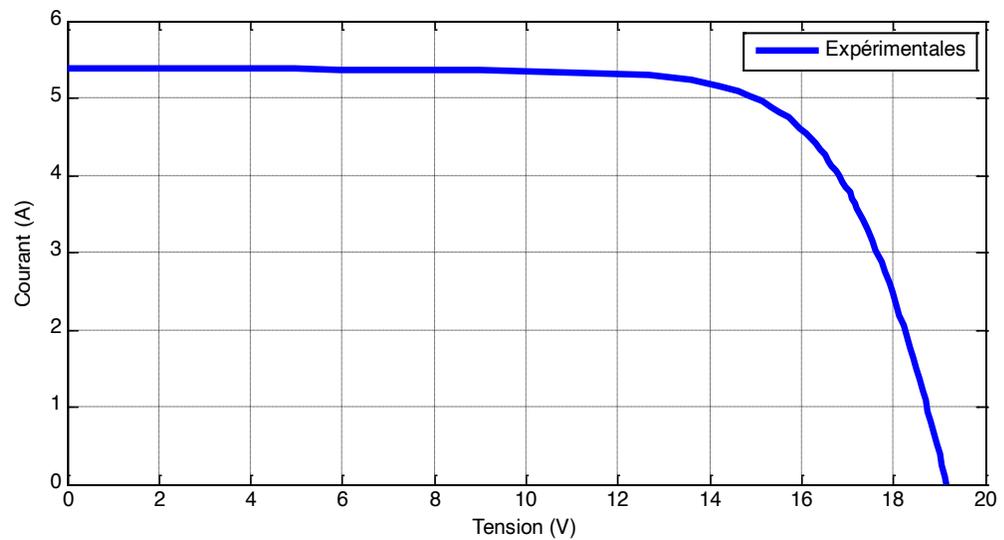


Figure III.17 Caractéristique $I(V)$ expérimentale à 50°C.

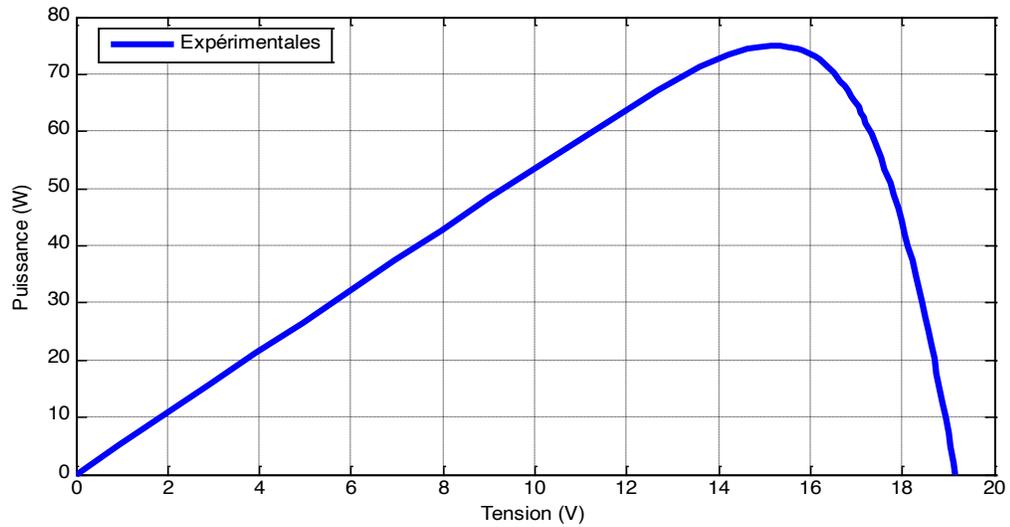


Figure III.18 Caractéristique P(V) expérimentale à 50°C.

L'identification du vecteur paramètres par le modèle de référence en utilisant la relaxation cyclique comme technique de minimisation est donnée comme suit:

I_{ph} (A)	I_s (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	A
5.4867	2.4983×10^{-10}	0.2824	49.7710	0.3874

Tableau III.3 : Résultats des paramètres identifiés à 50°C.

Les figures III.19 et III.20 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V), calculées à partir des paramètres identifiés.

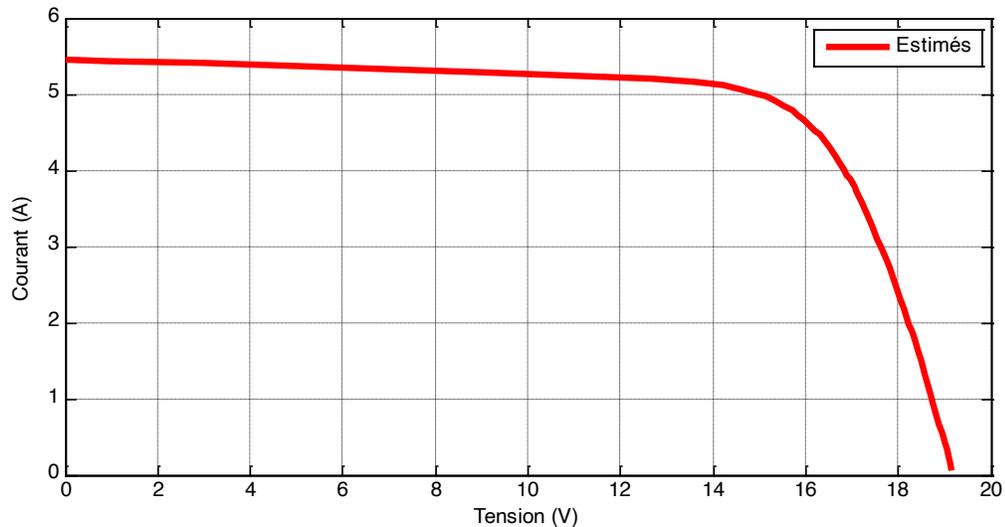


Figure III.19 Caractéristique I(V) estimée à 50°C.

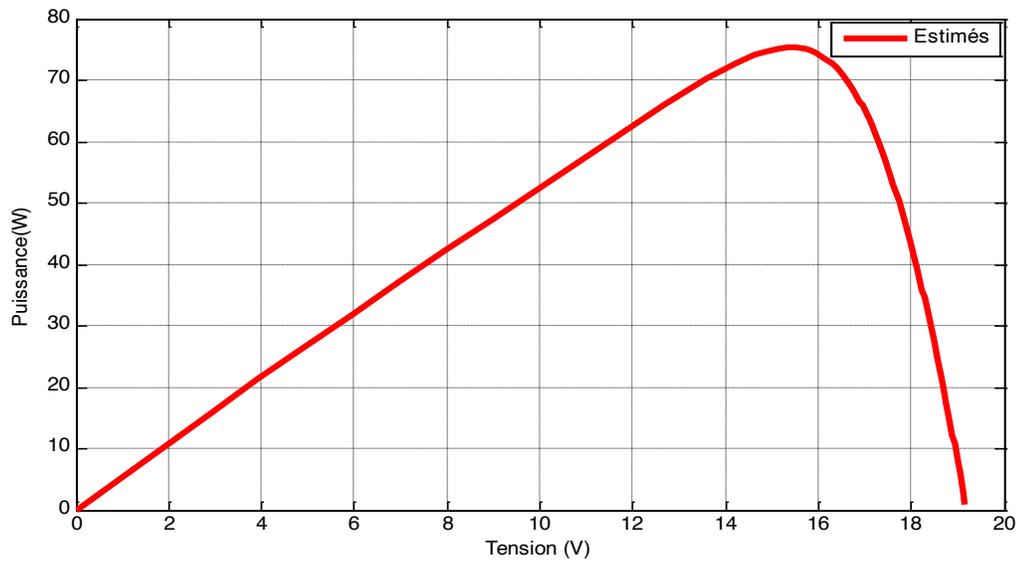


Figure III.20 Caractéristique P(V) estimée à 50°C.

Les superpositions des caractéristiques I(V), P(V), expérimentale et estimée sont illustrées par les figures suivantes :

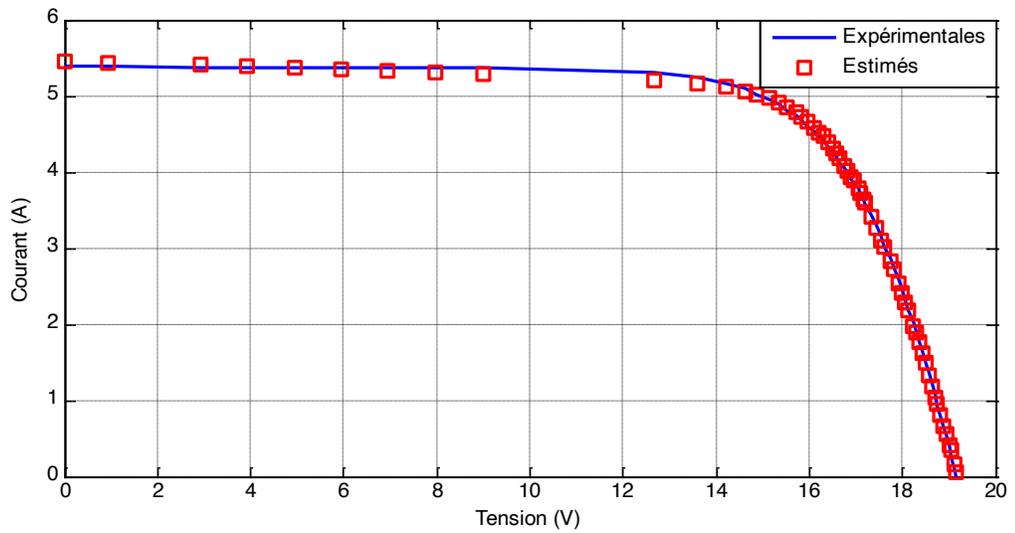


Figure III.21 Caractéristique I(V) expérimentale et estimée à 50°C.

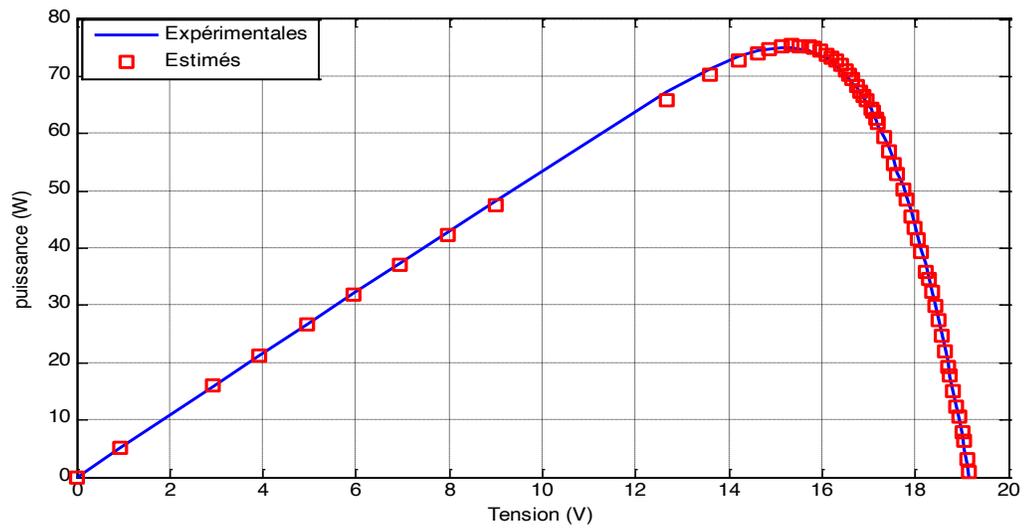


Figure III.22 Caractéristique P(V) expérimentale et estimée à 50°C.

La figure III.23 représente l'écart entre les valeurs expérimentale et estimée

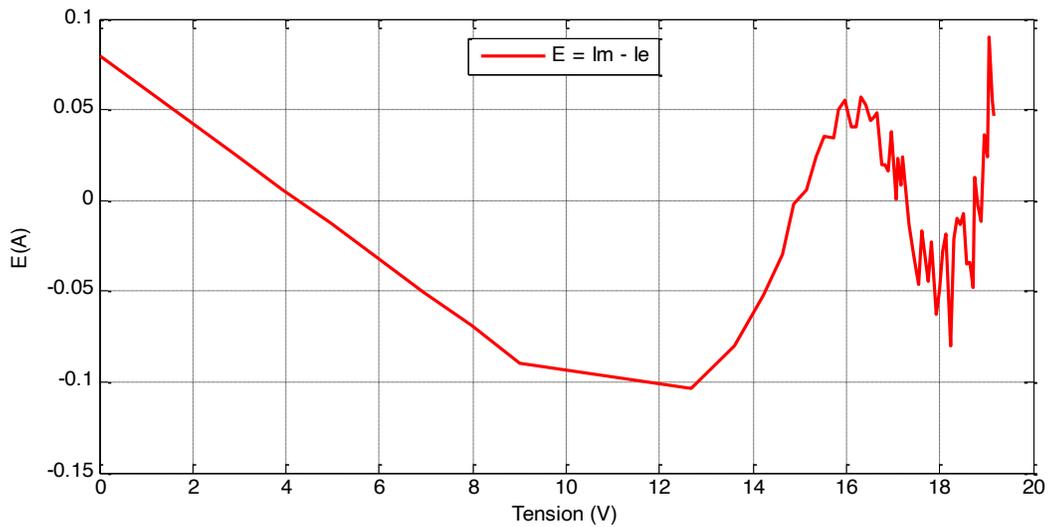


Figure III.23 L'erreur entre les valeurs expérimentale et estimée à 50°C.

Troisième essai à $T = 75^\circ\text{C}$.

La figure III.24 et la figure III.25 représentent respectivement la caractéristique $I(V)$ et la caractéristique $P(V)$, mesurées pour le module solaire.

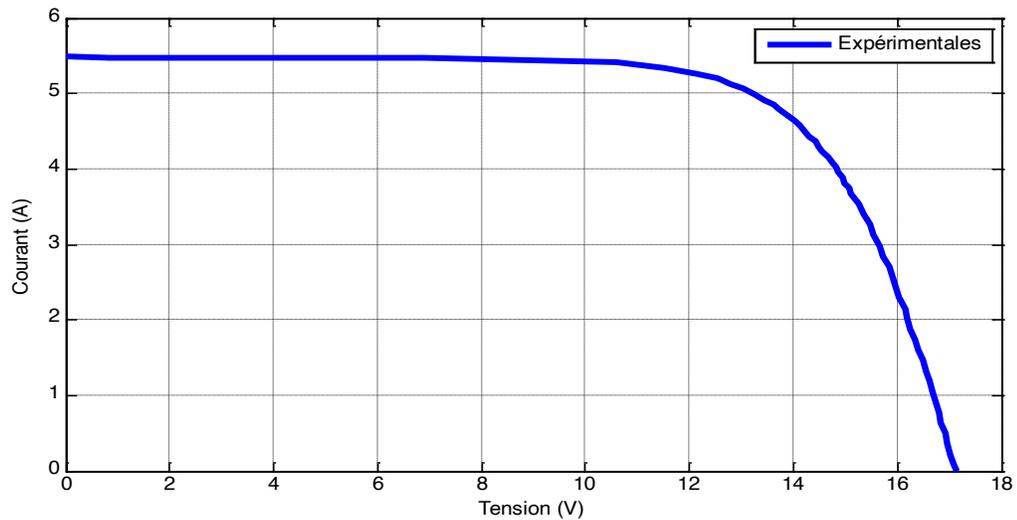


Figure III.24 Caractéristique $I(V)$ expérimentale à 75°C .

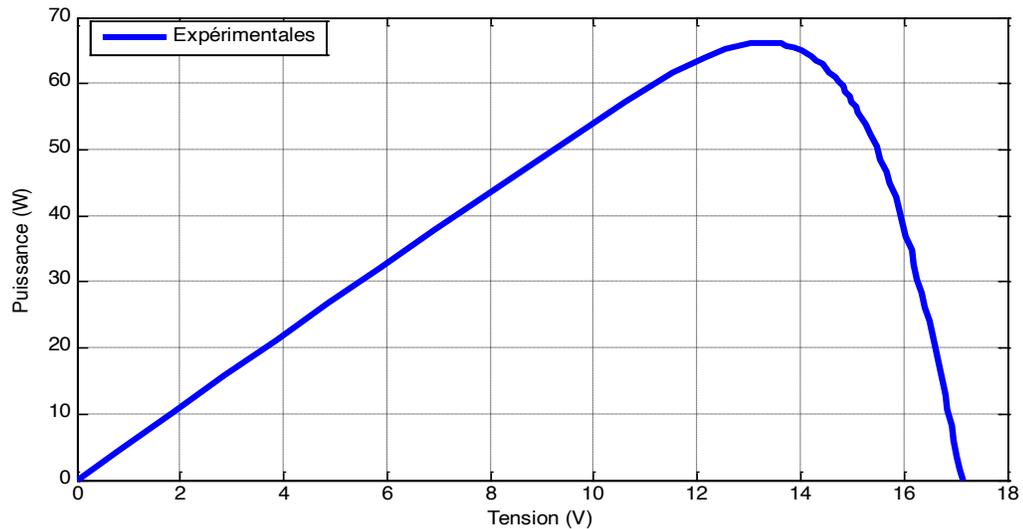


Figure III.25 Caractéristique $P(V)$ expérimentale à 75°C .

L'identification du vecteur paramètres par le modèle de référence en utilisant la relaxation cyclique comme technique de minimisation est donnée comme suit:

I_{ph} (A)	I_s (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	A
5.6072	3.0021×10^{-10}	0.3043	36.6525	0.3373

Tableau III.4 : Résultats des paramètres identifiés à 75°C.

Les figures III.26 et III.27 représentent respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V), calculées à partir des paramètres identifiés.

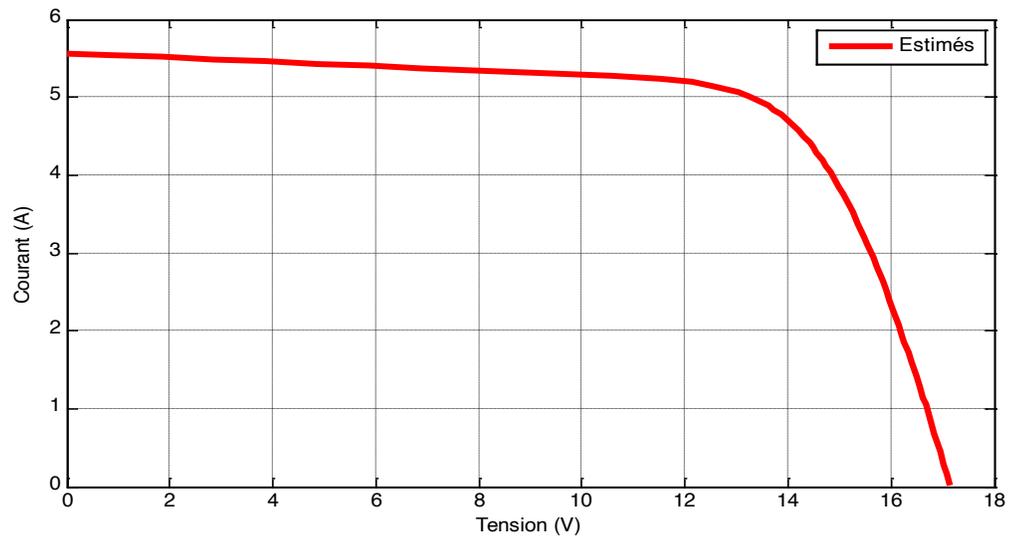


Figure III.26 Caractéristique I(V) estimée à 75°C.

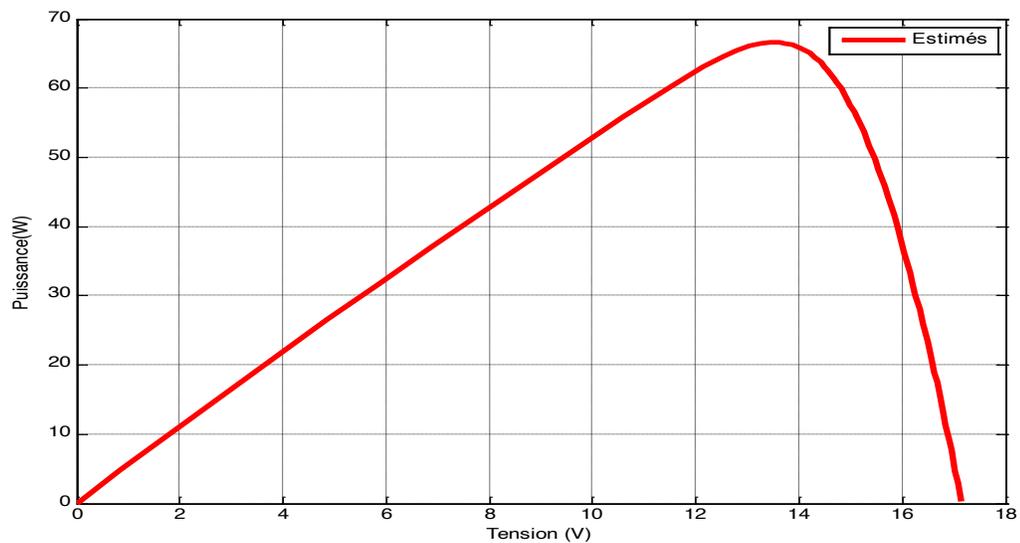


Figure III.27 Caractéristique P(V) estimée à 75°C.

Les superpositions des caractéristiques $I(V)$, $P(V)$, expérimentale et estimée sont illustrées par les figures suivantes :

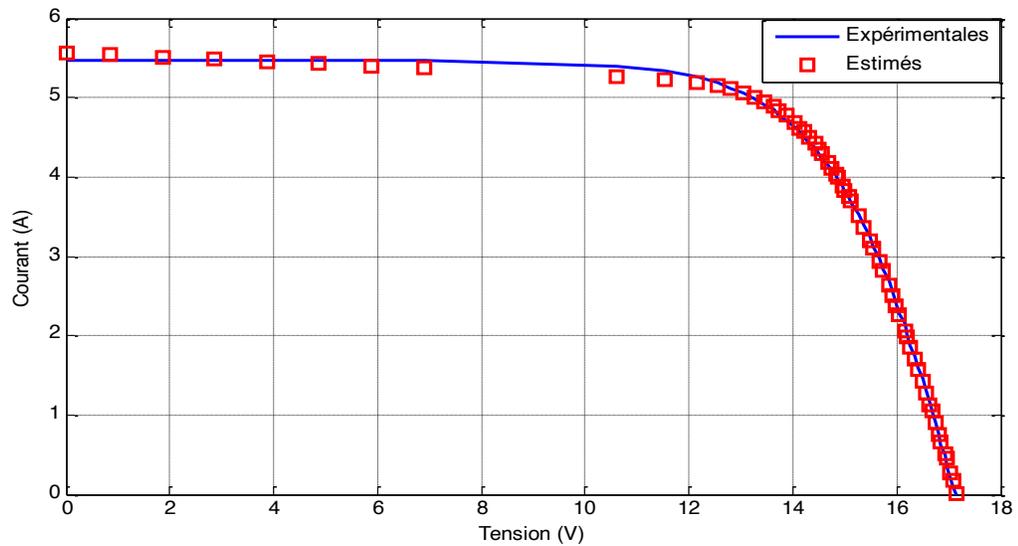


Figure III.28 Caractéristique $I(V)$ expérimentale et estimée à 75°C.

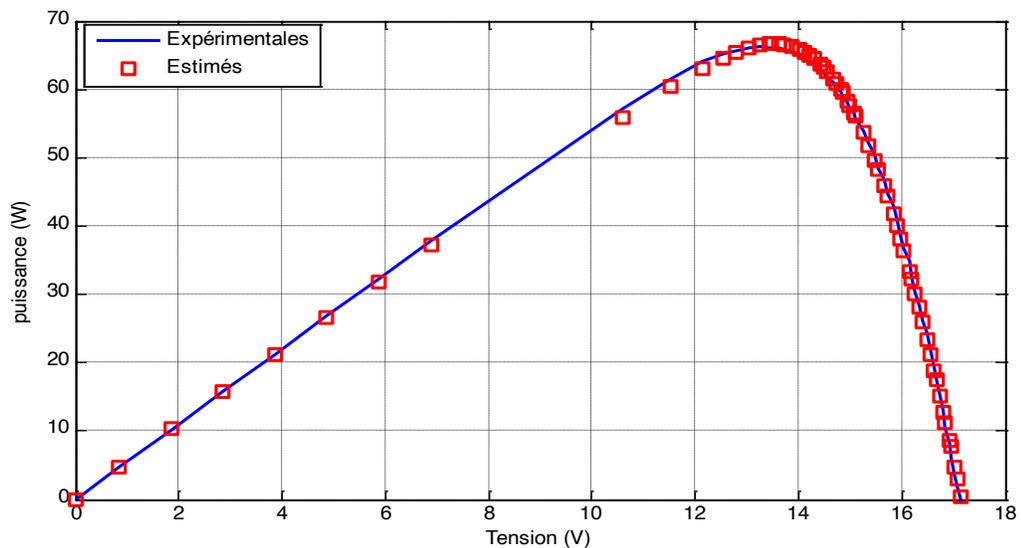


Figure III.29 Caractéristique $P(V)$ expérimentale et estimée à 75°C.

La figure III.30 représente l'écart entre les valeurs expérimentale et estimée

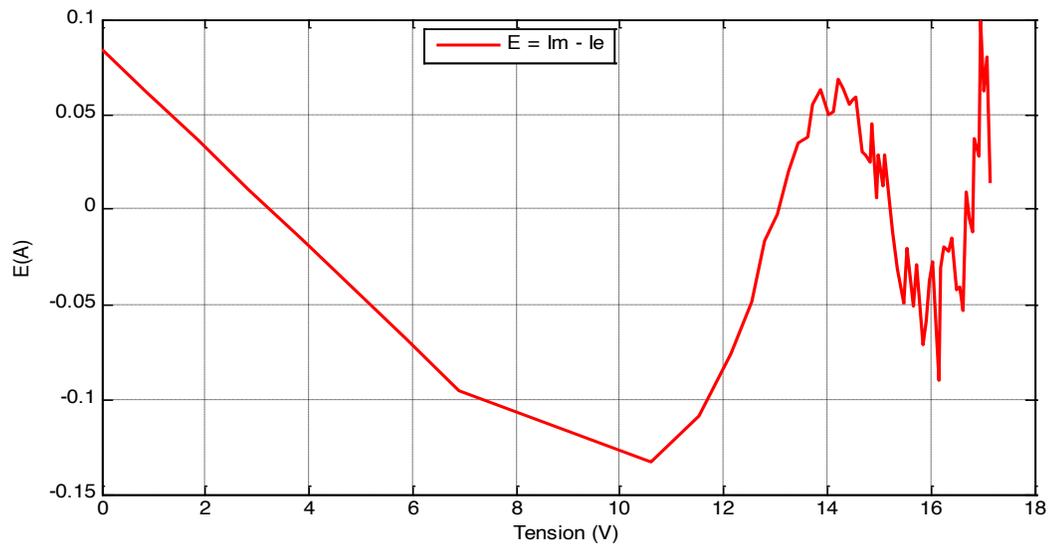


Figure III.30 L'erreur entre les valeurs expérimentale et estimée à 75°C.

III.5 Discussion des résultats

Les différents paramètres identifiés par cette méthode sont présentés dans les tableaux (III-2), (III-3) et (III-4).

A partir des figures III-14, III-15, III-21, III-21, III-28 et III-29, on remarque que la méthode de relaxation cyclique développée présente une bonne concordance entre les valeurs de la caractéristique $I(V)$, $P(V)$ expérimentale et estimée.

A partir des figures III-16, III-23, III-30, il est à noter que la méthode développée a la capacité d'assurer une meilleure minimisation de l'erreur.

On observe aussi que la température de la cellule photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant de la cellule photovoltaïque est négligeable.

Il apparaît que plus la température de la cellule augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance de la cellule étant égale au produit du courant et de la tension, la même règle s'applique sur la puissance, plus la température de la cellule augmente, plus la puissance de celle-ci diminue.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes d'identification des paramètres des cellules solaire éclairées, à savoir les méthodes appliquées au modèle à une seule diode. Les différentes techniques d'optimisation existant dans la littérature sont examinées.

Ensuite, nous avons adopté une méthode d'identification qui est basée sur l'optimisation à fin d'identifier ces paramètres à partir de la caractéristique $I(V)$ expérimentale, en s'appuyant sur le fait de minimiser l'erreur quadratique entre la valeur expérimentale et calculé du courant.

Les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux édités auparavant, les courbes montrent une bonne concordance entre les caractéristiques I-V expérimentale et calculée.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuse, avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins en grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Pour bien comprendre le comportement d'une cellule photovoltaïque, et être capable de simuler numériquement ces caractéristiques, à partir d'un modèle mathématique donné, il faut d'abord identifier leurs paramètres. C'était l'objectif de ce travail.

A cause de la complexité des méthodes d'identification, plusieurs méthodes d'extraction paramétrique ont été proposées auparavant, parmi lesquelles celles qui se basent sur les méthodes itératives qui est le cas de l'approche adoptée dans notre travail. Nous avons choisi la méthode de model de référence en introduisant l'algorithme de la relaxation cyclique.

L'application de la méthode d'identification choisi nécessite le choix du model électrique de la cellule photovoltaïque, Plusieurs modèles existent dans la littérature, le modèle choisi était le modèle à une seul exponentiels, Ce choix a été préféré, car ce modèle est simple loin des complexités de calcule envisagé dans les autre modèles.

Nous avons développé des programmes de calculs sous MATLAB 7.10 qui nous a permis d'identifier les paramètres des cellules étudiées, et de tracer les caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ calculé et de la comparer avec celle issue de l'expérimentation.

La détermination et l'extraction des paramètres d'une cellule solaire à jonction PN, est un sujet de travail qui s'intègre dans les efforts entrepris dans le but du contrôle de la qualité des cellules durant leurs fabrication ou l'analyse des performances de ces cellules une fois sur site. Les résultats obtenus à partir des caractéristiques I-V expérimentales sont comparable à ceux déjà obtenu par d'autres méthodes et une bonne concordance ont été remarquée.

Comme perspective : Réaliser un banc permettant d'implémenter et de tester des lois de commande pour différentes applications.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] K.Touafek, "*Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique*", mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [2] M.SLAMA Fateh, "*Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique*" mémoire de magister, département d'Électrotechnique, université FARHAT Abbas, Sétif, 2011.
- [3] T.Desrus, "*Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière*", thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [4] S. Petibon, "*Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*", thèse de doctorat, université Paul Sabatier – Toulouse III, 2009.
- [5] S. Quoizola, "*Épitaxie en phase vapeur de silicium Sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût*", thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007.
- [6] B. Equer, "*Energie solaire photovoltaïque*", Volume 1, Ellipses Editions, ISBN: 2-7298-9345-8, Paris, 1993.
- [7] A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami & Z. Mokhtari, "*estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra*", 8^{ème} séminaire international sur la physique énergétique, centre universitaire de Bechar, Algérie, Novembre 2006.
- [8] "chapitre 4 évaporation et interception" cour du rayonnement solaire sur internet (Google), <https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre4.html>
- [9] F. HEROGUEL, "*les cellules photovoltaïques*," Ecole Normale Supérieure, Lyon Epreuve de projet, 2007.
- [10] La fabrication des cellules photovoltaïques « *Hallou Solaire* » (Google).

[11] S.NAOUAL, "*Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur*", Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique 2010.

[12] J. Labbe "*l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolés* ", thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 21 décembre 2006.

[13] J. Bernard, énergie solaire, "*calculs et optimisation*", édition ellipses 2004.

[14] R. Issad, "*Etude de contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque*", Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2007-2008.

[15] site internet <http://www.atersa.com/fr/nous-connaître/applications-energie-solaire-photovoltaïque>.

[16] N.TKOUTI "*Optimisation des systèmes photovoltaïques connectés au réseau par la logique floue*", mémoire d'ingénieur, université de Biskra, 2003-2004.

[17] B.LOUZAZNA et S.MADI, "*Etude et caractérisation d'un panneau photovoltaïque type Condor*", mémoire de master, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique Université A.MIRA Bejaia, 2014-2015.

[18] R. Khenfer, "*Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques*", thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas de Sétif Faculté de Technologie, 2015.

[19] "*Cellule Solaire: Modele-Spice-Fiche technique*", giamarchi@iut-nimes.fr I.U.T. de Nîmes, 5 février 2008.

[20] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho, "*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 24, NO. 5, MAY 2009.

[21] J.Royer, T. Djiako, "*Le pompage photovoltaïque* ". Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.

- [22] N.Saadna et A.OUAZAR, "*Méthodes d'identification des Panneaux photovoltaïques*", mémoire de master, Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique Université A.MIRA Bejaia, 2015.
- [23] L. Bun, "*Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV*", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [24] A. Reinders, "*A design method to assess the accessibility of light on PV cells in an arbitrary geometry by means of ambient occlusion*", in Proceedings of 22nd of photovoltaic solar energy conference and exhibition. Milan. 2007.
- [25] A. Woyte, J. Nijs and R. Belmans, "*Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations: literature review and field test results*", Sol. Energy, vol. 74, no. 3, pp. 217–233, 2003.
- [26] N.NEHAOUA, "*détermination des paramètres d'une photopile solaire à jonction* ", mémoire de magister, Faculté des sciences, Département de physique, Université Farhat ABBAS. Sétif, 2015.
- [27] A.B. Legarreta, "*Réalisation de Technique MPPT numérique*", Rapport de stage projet de fin d'études Ingénieur Technique Industrielle, Université Virgile, Septembre 2006.
- [28] D. Rekioua and E. Matagne, "*Optimization of photovoltaic power systems*", book, Springer-Verlag London Limited 2012.
- [29] J. W. Bishop, "*Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits*", Sol. cells, vol. 25, no. 1, pp. 73–89, 1988.
- [30] A. Zegaoui, P. Petit, M. Aillerie, J. P. Sawicki, A. W. Belarbi, M. D. Krachai, and J. P. Charles, "*Photovoltaic cell/panel/array characterizations and modeling considering both reverse and direct modes*", Energy Procedia, vol. 6, pp. 695–703, 2011.
- [31] X. Qingshan, S. Jing, B. Haihong, K. Yukita, and K. Ichiyanagi, "*Analysis of Photovoltaic Array Performance under shaded conditions*", in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, 2010, pp. 1–4.
- [32] Z.FARES, "*Utilisation des énergies renouvelables influence de la température sur les performances du module PV*", Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie, 2016.

- [33] André Fortin, "*Analyse numérique pour ingénieur*", Edition Ecole polytechnique de Montréal, (2000).
- [34] Javier Cubas, Santiago Pindado, Assal Farrahi, "*New Method for Analytical Photovoltaic Parameter Extraction*", Instituto de Microgravedad Ignacio da Riva Universidad Politecnica de Madrid Madrid, Spain. Oct 2013.
- [35] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "*Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays*", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [36] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "*PV panel model based on datasheet values*", *Electrical Engineering*, no. 4, pp. 2392-2396, 2007.
- [37] G. Walker, "*Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model*", Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, vol. 21, no. 1, pp. 49-55, 2001.
- [38] W. Xiao, W. G. Dunford and A. Capel, "*A novel modeling method for photovoltaic cells*", 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), pp.1950-1956, 2004.
- [39] K. L. Kennerud, "*Analysis of Performance Degradation in*", IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems, no. 6, 1969.
- [40] A. MAOUACHA, "*Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique*", Mémoire de magister. Université de Batna, Algérie, 2011.
- [41] E. Walter, L. Pronzato, « Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales », Ed. Masson 1994
- [42] M. Bounekhla, M.E. Zaim and A. Rezzoug, "Comparative study of three minimization methods applied to the induction machine parameters identification using transient stator current", *Electric Power Components and Syst.*, vol.33, n°8, pp. 913-930, 2005.