

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Instrumentation**

Thème :

Modélisation Avancée d'un Panneau Solaire

Présenté par :
Ismail HADDAD

Sous la direction de :

Pr .Moussa SEDRAOUI

Juillet 2019

Résumé

Ce travail porte les détails de la modélisation du comportement réel d'un panneau solaire de type ISOFOTON I-50 PV module. Cette modélisation est effectuée par deux circuits électriques équivalents à savoir : le circuit équivalent comportant une seule diode et l'autre circuit possédant deux diodes. L'identification des paramètres de chaque circuit précédent nécessite préalablement la détermination du vecteur de courant prédit par le modèle PV souhaité. Celle-ci peut être assurée via la résolution d'une équation non linéaire à plusieurs paramètres et c'est pour cette raison qu'on a présenté deux catégories des méthodes de résolution en l'occurrence : les méthodes utilisant les mesures expérimentales du panneau solaire et une méthode utilisant les caractéristiques spécifiant le panneau. Pour la première catégorie, on a une base de données formée de 256 mesures réelles de courant et de tension enregistrées à partir du panneau suscité. Ces données sont exploitées pour résoudre l'équation du courant en utilisant l'un de ces trois méthodes suivantes : Méthode de Newton Raphson, Méthode utilisant la fonction de Lambert-W et la méthode Fsolve disponible dans la bibliothèque du logiciel Matlab. Une fois le vecteur du courant prédit est obtenu, on fait un appel à l'optimisation par les algorithmes évolutionnaires comme les algorithmes génétiques GA et l'algorithme d'essaim particulaire PSO. Ces algorithmes ont pour but d'optimiser les paramètres des circuits électriques cités précédemment et cela via la solution optimale d'un problème d'optimisation sous contraintes. La fonction objective de ce problème représente la somme des erreurs quadratiques moyennes fournies par la distance entre les mesures réelles du courant et les valeurs des courants prédits par le modèle souhaité. Les contraintes représentent les limites supérieures et inférieures dans lesquelles on cherche la valeur optimale de chaque paramètre construisant le modèle PV. Pour la deuxième catégorie, elle est basée sur les données spécifiques du panneau solaire à modéliser. Ces dernières représentent la puissance maximale du panneau, la tension et le courant nominal du panneau, ..., etc. Dans ce cas, les paramètres optimaux du modèle souhaité peuvent être obtenus via la résolution d'un système d'équations non linéaires. Cette catégorie ne représente pas l'objet de notre travail. Pour la première catégorie, la modélisation est effectuée par les deux types de circuit électrique ou chaque circuit est présenté par un nombre spécifique des paramètres inconnus. Les performances des modèles sont évaluées et comparées entre elles. Les résultats de simulation confirment l'efficacité du modèle à double diode qui assure à chaque fois la meilleure précision. Néanmoins, la convergence de l'algorithme d'optimisation utilisé devient plus certaine par le modèle d'une seule diode que celui de deux diodes et cela à cause du nombre réduit des paramètres à optimiser.

Mots clés : Systèmes photovoltaïques PV ; Circuit électrique d'une seule diode et de double diodes ; les algorithmes génétiques GA ; l'algorithme d'essaim particulaire PSO ; Méthode de Newton Raphson ; Fonction de Lambert-W ; Fonction fsolve de l'environnement du Matlab

ABSTRACT

This work presents the parameter identification of the photovoltaic model based on both single and double diode. These models are designed through some experimental data recorded through actual ISOPHOTON I-50 PV panel. The modeling step presented in this work requires in advance on solving a nonlinear PV current equation. For this reason, two categories of resolution methods will be presented in this manuscript. The first one is based on actual measurements PV recorded experimentally from an experimental test. Accordingly, the predicted PV current vector can be determined using the three following methods: Newton Raphson, Lambert-W based-method and Fsolve based-Matlab software. On the other hand, the second category is based on PV panel characteristics such as: the maximal electrical power, nominal voltage and current and so on. Accordingly, the predicted PV current can be determined through solving some nonlinear equations.

Once, the predicted PV current is determined by one of the above mentioned methods, the PV model parameters are then optimized by either evolutionary optimization algorithms: genetic algorithm or particle swarm optimization. Indeed, the optimization problem to be solved contains the fitness function and some upper and lower constraints limiting the design PV model. Accordingly, the fitness function can be formulated through the current discrepancy generated at each sampling time between the actual PV current and the corresponding predicted one. The modeling PV cell is ensured by several equivalent electrical circuits based-single and double diodes where each one is characterized by the number of the unknown parameters to be optimized. The performances provided by each PV model are evaluated and compared by the other ones.

The given simulation results show the effectiveness of each model in term of the modeling accuracy and electrical characteristics. As a result, the PV model based-double diode allows ensuring a good modeling accuracy over the PV model based-single diode. However, this last becomes simpler and the corresponding optimization convergence becomes more guaranteed than the one provided by the PV model based-double diode.

Key-words: Photovoltaic; electrical circuit based- single and double diode; Genetic Algorithm; Particle Swarm Optimization; Lambert-W function, Fsolve function; Newton Raphson method

ملخص

يعرض هذا العمل تعريف المعلمات للنموذج الكهروضوئي على أساس كل من الصمام الثنائي والمزدوج. تم تصميم هذه النماذج مع بعض البيانات التجريبية التي سجلتها لوحة ISOPHOTON I-50 PV. تتطلب خطوة النمذجة المقدمة في هذا العمل حل مسبقاً لمعادلة التيار الكهربائي الغير خطية. لهذا السبب، سيتم عرض فئتين من أساليب الحل في هذه العمل. يعتمد الأول على قياسات PV الفعلية المسجلة تجريبياً من اختبار تجريبي. وفقاً لذلك، يمكن تحديد التيار الكهروضوئي المتنبأ به باستخدام الطرق الثلاثة التالية: نيوتن رايفسون، وطريقة Lambert-w، وطريقة fsolve الخاصة ببرنامج Matlab. من ناحية أخرى، تعتمد الفئة الثانية على خصائص الألواح الكهروضوئية مثل: الطاقة الكهربائية القصوى والجهد الاعظمي والتيار وما إلى ذلك. وفقاً لذلك، يمكن تحديد التيار الكهروضوئي المتوقع من خلال حل بعض المعادلات غير الخطية.

ويتم تحديد التيار الكهروضوئي المتوقع من خلال إحدى الطرق المذكورة أعلاه، ثم يتم تحسين المعلمات نموذج الكهروضوئية إما عن طريق خوارزميات التحسين التطوري: الخوارزمية الجينية أو خوارزمية سرب الجسيمات. في الواقع، تحتوي مشكلة التحسين التي يتعين حلها على وظيفة اللياقة وبعض القيود العلوية والسفلية التي تحد من نموذج التصميم الكهروضوئي. وفقاً لذلك، يمكن صياغة وظيفة اللياقة من خلال التناقض الحالي المتولد في كل وقت لأخذ العينات بين التيار الكهروضوئي الفعلي وتلك المقابلة المتوقعة. يتم نمذجة الخلية الضوئية من قبل العديد من الدوائر الكهربائية القائمة على احادي او ثنائي الصمام الثنائي حيث يتميز كل واحد بعدد المعلمات المجهولة التي يجب تحسينها. يتم تقييم الأداء المقدم من قبل كل نموذج PV ومقارنتها من قبل الآخرين.

تظهر نتائج المحاكاة المعينة فعالية كل نموذج من حيث دقة النمذجة والخصائص الكهربائية. ونتيجة لذلك، يسمح نموذج PV القائم على ثنائي الصمام الثنائي ضمان دقة جيدة للنمذجة مقارنة بنموذج PV القائم على احادي الصمام الثنائي. ومع ذلك، يصبح هذا الأخير أكثر بساطة ويصبح تقارب التحسين المطابق مضموناً أكثر من ذلك الذي يوفره نموذج PV القائم على ثنائي الصمام الثنائي.

الكلمات المفتاحية: الضوئية، الدائرة الكهربائية القائمة على احادي او ثنائي الصمام الثنائي؛ الخوارزمية الجينية، خوارزمية سرب الجسيمات، وظيفة lambert-W، وظيفة Fsolve؛ طريقة نيوتن رافسون.

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier dieu qui nous a aidé et donné la volonté et la résistance pour réaliser un travail de projet de fin d'étude.

Je tiens particulièrement à remercier Monsieur SEDRAOUI Moussa, professeur au département Télécommunication et Electronique, de l'Université 8 mai 1945 Guelma, pour avoir accepté d'assurer l'encadrement de ce travail. Il a toujours fait preuve d'une importante disponibilité au cours de ce travail et pendant la rédaction de ce manuscrit. Son suivi permanent, ses orientations efficaces, ses conseils précieux et ses qualités humaines m'ont permis de réaliser convenablement les différentes étapes du sujet.

Je m'adresse mes vifs remerciements aux membres de jury, d'avoir accepté lire, commenter et débattre mon travail.

Ce succès d'aujourd'hui, nous le devons également à nos enseignants du département de Télécommunication et Electronique notamment le chef de département et ses adjoints.

J'ai le plaisir de remercier toute personne, qui de près ou de loin a généreusement contribué à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

Louange à Dieu Le Tout Puissant,

Celui qui m'a éclairé le chemin du savoir,

Celui qui m'a donné la force et a ouvert mon esprit sur la science,

Et grâce à son aide, j'ai su choisir ce thème et j'ai pu réaliser ce modeste travail,

Que je dédie :

A mon Père qui a fait de moi la personne que je suis,

Qui n'avait jamais épargné ses efforts pour me propulser vers l'avant de mes études,

Il est à qui je dois toute ma vie,

A ma très chère Mère,

Celle que je trouve toujours à mes côtés, qui constitue pour moi la source du courage,

A mon très Cher Frère Chawqí,

A Amína ma sœur, qui m'est très chère,

A toute ma famille,

A tout mes amis.

Ismaíl

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Figure 1.1. Composants du rayonnement solaire.	4
Figure 1.2. Schéma explicatif d'une cellule solaire	6
Figure 1.3. Cellule photovoltaïque monocristalline	7
Figure 1.4. Cellule photovoltaïque poly-cristalline	8
Figure 1.5. Cellule photovoltaïque amorphe	9
Figure 1.6. Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_s cellules en série	11
Figure 1.7. Caractéristique résultantes d'un regroupement de N_p cellules en parallèle	12
Figure 1.8. Caractéristique regroupement (série et parallèle).	12
Figure 1.9. Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome	13
Figure 1.10. Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.	14

Chapitre 2 :

Figure 2.1. Circuit électrique équivalent modélisant une cellule photovoltaïque	17
Figure 2.2. Caractéristique I-V-P du panneau PV	29
Figure 2.3.a. Comparaison des courants réel et prédit (cas du modèle PV à quatre paramètres).	32
Figure 2.3.b. Comparaison des puissances fournies par le système PV et le modèle à quatre paramètres correspondant.....	33
Figure 2.4.a. Caractéristique I-V (comparaison) « cas du modèle PV à quatre paramètres ».	34
Figure 2.4.b. Caractéristique P-V (comparaison) « cas du modèle PV à 4 paramètres ».	34
Figure 2.5.a. Comparaison des courants réel et prédit (cas du modèle PV à trois paramètres)	35
Figure 2.5.b. Comparaison des puissances fournies par le système PV réel et le modèle correspondant à trois paramètres	36
Figure 2.6.a. Caractéristique I-V (comparaison) « cas du modèle PV à trois paramètres ». ..	36
Figure 2.6.b. Caractéristique P-V (comparaison) « cas du modèle PV à trois paramètres ». ..	37

Chapitre 3 :

Figure 3.1. Circuit électrique équivalent à double diode de la cellule solaire.....	38
Figure 3.2. Comparaison des deux courants prédit et réel : cas du modèle PV à double diode comportant cinq paramètres inconnus.....	46

Figure 3.3. Comparaison des puissances du panneau et du modèle à double diode qui comporte cinq paramètres inconnus.	47
Figure 3.4. Caractéristique I-V du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus	47
Figure 3.5. Caractéristique P-V du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus.	48
Figure 3.6. Comparaison du courant mesuré avec celui prédit par le modèle à double diode comportant quatre paramètres inconnus.....	49
Figure 3.7. Comparaison des puissances du panneau et du modèle à double diode comportant cinq paramètres inconnus	49
Figure 3.8. Caractéristique I-V du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant quatre paramètres inconnus.	50
Figure 3.9. Caractéristique P-V du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant quatre paramètres inconnus.	50
Figure 3.10. Caractéristique courant-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques	51
Figure 3.11. Caractéristique courant-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques	52
Figure 3.12. Caractéristique puissance-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques	53
Figure 3.13. Caractéristique puissance-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques	53

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1 :

Tableau 1-1. Différents types des cellules avec leur rendement 10

Chapitre 2 :

Tableau 2-1. Données utilisées pour la modélisation de la cellule PV 19

Tableau 2-2. Caractéristiques électriques typiques du panneau PV 31

Tableau 2-3. Comparaison des erreurs fournies par les trois méthodes de résolution citées précédemment 31

Tableau 2-4. Modèle PV à quatre paramètres 32

Tableau 2-5. Paramètres optimaux du modèle PV à trois paramètres 35

Chapitre 3 :

Tableau 3-1. Paramètres optimaux du modèle PV à double diode (cas de cinq paramètres inconnus) 46

Tableau 3-2. les quatre meilleurs paramètres optimaux du modèle fournis par l'algorithme PSO 49

Tableau 3-3. Paramètres optimaux des deux modèles PV d'une seule et double diode (comparaison avec les mesures réelles du panneau solaire)..... 51

Tableau 3-4. Les puissances maximales obtenues pour les deux modèles mathématiques d'une cellule PV 52

Table des matières

Résumé	
Remerciements	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des matières	
Introduction générale	1
<u>Chapitre 1: Généralité sur le système photovoltaïque</u>	
1. Introduction	3
1.1. Aperçu sur l'énergie solaire	3
1.2. Aperçu sur le rayonnement solaire	3
1.3. Aperçu sur l'effet photovoltaïque.....	5
1.4. La cellule photovoltaïque	5
1.4.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	6
1.4.2. Différents types et technologies de cellules photovoltaïques	7
1.4.2.1. Cellules monocristallines	7
1.4.2.2. Cellules poly-cristallines	8
1.4.2.3. Cellules amorphes	8
1.4.2.4. Autre technologies.....	9
1.4.2.5. Rendement des cellules :	10
1.5. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	10
1.5.1. Association des cellules photovoltaïques en série.....	11
1.5.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle	11
1.5.3. Association des cellules photovoltaïques mixte (série et parallèle)	12
1.6. Classification des systèmes photovoltaïques	13
1.6.1. Système isolé ou autonome	13
1.6.2. Système raccordé au réseau	13
1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	14
1.8. Conclusion.....	15

Chapitre 2 : Modèle PV à une seule diode

2. Introduction	16
2.1. Description du circuit électrique équivalent d'une seule diode	17
2.1.1. Modèle mathématique à quatre paramètres inconnus	20
2.1.2. Modèle mathématique à trois paramètres inconnus	20
2.2. Calcul du courant I_{pv} prédit	20
2.2.1. Méthode de Newton-Raphson	21
2.2.2. Fonction de <i>Lambert-W</i>	21
2.2.3. Fonction <i>fsolve</i>	24
2.3. Optimisation des paramètres du modèle PV	25
2.3.1. Identification utilisant l'optimisation heuristique	26
2.3.1.1. Algorithme génétique GA	26
2.3.1.2. Algorithme <i>PSO</i>	28
2.3.2. Identification utilisant la résolution d'un système d'équations non linéaires	28
2.4. Simulation	30
2.5. Conclusion	37

Chapitre 3 : Modèle PV à double diode

3. Introduction	38
3.1. Description du circuit électrique équivalent à double diode	38
3.1.1. Différents modèle PV modélisant la cellule PV	40
3.1.1.1. Modèle mathématique comportant cinq paramètres inconnus	40
3.1.1.2. Modèle mathématique comportant quatre paramètres inconnus	40
3.2. Calcul du courant prédit par le modèle <i>PV</i> à double diode	40
3.2.1. Méthode de <i>Newton – Raphson</i>	41
3.2.2. Fonction de <i>Lambert – W</i>	41
3.2.3. Fonction <i>fsolve</i>	44
3.3. Identification paramétrique du modèle PV	44
3.3.1. Identification utilisant l'optimisation par <i>GA</i> ou <i>PSO</i>	44
3.3.2. Identification utilisant la résolution d'un système d'équations non linéaires	45
3.4. Simulation	45
3.5. Conclusion	54

Conclusion générale

Références

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est une source inépuisable d'énergie avec le plus grand potentiel, car elle continuera à produire de l'énergie solaire tant que le soleil sera là. L'énergie solaire est totalement gratuite, largement disponible, ne produit aucune pollution, aucune émission et aucun bruit, ce qui signifie que la production d'énergie solaire ne produit aucune empreinte carbone. Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables disponibles sur terre, l'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus largement utilisées.

Dans la pratique, il est indispensable de convertir l'énergie photonique de l'éclairage solaire en énergie électrique. Cela nécessitant d'utiliser des panneaux solaires et d'autres outils de l'électronique de puissance en l'occurrence : les convertisseurs, les onduleurs,..., etc. De ce fait, les panneaux solaires à base des cellules de silicium sont largement utilisés dans les applications connectées au réseau public, ils constituent une excellente source de conversion d'énergie propre et durable. Cependant, leur puissance électrique varie en fonction des conditions environnementales ambiantes telles que : la température de la cellule photovoltaïque, niveau d'irradiance solaire, intensité de la lumière solaire,..., etc. De plus, cette puissance électrique varie aussi en fonction de la charge connectée au convertisseur d'énergie. Outre les conditions externes, le coût et les performances des panneaux PV dépendent fortement de la loi de commande avec laquelle on peut assurer une bonne extraction de la puissance maximale et cela quelque soit les conditions météorologiques. Cet objectif est souvent conditionné par le choix adéquat du modèle mathématique qui doit décrire le comportement réel de la cellule photovoltaïque de façon la plus précise que possible. Cela pose un inconvénient majeur dans les décisions d'investissement et la conception des systèmes PV.

Pour surmonter ce défi, les chercheurs ont développé divers modèles mathématiques permettant de comprendre et de prédire l'effet de ces conditions changeantes sur la puissance électrique photovoltaïque, ainsi que plusieurs algorithmes évolutifs permettant d'estimer les paramètres du modèle PV. Parmi les modèles développés, les modèles basés sur les circuits électriques à paramètres localisés se sont avérés plus efficaces. Ils sont classés en fonction du nombre de diodes.

Dans ce travail, on la modélisation du comportement réel d'un panneau solaire s'articulera seulement sur le modèle à une diode et celui à double diode. Ce manuscrit visera

donc à identifier les paramètres nécessaires pour le développement d'un modèle mathématique de synthèse assurant la bonne prédiction du comportement d'une cellule photovoltaïque. A cet effet, ce mémoire sera divisé en trois chapitres suivants :

Le premier chapitre sera consacré à l'étude de l'énergie solaire, du rayonnement solaire, de l'effet photovoltaïque, de la cellule photovoltaïque, de la constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) et de la classification des systèmes photovoltaïques. Ensuite, dans un second chapitre, nous nous focaliserons sur une étude de la description du circuit électrique équivalent d'une seule diode, le calcul du courant prédit, de l'optimisation des paramètres du modèle photovoltaïque, et d'une partie de simulation. Dans le dernier chapitre, nous présenterons la description du circuit électrique équivalent d'une double diode, le calcul du courant prédit pour le modèle à deux diodes, l'optimisation des paramètres du modèle photovoltaïque et une partie de simulation.

Chapitre 1:

Généralité sur le système photovoltaïque

1. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pour cette raison que l'homme cherche, depuis longtemps, à mettre à profit cette énergie importante et diffuser sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit par la suite « cellule photovoltaïque ». Dans la nature, l'énergie solaire est souvent disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur $10\,000\text{ W/m}^2$ crête dans les zones tempérées et jusqu'à $14\,000\text{ W/m}^2$ lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [1].

Dans ce chapitre, nous allons donner un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque puis une description sur la cellule photovoltaïque, ses performances ainsi que ses principaux types existant dans le monde industriel.

1.1. Aperçu sur l'énergie solaire :

Le soleil est une étoile formée de gaz extrêmement chauds, il est constitué de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et 2% d'autres molécules. Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. De plus, la masse est transformée en énergies selon la formule d'Einstein $E = mc^2$. Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5800 °K . L'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m^2 . Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire. En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil $1.2 \times 10^{17}\text{ W}$ pour combler ses besoins pour presque une année. Les panneaux photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique [2].

1.2. Aperçu sur le rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est une propagation d'ondes de longueur qui varie entre 0.2 et $4 \times 10^{-6}\text{ m}$. Il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité. Il existe plusieurs types de rayonnement solaire. Parmi lesquels, on peut citer [2]:

- **Rayonnement direct** : C'est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont, en général, devenant en parallèles entre eux et pouvant être mesurés par un appareil de mesure appelé « pyromètre ».
- **Rayonnement diffus** : il est constitué d'une lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa diffusion engendre un phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions.

Dans le ciel, un éclatement des rayons du soleil est souvent produit à la fois par les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières. Cela dépend donc avant tout des conditions purement météorologiques.

- **Rayonnement réfléchi ou albédo du sol** : C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement réfléchi peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Rayonnement global** : il représente la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou par un « Solari mètre » sans écran. Il est défini donc par l'expression suivante :

Rayonnement Globale = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi.

La figure 1.1 donne un exemple expliquant les composants du rayonnement solaire.

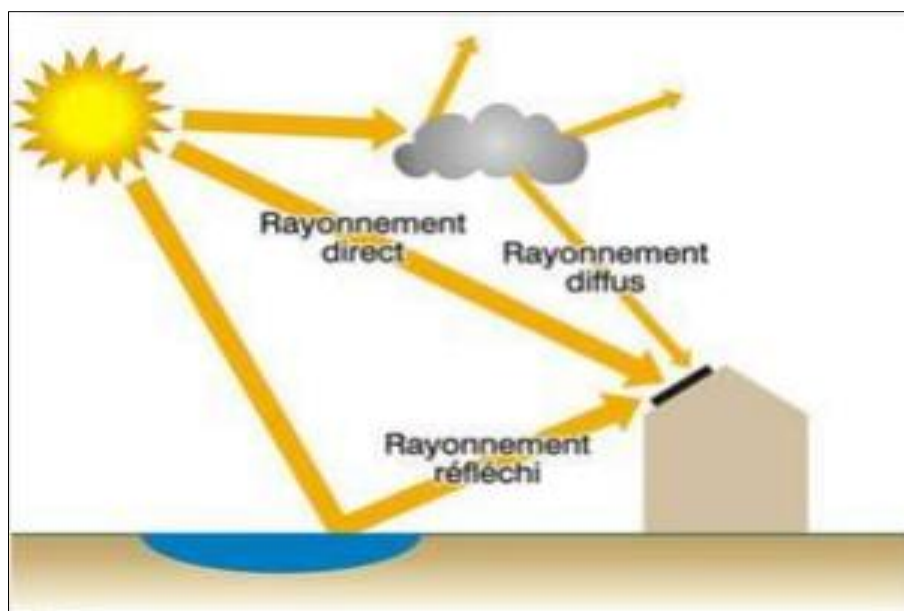


Figure 1.1. Composants du rayonnement solaire.

1.3. Aperçu sur l'effet photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie la lumière. En effet, ce terme est composé de deux parties qui sont: « photos » où lumière et « volt ». Historiquement, ce terme venant du nom de famille du physicien italien (*Alessandro Volta*) qui a inventé la pile électrique en 1800 et a donné son nom à l'unité de mesure de la tension électrique « le volt ». Le principe de l'effet photovoltaïque peut être résumé comme suit :

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière. De plus, sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés". Par conséquent, si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est donc transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique provoquant ainsi l'effet photovoltaïque [1, 3].

En général, l'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules fabriquées souvent à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire (panneau solaire). Finalement, la production d'électricité directement de la lumière via un panneau solaire, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. [1, 3].

1.4. La cellule photovoltaïque :

En 1839 : lorsque Edmond Becquerel découvre, pour la première fois, l'effet photovoltaïque. Il s'agit de convertir directement l'énergie solaire en énergie électrique. Il a réalisé des expériences en utilisant des électrodes en acide sulfurique et en métal noble. En effet, l'étude des dispositifs photovoltaïques à semi-conducteurs a été débutée en 1954. Le matériau utilisé était le sélénium avec une efficacité de conversion d'énergie qui n'a jamais excédé approximativement de 2%.

En 1954 : les laboratoires de téléphone Bell ont produit le premier type pratique de la cellule solaire, une cellule de silicium de type monocristallin avec une efficacité de conversion d'énergie jusqu'à 6%.

En 1988: Un rendement maximum de conversion de l'énergie photovoltaïque a été établi pour les cellules solaires monocristallines à base de silicium avec une valeur de 22.8%.

1.4.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des impuretés) sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée souvent par le terme « dopage ». Dans la pratique, il existe deux types des matériaux : Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès. Il sera donc appelé de type *N*. Un exemple de ce type des matériaux est le silicium dopé au phosphore. Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons. Il sera donc dit de type *P*. Un exemple de ce type des matériaux est le silicium dopé au bore [1, 4]. La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type *P* ou *N* en y diffusant du bore ou du phosphore. De plus, une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction *P – N*). En effet, au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en formes de grille, contacts avant et arrière, sont déposés. Pour plus de détails, voir la figure 1.2 ci-dessous [1, 5].

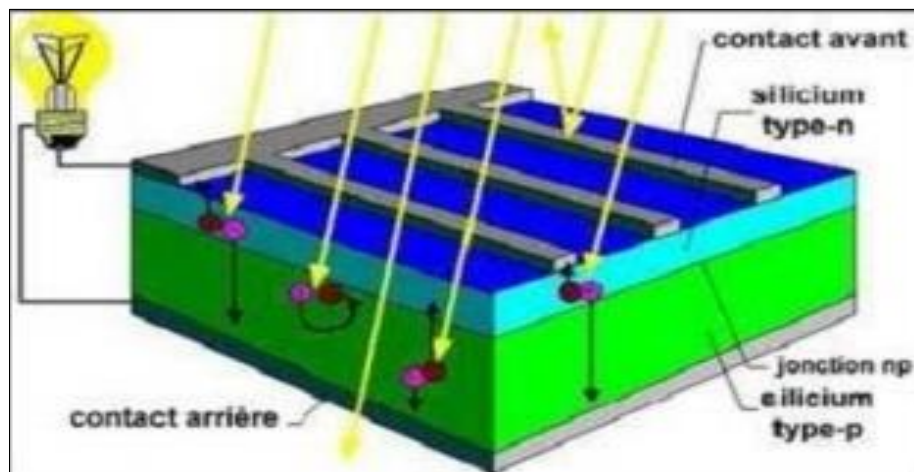


Figure 1.2. Schéma explicatif d'une cellule solaire

Une cellule photovoltaïque donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants : Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au *gap*) par le matériau constituant le dispositif ; Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ; Collecte

des particules générées dans le dispositif [1, 2]. En général, le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder par deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant. Ceci représente l'intérêt principal des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. De ce fait, afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires « électrons/trous créés » est nécessaire et c'est pour cette raison qu'on doit souvent utiliser la jonction $P - N$ [1, 2].

1.4.2. Différents types et technologies de cellules photovoltaïques :

Il existe plusieurs types de cellules solaires dont chaque type de cellules possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quelque soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8% à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. En effet, il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle. Parmi lesquels, on peut citer [6] :

1.4.2.1. Cellules monocristallines:

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [4] (voir la figure 1.3).

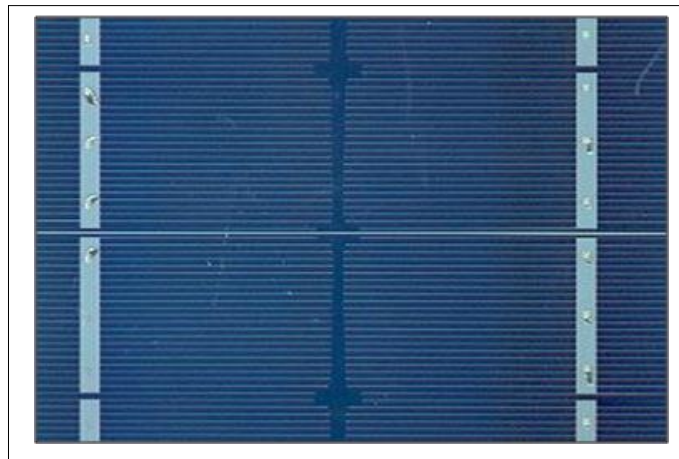


Figure 1.3. Cellule photovoltaïque monocristalline

Les avantages ainsi que les inconvénients de ce type des cellules sont les suivants :

❖ Les avantages:

- Assurant un rendement acceptable de point de vue pratique, *i.e.*, environ de 150 Wc/m^2 ;
- Assurant une durée de vie très importante, *i.e.*, ± 30 ans.

❖ Les inconvénients:

- Le coût de revient est très élevé ;

- Le rendement est faible dans le cas de présence des faibles éclairagements.

1.4.2.2. Cellules poly-cristallines:

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais n'est pas uniforme. Pratiquement, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [4]. La figure 1.4 représente un agrandissement d'une cellule photovoltaïque poly-cristalline.

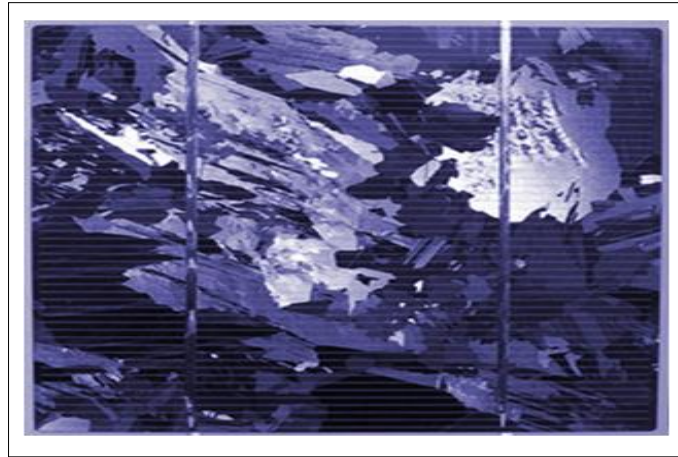


Figure 1.4. Cellule photovoltaïque poly-cristalline

Les avantages ainsi que les inconvénients liés aux cellules photovoltaïques poly-cristallines sont les suivants :

❖ Les avantages:

- Assurant un rendement très acceptable de point de vue pratique, *i.e.*, environ 100 Wc/m^2 ;
- Assurant d'un meilleur marché en comparaison avec celui de la cellule monocristalline.

❖ Les inconvénients:

- Le rendement est faible dans le cas de présence des faibles éclairagements ;
- Rendement module commercial allant de 11% jusqu'à 15%

1.4.2.3. Cellules amorphes:

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule devenant donc colorée en grise très foncé ou en marron. Ce type est plus utilisé notamment dans la cellule des calculatrices et des montres [4]. La figure 1.5 représente un agrandissement d'une cellule photovoltaïque de type amorphe.

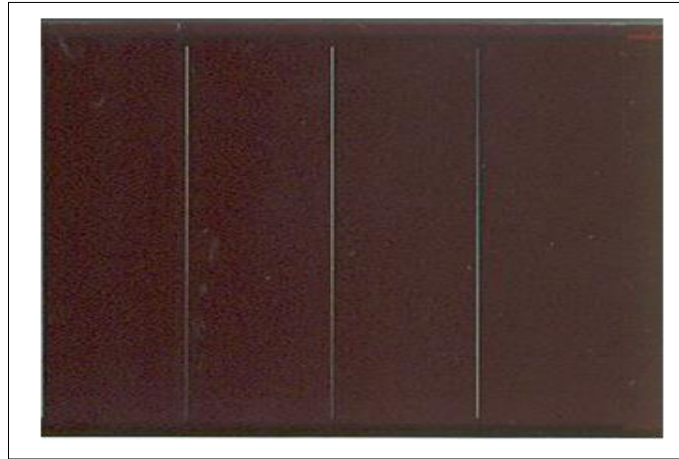


Figure 1.5. Cellule photovoltaïque amorphe.

Les avantages ainsi que les inconvénients liés aux cellules photovoltaïques amorphes sont les suivants :

❖ **Les avantages:**

- Le fonctionnement des cellules est assuré même à un faible éclairement;
- Assurant un bon marché par rapport aux autres types de cellules.

❖ **Les inconvénients:**

- Assurant un rendement faible en plein soleil (environ de $60Wc/m^2$), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses ;
- Rendement module commercial allant de 5% à 9%
- Rendement record en laboratoire est assuré environ de 13.4%

1.4.2.4. Autre technologies:

Dans la pratique, plus l'existence d'autres matériaux cristallisés et couches minces amorphes, il existe une autre famille de matériaux, beaucoup moins répandus. Il s'agit des couches minces poly-cristallines. Le silicium poly-cristallin en couche mince serait intéressant notamment s'il pouvait allier le rendement du silicium cristallin à fort éclairement et la simplicité de fabrication des films minces. Mais ce matériau ne fait pour le moment que l'objet d'études de laboratoire.

Les autres films poly-cristallins déjà commercialisés sont à base d'autres semi-conducteurs comme le tellure de cadmium ($CdTe$) et les alliages à base de cuivre, d'indium et de sélénium (CIS ou $CIGS$) [5].

1.4.2.5. Rendement des cellules :

Le tableau 1-1 suivant présente les différents types de cellules avec leur rendement [6]:

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe (<i>a – Si</i>)	13%	5% à 9%
Silicium poly cristallin (<i>p – Si</i>)	19.8%	11% à 15 %
Silicium monocristallin (<i>m – Si</i>)	24.7%	13% à 17%

Tableau 1-1. Différents types des cellules avec leur rendement

En général, l'expression du rendement d'une cellule photovoltaïque est souvent donnée par l'expression suivante :

$$\eta_{STC} = \frac{p_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (1.1)$$

Avec :

- η_{STC} : représente le rendement de la cellule photovoltaïque;
- p_m : représente la puissance produite par le générateur PV;
- E_{STC} : représente l'éclairement absorbé par la cellule;
- $S_{cellule}$: représente la surface de la cellule [m^2];

De plus, le rendement cité ci-dessus dépend souvent de plusieurs facteurs. Parmi lesquels on peut citer [6]:

- Réflexion à la surface.
- Température de jonction des cellules.
- Type de matériau utilisé et technique de fabrication.
- La résistance série et parallèle responsables des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

1.5. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série et ou en parallèle donne lieu à l'apparition de plusieurs types de générateurs photovoltaïques. A cet effet, si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent ce qui augmentent la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est

l'ampérage qui augmente. Ces deux types d'association des cellules photovoltaïques peuvent être détaillés comme suit :

1.5.1. Association des cellules photovoltaïques en série :

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et donc d'accroître la puissance électrique du panneau. Par conséquent, les cellules sont traversées par le même courant. Dans ce cas, la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par l'addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation (1.2) a permis de définir les caractéristiques électriques d'une association de N_s cellules en séries [7]. On obtient donc :

$$V'_{co} = N_s \times V_{co} \tag{1.2}$$

Avec V_{co} représente la tension du circuit ouvert. Les caractéristiques électriques d'une association de N_s cellules associées entre elles en séries peuvent être illustrées par la figure ci-dessous :

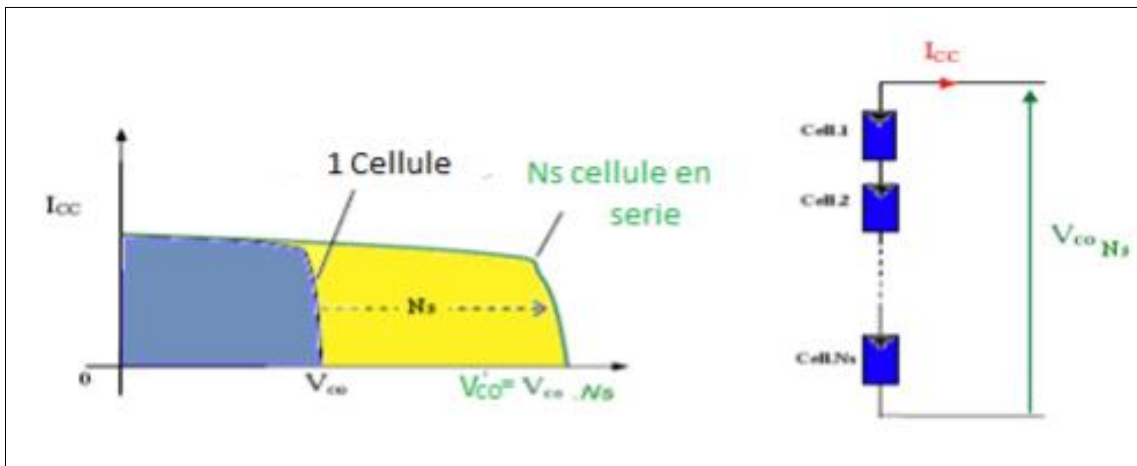


Figure 1.6. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série.

1.5.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

D'autre part une association parallèle de N_p cellules photovoltaïques est possible et permet d'accroître le courant de sortie généré par le générateur photovoltaïque. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle. Les cellules sont soumises à la même tension. De plus, la caractéristique résultant du groupement est souvent obtenue par l'addition de tous les courants des cellules construisant le générateur photovoltaïque.

L'équation (1.3) a permis de définir les caractéristiques électriques d'une association de N_p cellules en parallèles [7]. On obtient donc :

$$I'_{cc} = N_p \times I_{cc} \tag{1.3}$$

Avec I_{cc} représente le courant de court-circuit de chaque cellule. Les caractéristiques électriques d'une association de N_p cellules associées entre elles en parallèles peuvent être illustrées par la figure ci-dessous :

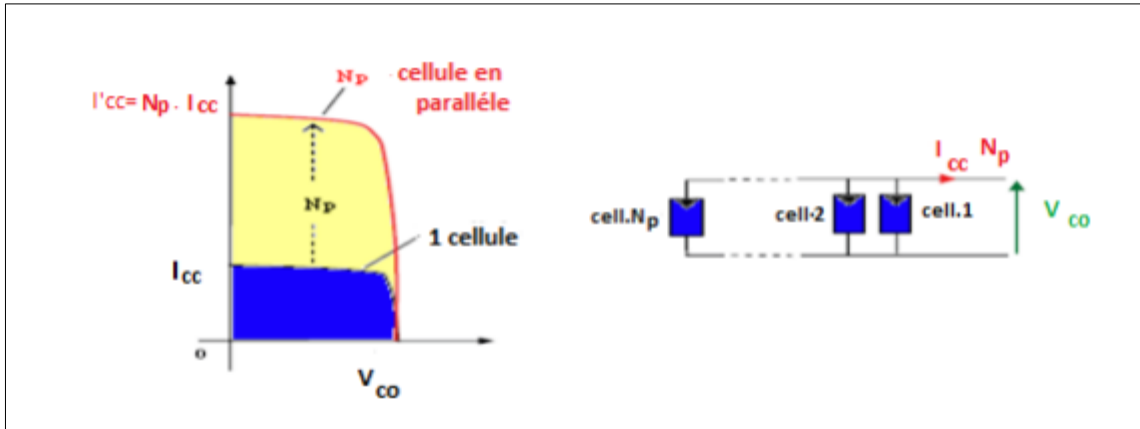


Figure 1.7. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_p cellules en parallèle

1.5.3. Association des cellules photovoltaïques mixte (série et parallèle) :

En général, on utilise ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée par la figure (1.8) ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augment de façon considérable le courant de sortie du générateur photovoltaïque [8].

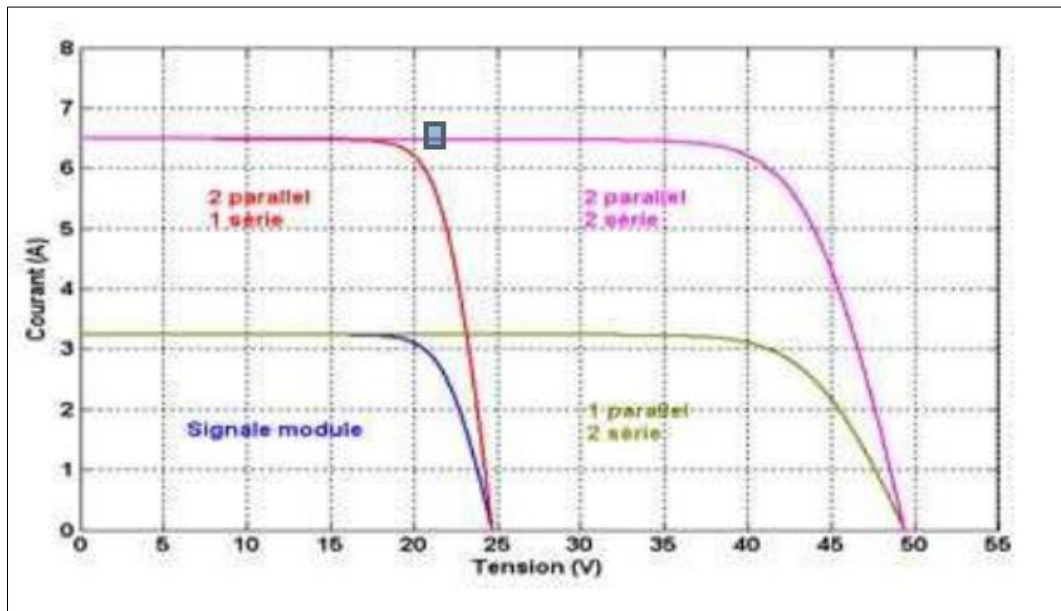


Figure 1.8. Caractéristique regroupement mixte (série et parallèle).

1.6. Classification des systèmes photovoltaïques :

Le système solaire photovoltaïque peut être classifié selon l'autonomie en deux classes qui sont les suivantes :

1.6.1. Système isolé ou autonome:

Ce sont des systèmes qui travaillent 24h/24h avec l'énergie solaire convertie en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique, et cela à l'aide de plusieurs composants mais le plus importants ce sont les batteries qui aident à emmagasiner de l'énergie électrique.

Il faut mentionner que les batteries les plus utilisées dans le marché actuellement sont: Accumulateurs au Plomb-Acide et accumulateurs au Nickel-Cadmium [7]. La figure 1.9 représente un système photovoltaïque travaillant en mode autonome.

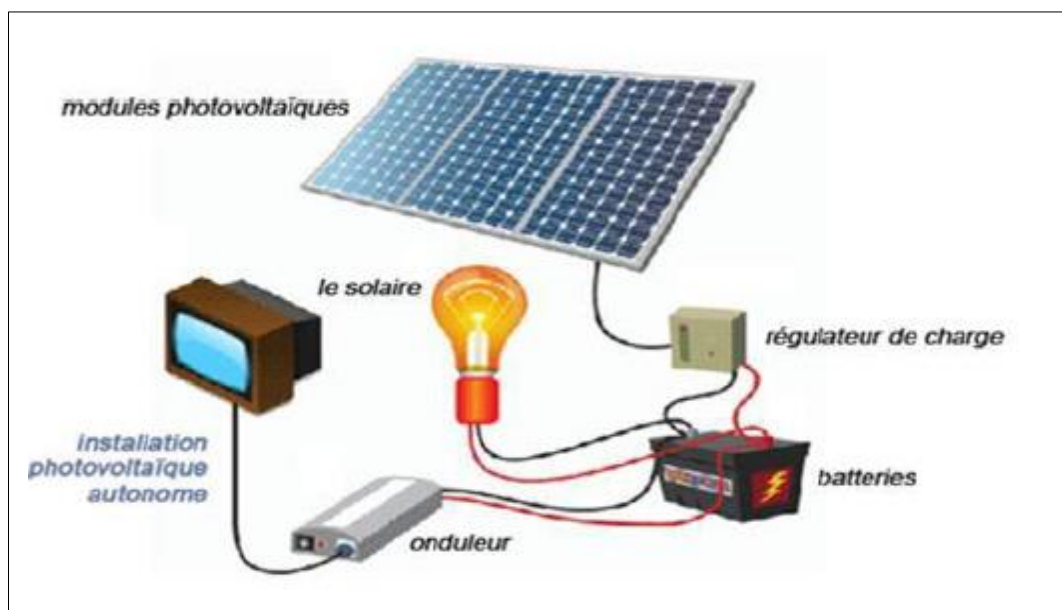


Figure 1.9. Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome.

1.6.2. Système raccordé au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau, c'est un système couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui est chargé de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité [7]. La figure 1.10 représente un mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau public.

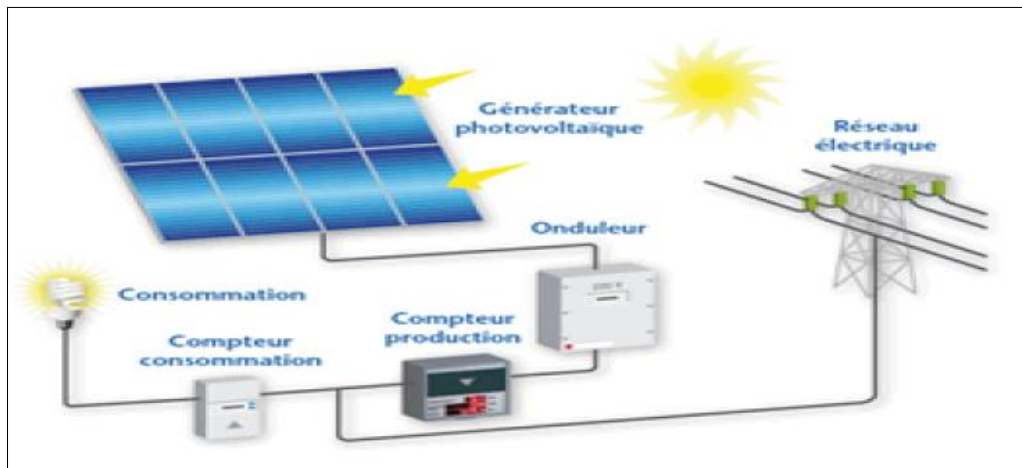


Figure 1.10. Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque:

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients. Parmi de ceux-ci, on peut citer [4]:

❖ Avantages du photovoltaïque :

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité ;
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions ;
- Maintenance réduite (pas de pièces en rechange, durée de vie des modules égale à 20 ans) ;
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3 à 5 kWh/jour) ;
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 Vcc ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

❖ Inconvénients du photovoltaïque:

- Le coût initial des systèmes photovoltaïques est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée. Ils sont donc parfois hors de portée des personnes à faibles revenus ;
- Les systèmes photovoltaïques de faible puissance requièrent souvent des équipements à courant continu dont l'efficacité énergétique est supérieure à celle des équipements à courant alternatif, mais dont le coût est souvent plus élevé ;
- Les systèmes photovoltaïques doivent être conçus et installés par des techniciens car toute erreur de conception ou de réalisation conduirait à créer une installation d'un rendement inférieur à celui des solutions alternatives ;

- Les systèmes photovoltaïques de forte puissance nécessitent souvent un système de secours (éolien ou au fuel) pour les périodes de forte demande ou de fort ennuagèrent ;
- L'électricité solaire photovoltaïque n'est pas économiquement viable pour les charges thermiques de type cuisson, chauffage, ou repassage.

1.8. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le principe de la cellule et la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables, silencieux et rentables dans les régions éloignées. Ces systèmes peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité et constituent une source non polluante qui peut convenir à toute une gamme d'applications telle que le pompage solaire qui est utilisé efficacement dans le monde entier afin de pomper de l'eau pour le bétail, les plantes ou les êtres humains.

Chapitre 2:

Modèle PV à une seule diode

2. Introduction :

De nos jours, l'intérêt croissant pour les applications de la génération photovoltaïque, avec tous les problèmes liés d'exploitation optimale, d'impact environnemental et de stabilité du réseau, a entraîné une accélération des recherches dans ce domaine. A cet effet, plusieurs questions sont actuellement posées à l'étude, telles que la prévision de la production d'énergie photovoltaïque, le choix et la conception optimaux des convertisseurs de puissance reliant le générateur photovoltaïque au réseau ou à la charge, et l'étude de tous les problèmes liés au contrôle électronique de puissance.

Afin de résoudre ces problèmes de manière appropriée, une modélisation précise de la source PV est nécessaire pour pouvoir faire la synthèse des contrôleurs adéquats et de faire l'extraction maximale de la puissance électrique fournie par les générateurs photovoltaïques. En fait, une telle modélisation permet de définir les caractéristiques électriques d'une source photovoltaïque, pour des conditions de charge et d'environnement variables, afin d'obtenir une évaluation du comportement de la source photovoltaïque dans n'importe quelle condition de fonctionnement [9].

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Parmi lesquels, le circuit électrique équivalent possédant une seule diode est le plus utilisé pour assurer la bonne description du comportement réel d'une cellule photovoltaïque. La précision de modélisation est en général conditionnée par le choix de la méthode d'identification qui assure l'optimisation adéquate de différents composants électroniques qui construisent le circuit électrique équivalent. Il faut noter ici que l'optimisation souhaitée est appliquer afin de réduire au maximum possible l'écart entre les grandeurs électriques réelles fournies par la cellule et celles prédites par le modèle mathématique correspondant.

La détermination des grandeurs prédites par un tel modèle est souvent conditionnée par résolution d'une équation non linéaire dont les variables méconnues sont le courant et la tension fournis par le modèle. Cette solution est souvent assurée par les méthodes de résolution itérative on l'occurrence, la méthode de Newton Raphson, la méthode de Lambert,

...etc. A partir de vecteur de solution obtenu, un problème d'optimisation correspondant est ensuite reformulé où sa solution optimale est assurée par un algorithme d'optimisation sous contrainte. Parmi de ceux-ci, on peut citer : les algorithmes génétiques, l'algorithme d'essaim particulaire, ...etc.

Dans ce chapitre, nous allons procéder à la modélisation d'une cellule photovoltaïque par un modèle mathématique basé sur le circuit électrique équivalent d'une seule diode. Leurs paramètres optimaux sont obtenus à partir d'une minimisation d'une fonction de coût fournie par des grandeurs réelles mesurées à partir d'un panneau solaire de type ISOFOTON I-50 et cela dans différentes conditions climatiques et pendant une année.

2.1. Description du circuit électrique équivalent d'une seule diode :

Les cellules solaires PV sont généralement modélisées par un circuit électrique qui contient une diode simple plus une source d'alimentation en courant et deux résistances comme l'indique la figure 2.1 ci-dessous [10].:

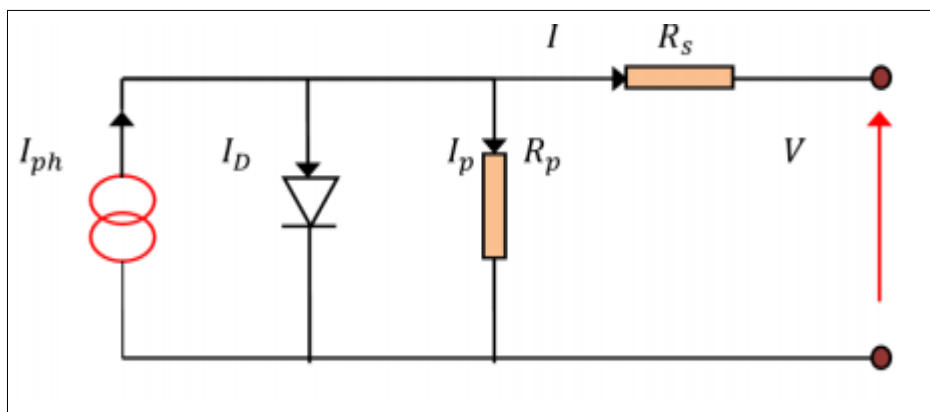


Figure 2.1. Circuit électrique équivalent modélisant une cellule photovoltaïque

Dans ce schéma, le générateur de courant modélise le flux lumineux, la diode représente les phénomènes de polarisation, et les deux résistances (série et shunt) représentent respectivement la résistance de contact et de connexion et le courant de fuite au niveau de la jonction $P - N$ de la cellule [11].

En général, le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2.1)$$

Sachant que :

- I_{pv} : représente le courant de sortie fournie par la cellule solaire.
- I_{ph} : représente le courant génère par la cellule solaire lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil.
- I_p : représente le courant circulant dans la résistance R_p .
- I_d : représente le courant de la diode, il est exprimé comme suit :

$$I_d = I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) \right] \quad (2.2)$$

La tension V_t est souvent donnée par $V_t = N_s \left(\frac{k \cdot T}{q}\right)$, sachant que I_0 représente le courant de saturation inverse de la diode qui peut être exprime par:

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n}\right)^A \cdot \exp\left(\left\{\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right\}\right) \quad (2.3)$$

De plus, le courant I_{rs} est donné par l'expression ci-dessous:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left\{\exp\left(\frac{V_{OC}}{A \cdot V_t}\right) - 1\right\}} \quad (2.4)$$

et le photo-courant I_{ph} est généralement défini par:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + K_i (T - T_n)] \quad (2.5)$$

Avec :

- V_{pv} : représente la tension de sortie du modèle.
- V_t : représente la potentielle thermodynamique.
- I_{rs} : représente le courant de court- circuit de la cellule à la température de référence.
- T : représente la température de la jonction des cellules PV donnée en kelvin [$^{\circ}K$]
- T_n : représente la température nominale obtenue dans les conditions standards *STC* à savoir $T_n = 25^{\circ}C$
- A : représente le facteur d'idéalité de la jonction
- G : représente l'éclairement solaire donné en W/m^2

- G_n : représente l'éclairement solaire nominale obtenu dans les conditions standards *STC* à savoir $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$

Dans notre travail, la modélisation du comportement réel de la cellule photovoltaïque est assurée par les données récapitulées dans le Tableau 2-1 ci-dessous.

Paramètre	Identification de la quantité (unité)	Valeur correspondante
I_{sc}	Courant de court-circuit (A)	2.99
q	Charge élémentaire (C)	1.60×10^{-19}
K	Constante de Boltzmann (J/K)	1.38×10^{-23}
V_{oc}	Tension en circuit ouvert (V)	20.80
K_t	Coefficient de la température (A/°K)	0.00035
E_g	L'énergie du gap (eV)	1.2

Tableau 2-1. Données utilisées pour la modélisation de la cellule PV

Le courant de la cellule PV peut alors s'écrire sous la forme :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (2.6)$$

En général, un générateur photovoltaïque est composé de plusieurs cellules PV connectées en série et en parallèle. De plus, l'équation caractéristique « courant-tension » du circuit équivalent pour un panneau photovoltaïque, dispose en cellules parallèles N_{pp} et séries N_{ss} , peut être définie à l'aide des deux équations suivantes:

$$I^P = N_{pp} \cdot I_{pv} \quad (2.7)$$

$$V^P = N_{ss} \cdot V_{pv} \quad (2.8)$$

Donc l'équation du courant devient comme suit:

$$I^P = N_{pp} \cdot I_{ph} - N_{pp} \cdot I_0 \left(-1 + \exp\left(\frac{\frac{V^P}{N_{ss}} + \frac{R_s}{N_{pp}} \cdot I^P}{A \cdot V_t}\right) \right) - \frac{\frac{N_{pp}}{N_{ss}} \cdot V^P + R_s \cdot I^P}{R_p} \quad (2.9)$$

Avec I^P et V^P sont, respectivement, le courant de sortie et la tension de sortie fournie par le panneau solaire.

Dans ce qui est suit, nous allons proposer deux types de modèles PV. Le premier modèle comportant quatre paramètres inconnus tandis que le second modèle est celui fourni par trois paramètres à optimiser.

2.1.1. Modèle mathématique à quatre paramètres inconnus [12]:

Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant dépendante de l'éclairement solaire et connectée en parallèle avec une diode et deux résistances en série R_s et en parallèle R_p . En effet, les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de l'équation caractéristique $I(V)$ sont les suivants: le photo-courant I_{ph} , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_p , et le facteur de qualité de la diode A . Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes d'équation $I(V)$ pour différent point de fonctionnement ou bien à partir d'un algorithme d'optimisation, on l'occurrence : les algorithmes génétiques GA ou bien l'algorithme d'essaim particulaire PSO .

2.1.2. Modèle mathématique à trois paramètres inconnus [12]:

Pour réduire la complexité survenant lors de la modélisation de la cellule PV, le circuit à quatre paramètres cité précédemment peut être réduit à un circuit à trois paramètres. Ceci est assuré par le remplacement du photo-courant par son équation correspondante (voir Eq. 2.5). En effet, les trois paramètres méconnus sont les suivants:

- A : Le Facteur de qualité ;
- R_s : La résistance en série ;
- R_p : La résistance en parallèle.

2.2. Calcul du courant I_{pv} prédit:

L'équation caractéristique $I - V$ est une équation non linéaire, sa solution nécessite l'application d'une méthode de résolution assurant un vecteur de solutions exactes ou vecteur de solutions approchées. A cet effet, plusieurs méthodes ont été développées pendant ces dernières années pour résoudre cette équation non linéaire. Parmi de celles-ci on peut citer:

- Méthode de *Newton-Raphson*.
- Méthode utilisant la fonction de *Lambert W*.
- Méthode basée sur la fonction de *fsolve* du logiciel *Matlab*.

Dans la suite de ce travail, nous allons présenter les détails de chaque méthode précédente pour la détermination du courant prédit à partir de la solution de l'équation non linéaire du courant fourni par la cellule PV.

2.2.1. Méthode de *Newton-Raphson*:

La méthode de *Newton – Raphson* est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaire. C'est une méthode itérative basée sur l'évaluation de la fonction objective ainsi que sa dérivée dans un point x_n . La mise à jour de la solution dans chaque itération est assurée par l'équation ci-dessous [13]:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (2.10)$$

Où:

- $f'(x_n)$: représente l'évaluation de la dérivée de la fonction objective $f(x)$ dans le point solution x_n ;
- $f(x_n)$: représente l'évaluation de la fonction objective $f(x)$ à la valeur actuelle x_n ;
- x_{n+1} : représente la mise à jour de la solution actuelle x_n .

L'application de la méthode de *Newton-Raphson* est appliquée donc pour résoudre l'équation non linéaire ci-dessous :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (2.11)$$

L'application de la méthode de *Newton* permet de calculer la valeur du courant I pour chaque itération par :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p}}{-1 - \left(\frac{R_s I_0}{A V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A V_t}\right) - \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (2.12)$$

2.2.2. Fonction de *Lambert-W*:

La fonction de *Lambert-W* est un outil mathématique qui sert à la résolution analytique et explicite de l'équation (2.11). L'utilité de la fonction de *Lambert-W* est bien illustrée dans le modèle des jonctions non idéales avec une résistance série R_s et une résistance shunt R_p ,

dans les caractéristiques des cellules solaires. Les avantages de la solution analytique basée sur la fonction de *Lambert-W* sont les suivants :

- Décrire le comportement général du problème physique, alors que la solution numérique est basée sur des résultats conditionnés par des valeurs spécifiques.
- Contribue à l'unification des différents phénomènes.
- Cette solution est exacte, alors que les résultats numériques sont exacts selon une erreur de calcul bien déterminée.
- Pas de problèmes de convergence.
- Facilite la compréhension des comportements physiques lorsque les paramètres de l'équation changent.
- Peut être intégrée et dérivée.

Une telle solution est donnée par la fonction de *Lambert-W*, elle répond à tous les critères imposés par un tel cahier de charges. La fonction de *Lambert-W* a été introduite en 1758 dans les travaux de *Lambert*, ensuite elle a été étudiée par *Euler* en 1779. Enfin, elle a été étudiée en 1959 par *E. M. Wright* d'où elle a pris son nom. Le nombre d'applications de la fonction de *Lambert-W* a augmenté considérablement dans les dernières années [12].

La fonction de *Lambert-W* est définie comme étant la fonction qui vérifie la formule suivante:

$$Z = W(X)e^{W(X)} \quad (2.13)$$

Avec:

- Z : représente l'argument de la fonction W .
- $e^{W(X)}$ représente la fonction exponentielle et X est un vecteur complexe ou réel. Par conséquent, le vecteur X est obtenu sous la forme $X = \text{lambert}W(Z)$.

L'application de la fonction de *Lambert-W* sur l'équation qui permet de calculer le courant prédit I_{pv} peut être simplifiée comme suit:

$$(R_p + R_s)I_{pv} = R_p I_k - R_p I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) - V_{pv} \quad (2.14)$$

Où I_k est défini par $I_k = I_{ph} + I_0$.

Ensuite, en multipliant les deux membres de l'Eq. 2.4 par le terme $\frac{R_s}{R_p + R_s}$, nous obtenons:

$$R_S I_{pv} = \frac{R_S}{R_p + R_S} \left(R_p I_k - R_p I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) - V_{pv} \right) \quad (2.15)$$

Ensuite, le terme V_{pv} est ajouté dans les deux membres de l'Eq. 2.15. Puis, en divisant l'équation obtenue par le terme $A \cdot V_t$, nous obtenons:

$$\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t} = \frac{R_S}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} \left(R_p I_k - R_p I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) + \frac{R_p V_{pv}}{R_S} \right) \quad (2.16)$$

Maintenant, l'Eq. 2.16 est à nouveau simplifiée, donnant ainsi l'équation suivante:

$$\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t} + \frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) = \frac{R_S}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S} \right) \quad (2.17)$$

Ensuite, la fonction exponentielle des deux membres de l'Eq. 2.17 est calculée, puis multipliée par le terme $\frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)}$. D'où, l'équation résultante est donc donnée par:

$$\left(\frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}} \right) e^{\left(\frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}} \right)} = \frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} e^{\frac{R_S}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S} \right)} \quad (2.18)$$

En prenant la fonction de *Lambert-W* des deux membres de l'Eq. 2.18, on obtient:

$$\frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}} = \text{LambertW} \left(\frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} e^{\frac{R_S}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S} \right)} \right) \quad (2.19)$$

Maintenant, l'Eq. 2.19 est à nouveau simplifiée, donnant ainsi l'équation suivante:

$$R_p I_0 e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}} = \frac{A \cdot V_t (R_p + R_S)}{R_S} \text{LambertW} \left(\frac{R_S R_p I_0}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} e^{\frac{R_S}{A \cdot V_t (R_p + R_S)} \left(R_p I_k + \frac{R_p V_{pv}}{R_S} \right)} \right) \quad (2.20)$$

Selon l'Eq. 2.14, le terme $\left(R_p I_0 e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}} \right)$ est réécrit comme suit:

$$R_p I_0 e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{A \cdot V_t}} = R_p I_k - (R_p + R_S) I_{pv} - V_{pv} \quad (2.21)$$

Ainsi, le courant de sortie prédit exact est donné en comparant l'Eq. 2.20 avec l'Eq. 2.21.

Cela donne:

$$\hat{I}_{pv} = \frac{R_p(I_{ph}+I_0)-V_{pv}}{R_p+R_s} - \left(\frac{A.V_t}{R_s} \text{LambertW} \left(\frac{R_s R_p I_0}{A.V_t(R_p+R_s)} e^{\frac{R_s}{A.V_t(R_p+R_s)} \left(R_p(I_{ph}+I_0) + \frac{R_p V_{pv}}{R_s} \right)} \right) \right) \quad (2.22)$$

L'Eq. 2.22 représente alors la solution exacte de l'équation non linéaire du courant de la cellule PV.

2.2.3. Fonction *fsolve*:

"*fsolve*" est une fonction disponible dans la bibliothèque du logiciel *Matlab*. Elle est conçue pour résoudre un système d'équations non linéaires comportant plusieurs variables réelles. Ces fonctions sont souvent données sous la forme vectorielle $F(X) = 0$, où F et X peuvent être des vecteurs ou des matrices réelles. Le formalisme standard de cette fonction est donné par :

$$X = \text{fsolve}(FUN, X_0) \quad (2.23)$$

Tout d'abord, l'algorithme de cette fonction du *Matlab* est initialisé par le vecteur (ou la matrice) X_0 . Ensuite, la résolution des équations imposées dans FUN est effectuée de façon itérative pour fournir une mise à jour de X_0 (i.e., X) et des valeurs de FUN évaluées en X . Finalement, un critère d'arrêt est examiné à chaque itération et selon les valeurs de F obtenues. Ceci permet d'accepter ou rejeter la mise à jour de solution obtenue et d'arrêter l'algorithme de résolution.

Sachant que cette fonction du *Matlab* utilisant deux algorithmes de résolution : local et global. En effet, pour l'algorithme local, *fsolve* nécessite une première estimation pour commencer ses itérations. Par conséquent, la solution obtenue est fortement dépendant de cette estimation initiale. En revanche, l'algorithme global commence par des vecteurs (matrices) aléatoires et continue de les mettre à jour jusqu'à atteindre le vecteur de la solution souhaitée assurant le plus petit coût [14].

En général, la fonction *fsolve* du *Matlab* peut être appliquée en plusieurs variantes dans lesquelles l'utilisateur a la possibilité de choisir la version adéquate parmi lesquelles qui permet de résoudre l'équation non linéaire donnée par Eq. 2.11. Les différentes versions de cette fonction existant dans le logiciel *Matlab* sont les suivantes :

- $X = \text{fsolve}(FUN, X_0, options)$

- $X = fsolve(\text{problem})$
- $[X, fval] = fsolve(*)$
- $[X, fval, existflag, output] = fsolve(*)$
- $[X, fval, existflag, output, jacobian] = fsolve(*)$

Description [15]:

Dans ce paragraphe, nous allons donner quelques détails indispensables pour bien dérouler chaque variante de cette fonction du *Matlab*. On aura donc :

$X = fsolve(FUN, X_0, options)$: La résolution est assurée avec des options d'optimisation spécifiques qui sont disponibles dans le fichier *optimoptions*.

$X = fsolve(\text{problem})$: Le système d'équations non linéaires doit être décrit préalablement sous forme d'un problème dans lequel l'utilisateur doit spécifier l'initialisation de la solution, l'option adoptée durant le processus d'optimisation, ...etc.

$[X, fval] = fsolve(*)$: Quelle que soit la syntaxe imposée par l'utilisateur, ce formalisme résout le système d'équations non linéaires et renvoie les valeurs de *FUN* à la solution *X*.

$[X, fval, existflag, output, jacobian] = fsolve(*)$: dans ce cas, le critère d'arrêt assurant la solution souhaitée est conditionné par le signe de la condition suffisante décrite par la matrice jacobéenne.

2.3. Optimisation des paramètres du modèle PV:

En général, la détermination optimale des paramètres d'un modèle PV basé sur un circuit électrique équivalent d'une seule diode représente un défi majeur pour la plupart des chercheurs travaillant dans ce domaine. A cet effet, plusieurs méthodes d'optimisation ont été proposées ces dernières années pour identifier les paramètres du modèle PV. Une première classification de celles-ci peut être faite sur la base de la technique d'extraction des paramètres adéquats du modèle PV et cela pour minimiser au maximum possible l'écart généré entre les grandeurs réelles mesurées à partir d'un système PV physique et celles prédites par le modèle à développer.

Généralement, il existe deux possibilités qui permettent la détermination optimale des paramètres du modèle PV. Ces dernières sont les suivantes [9]:

- Identification utilisant l'optimisation heuristique ;
- Identification utilisant la résolution d'un système d'équations non linéaires.

2.3.1. Identification utilisant l'optimisation heuristique:

Dans ce cas, l'identification paramétrique du modèle PV souhaité est assurée par la résolution d'un problème d'optimisation sous contraintes. La fonction objective est formulée préalablement par l'utilisateur dans laquelle la distance entre les mesures réelles et prédites est présentée sous forme d'un critère à minimiser. En général, il existe plusieurs critères dans la littérature. Parmi lesquels et les plus utilisés, on peut citer les trois critères ci-dessous :

- Erreur quadratique moyenne, ou en anglais Mean Squared Error *MSE*;
- Erreur racine moyenne, ou en anglais Root-Mean-Square Error *RMSE* ;
- Déviation de l'erreur quadratique moyenne, ou en anglais Root-Mean-Square Deviation *RMSD* .

La minimisation du critère est en général assurée par le moyen d'un algorithme d'optimisation sous contraintes. Parmi lesquels et les plus utilisés dans l'optimisation, on peut citer les deux algorithmes ci-dessous :

- Algorithmes génétiques *GA* ;
- Algorithme d'essaim particulaire *PSO*.

2.3.1.1. Algorithme génétique *GA*:

L'algorithme génétique *GA* est une méthode heuristique qui simule l'évolution biologique. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation sous contraintes et sans contraintes. Elle a été utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation en ingénierie et en sciences. Le principe de base de cet algorithme peut être résumé comme suit :

La population de solutions individuelles est modifiée à plusieurs reprises par l'algorithme génétique. Les individus sont sélectionnés au hasard à chaque étape de la

population actuelle et sont utilisés comme parents pour générer les enfants de la génération suivante [16]. Le processus d'optimisation doit être passé par les étapes suivantes :

- Initialisation de la population ;
- Codage de la population ;
- Evaluation de la fonction objective ;
- Possibilité de croisement des populations ;
- Possibilité de mutation entre les individus ;
- Reproduction de la population ;
- Test d'arrêt

Dans notre travail, le problème posé est de chercher les valeurs optimales de I_{ph} , R_s , R_p et A minimisant l'erreur quadratique moyenne MSE présentée par l'Eq. 2.24. Cette erreur est générée entre les mesures réelles du courant I_{pv_i} et les valeurs prédites \hat{I}_{pv_i} [17]. Le problème d'optimisation sous contrainte qui permet de fournir les paramètres du modèle PV souhaité peut être donné comme suit :

$$MSE(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{pv_i} - \hat{I}_{pv_i}(x))^2 \quad (2.24)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} I_{ph_{min}} \\ R_{s_{min}} \\ R_{p_{min}} \\ A_{min} \end{pmatrix}}_{x_{min}} \leq \underbrace{\begin{pmatrix} I_{ph} \\ R_s \\ R_p \\ A \end{pmatrix}}_x \leq \underbrace{\begin{pmatrix} I_{ph_{max}} \\ R_{s_{max}} \\ R_{p_{max}} \\ A_{max} \end{pmatrix}}_{x_{max}} \quad (2.25)$$

La minimisation de la fonction objective (2.24) en présence des contraintes de bornes (2.25) est assurée par la fonction du *Matlab GA*. Cette dernière est imposée par le formalisme ci-dessous :

$$\text{Syntaxe[18]: } x = ga(FUN, nvars, A_{inq}, b_{inq}, A_{eq}, b_{eq}, l_b, u_b) \quad (2.26)$$

Sachant que :

- FUN : représente le critère à minimiser (Fitness function) ;
- $nvars$: représente le nombre des paramètres à optimiser ;

- A_{inq}, b_{inq} représente les coefficients décrivant les contraintes linéaires d'inégalités, qui sont souvent définies par $A_{inq} \cdot x \leq b_{inq}$;
- A_{eq}, b_{eq} représente les coefficients décrivant les contraintes linéaires d'égalités, qui sont souvent définies par $A_{eq} \cdot x = b_{eq}$;
- l_b, u_b représente les coefficients décrivant les contraintes de borne, qui sont souvent définies par $l_b \leq x \leq u_b$;

Dans notre cas, les coefficients décrivant les contraintes linéaires sont imposées par :
 $A_{inq} = []$, $b_{inq} = []$ $A_{eq} = []$ et $b_{eq} = []$.

2.3.1.2. Algorithme PSO :

L'optimisation des essaims de particules (*PSO*) est une technique d'optimisation capable de trouver des points optimaux à l'aide du *RMSE*. Dans l'algorithme *PSO*, une population de particules parcourt un espace de recherche avec une vitesse mise à jour par l'inertie des mouvements, la connaissance de soi et les interactions sociales. Initialement, les particules sont placées de manière aléatoire dans un espace de recherche d'un problème ou d'une fonction donnée. Ainsi, chaque particule dans un essaim représente une solution au problème avec l'erreur spécifiée. La fonction objective est évaluée pour toutes les particules, puis leur vitesse et leur position sont mises à jour à chaque itération [14].

La minimisation de la fonction objective (2.24) en présence des contraintes de bornes (2.25) est donc assurée par la fonction du *Matlab partictswarm*. Cette dernière est imposée par le formalisme ci-dessous :

$$\text{Syntaxe: } x = \text{partictswarm}(FUN, nvars, A_{inq}, b_{inq}, A_{eq}, b_{eq}, l_b, u_b) \quad (2.27)$$

Sachant que chaque terme survenant dans (2.27) est imposé similairement que celui de l'algorithme génétique.

2.3.2. Identification utilisant la résolution d'un système d'équations non linéaires :

Lorsqu'on dispose d'une caractéristique $I - V$ mesurée pour un éclairage et une température donnée, il est facile de détecter les principaux paramètres électriques tels que le courant de court-circuit (I_{sc}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}), le courant et la tension au point de puissance maximale *PPM* (I_m et V_m). A partir de ces points, il est facile de déterminer les

paramètres du modèle (A, R_s, R_p) via la résolution d'un système d'équations non linéaires [19].

Le principe adopté ici repose sur la formulation du problème via quatre points observés dans les caractéristiques $I - V$ et $P - V$. Ces quatre points sont les suivants : le point de court-circuit ($0, I_{sc}$), le point de circuit ouvert ($V_{oc}, 0$), le point MPP assurant l'extraction de la puissance maximale (P_{max}, V_m) et la condition fournissant le point PPM qui est définie par

$$\left\{ \left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} \right)_{V_{pv}=V_m} = 0 \right\} [19].$$

La figure 2.2 représente les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ avec lesquelles on peut formuler le problème d'extraction des paramètres du modèle PV.

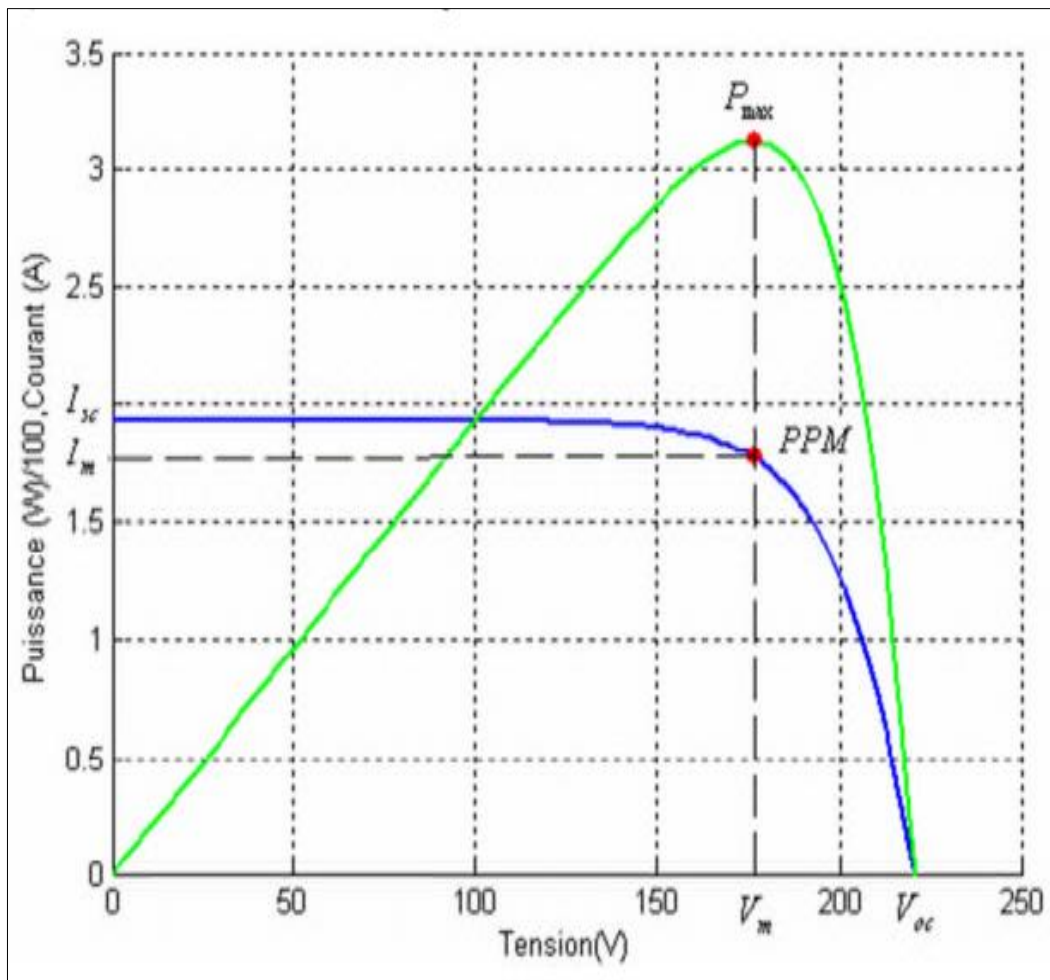


Figure 2.2. Caractéristique I-V-P du panneau PV.

Les équations non linéaires du système à résoudre sont définies comme suit :

De l'équation (2.6), on obtient :

$$(V_{pv}, I_{pv}) : \Rightarrow I_{pv} - I_{ph} + I_0 \left[-1 + \exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t} \right) \right] + \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (2.28)$$

A partir de cette équation, on peut tirer la première égalité comme suit :

$$(0, I_{sc}): \Rightarrow I_{sc} - I_{ph} + I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{R_s \cdot I_{sc}}{A \cdot V_t}\right) \right] + \frac{R_s \cdot I_{sc}}{R_p} = 0 \quad (2.29)$$

De la même façon, la deuxième égalité est obtenue comme suit :

$$(V_{oc}, 0): \Rightarrow I_{ph} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{oc}}{A \cdot V_t}\right) \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} = 0 \quad (2.30)$$

Sachant que la puissance fournie par une cellule PV est obtenue par la relation ci-dessous :

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}: \Rightarrow P_{pv} = V_{pv} \cdot \left(I_{ph} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \right) \quad (2.31)$$

D'où, la troisième égalité est obtenue comme suit :

$$P_{max} = V_m \cdot \left(I_{ph} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{A \cdot V_t}\right) \right] - \frac{V_m + R_s \cdot I_m}{R_p} \right) \quad (2.32)$$

Finalement, la dernière égalité est obtenue par $\left(\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}\right)_{V_{pv}=V_m} = 0$, ce qui conduit à

l'équation ci-dessous :

$$\frac{d}{dV_{pv}} \left\{ V_{pv} \cdot \left(I_{ph} - I_0 \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A \cdot V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \right) \right\}_{\substack{V_{pv}=V_m \\ I_{pv}=I_m}} = 0 \quad (2.33)$$

La forme simplifiée de l'égalité (2.33) est donnée par :

$$I_{ph} - I_0 \left[-1 + \left(1 + \frac{V_m}{A \cdot V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{A \cdot V_t}\right) \right] - \frac{2 \cdot V_m + R_s \cdot I_m}{R_p} = 0 \quad (2.34)$$

La résolution itérative des quatre égalités non linéaires (2.29), (2.30), (2.32) et (2.34) peut être assurées par la fonction « solve » du l'environnement *Matlab*.

2.4. Simulation :

L'étude expérimentale a été réalisée sur un panneau solaire de type *ISOFOTON I – 50* PV. Ses caractéristiques électriques typiques sont récapitulées dans le Tableau 2-2 ci-dessous :

Paramètre	Valeur correspondante
Puissance maximal P_{max}	39.10 W
Tension optimale V_m	14.9 V
Courant optimal I_m	2.62 A
Nombre de cellules	36

Tableau 2-2. Caractéristiques électriques typiques du panneau PV

Le panneau a été exposé directement à la lumière durant le jour du 27 avril 2015, les capteurs de température et de l'éclairement indiquent les mesures ci-dessous :

- La température absolue $T = 31.97^\circ C$.
- L'éclairement solaire $G = 761.28 W/m^2$.

L'objectif de notre travail est de développer un modèle adéquat modélisant le comportement du panneau suscitée en utilisant le circuit électrique équivalent d'une seule diode. La modélisation souhaitée est réalisée par les deux modèles PV à savoir : modèle à quatre paramètres méconnues et celui à trois paramètres méconnus. Ces paramètres sont optimisés par deux algorithmes différents: l'algorithme génétique GA et l'algorithme PSO.

Le tableau 2-3 compare les trois méthodes de résolution assurant la prédiction du courant fourni par le modèle PV à une seule diode et qui comporte quatre paramètres méconnus. Le tableau ci-dessous récapitule l'erreur quadratique moyenne fournie par les 256 distances entre le courant mesuré et celui fourni par les trois méthodes de résolutions susmentionnées. On obtient donc :

Méthode	Fonction de Lambert w	Fonction fsolve	Newthon Raphson
Erreur	1.821×10^{-2}	4.78231×10^{-4}	3.17981×10^{-4}

Tableau 2-3. Comparaison des erreurs fournies par les trois méthodes de résolution citées précédemment

Selon le Tableau 2-3, il est facile d'observer que la méthode de Newton-Raphson présente l'avantage d'assurer une meilleure minimisation du critère MSE en comparaison avec les deux autres méthodes restantes. Dans la suite de ce travail, nous n'utilisons que la méthode de Newton-Raphson pour résoudre l'équation de courant avec lequel l'optimisation des paramètres souhaités est assurée par les deux algorithmes évolutionnaires : GA et PSO.

Le tableau 2-4 représente les résultats des quatre paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec les deux algorithmes :

	I_{ph}	A	R_s	R_p	MSE
PSO	1.7707	1.2375	3.9088	263.39	3.17981×10^{-4}
GA	1.9596	0.917	8.0583	72.774	6.4018×10^{-4}

Tableau 2-4. Modèle PV à quatre paramètres

Selon le Tableau 2-4, il est facile d'observer que l'algorithme *PSO* a la capacité d'assurer une meilleure minimisation du critère *MSE* en comparaison avec celui fourni par l'algorithme *GA*.

Dans ce qui est suit, le modèle PV fourni par l'algorithme *PSO* est ensuite utilisé pour faire l'analyse et les tracés des caractéristique $I - V$ et $P - V$. D'où, la Figure 2.3.a compare les courants réel et prédit fournis par le système PV réel avec celui du modèle mathématique à quatre paramètres optimisé par l'algorithme *PSO*.

De plus, la figure 2.3.b compare les puissances correspondantes fournies par le système PV réel avec celui du modèle PV.

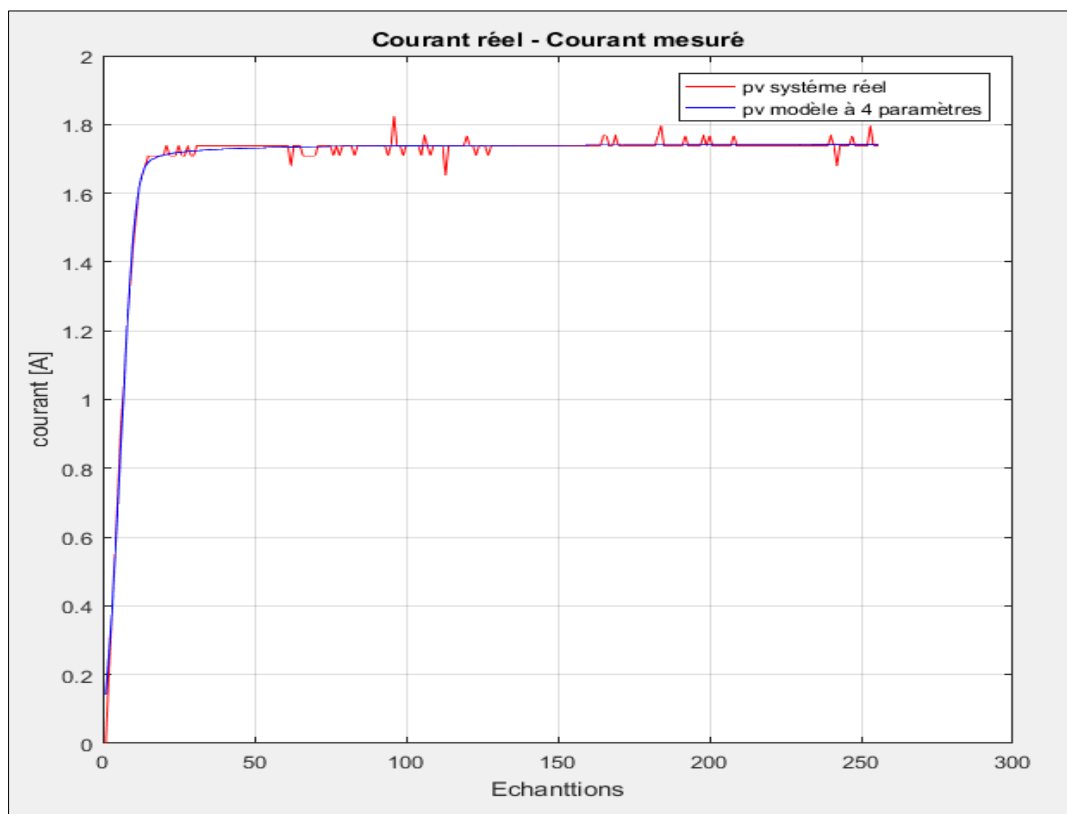


Figure 2.3.a. Comparaison des courants réel et prédit (cas du modèle PV à quatre paramètres).

A partir de la figure 2.3.a, il est clair de constater que la distance entre la mesure réelle du courant est étroitement rapprochée à celle du courant prédit par le modèle à quatre paramètres. Celle-ci est assurée pour toutes les 256 mesures. Ce résultat confirme l'efficacité de l'algorithme d'optimisation pour fournir le modèle PV souhaité.

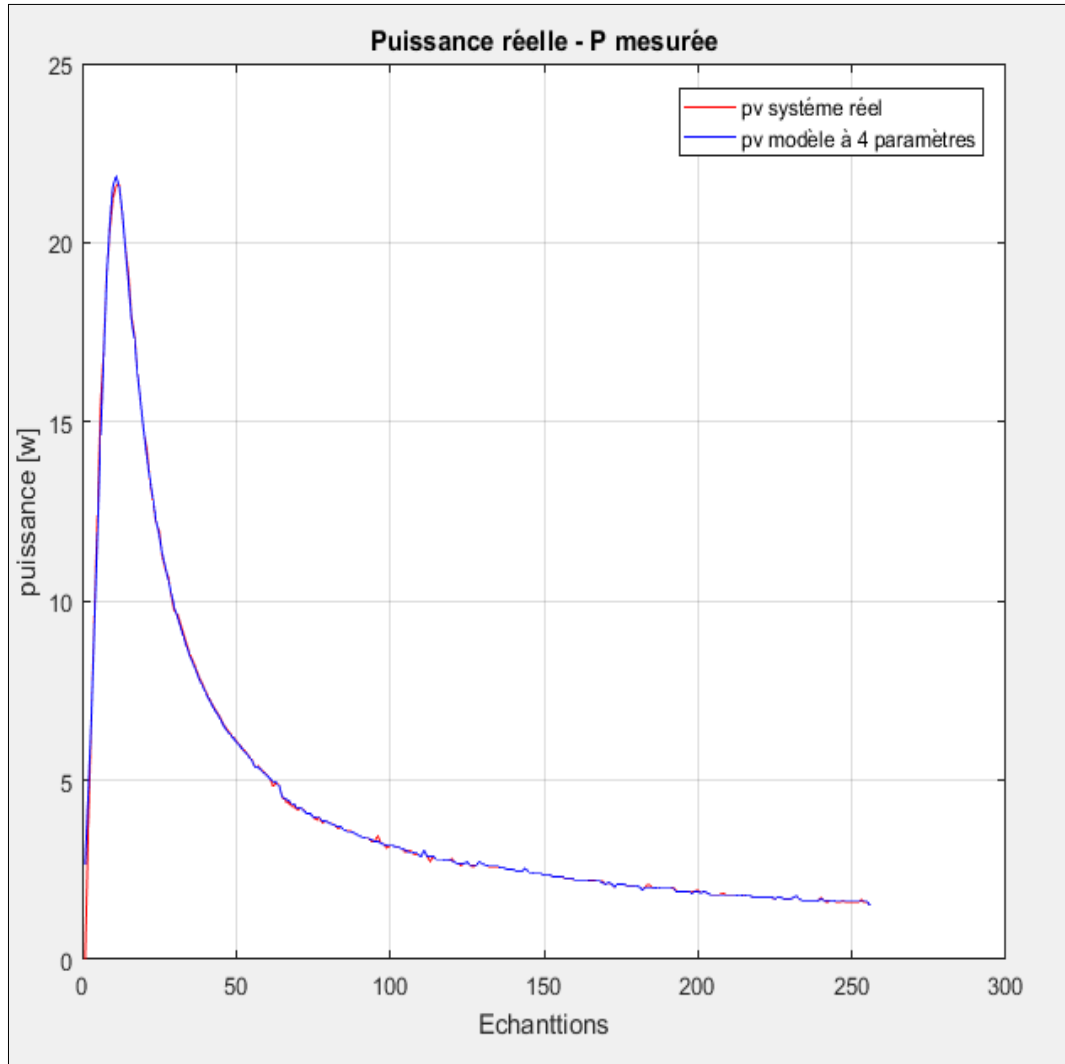


Figure 2.3.b. Comparaison des puissances fournies par le système PV et le modèle à quatre paramètres correspondant.

A partir de la figure 2.3.b, il est clair de constater que la puissance fournie par le système PV est parfaitement superposée à celle du modèle correspondant.

Dans la suite de ce travail, nous essayons de tracer les caractéristiques du panneau et le modèle à quatre paramètres correspondant assuré par l'algorithme *PSO*. A cet effet, la figure 2.4.a représente la courbe $I - V$ caractérisant le système PV réel. Cette dernière est comparée avec celle décrivant le modèle souhaité à quatre paramètres. De plus, la figure 2.4.b compare les courbes $P - V$ du système PV et le modèle correspondant.

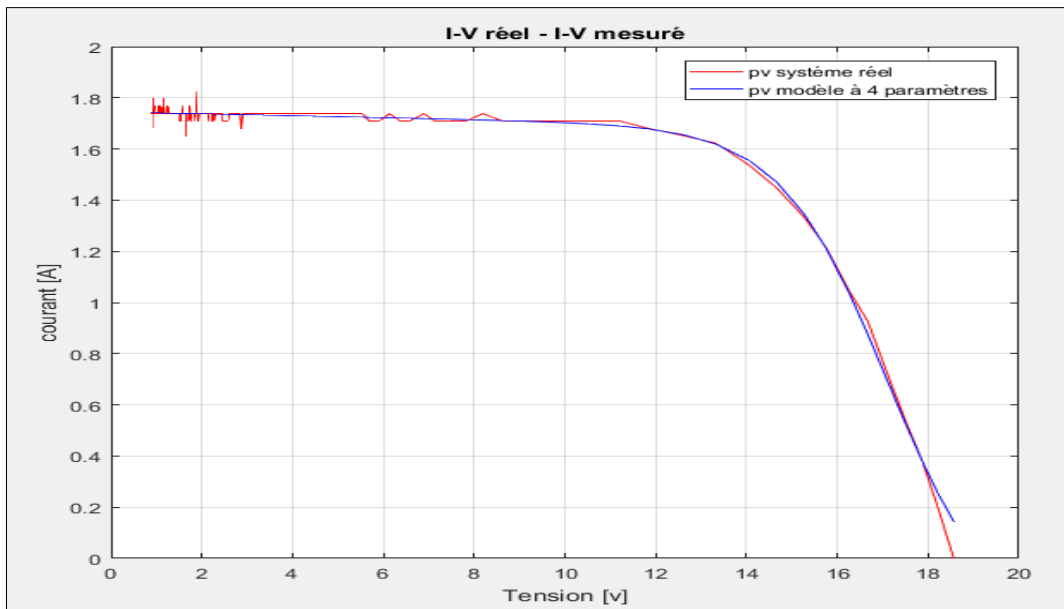


Figure 2.4.a. Caractéristique I-V (comparaison) « cas du modèle PV à quatre paramètres ».

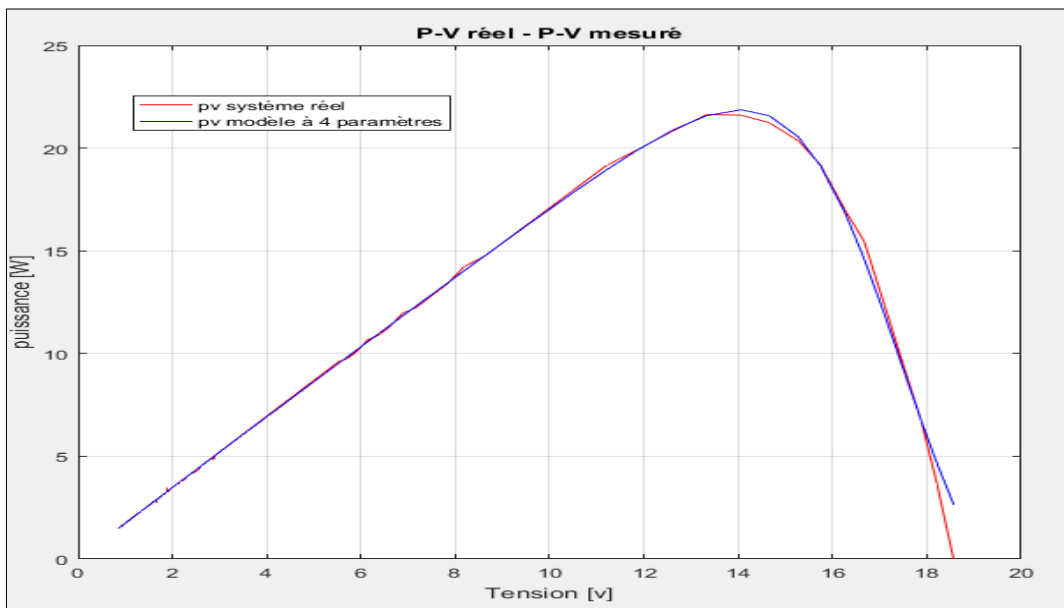


Figure 2.4.b. Caractéristique P-V (comparaison) « cas du modèle PV à 4 paramètres ».

A partir des figures 2.4.a et 2.4.b, on peut constater que le courant maximal prédit par le modèle à quatre paramètres atteint la valeur $I_m = 1.7416 A$ ainsi que la puissance maximale correspondante aboutie la crête $P_{max} = 21.863 W$. En revanche, le courant maximale fourni par le panneau PV réel devient égal à $I_m = 1.8252 A$, cependant la crête de la puissance atteinte la valeur $P_{max} = 21.63 W$. Ce qui confirme que le modèle PV obtenu peut offrir la possibilité de faire par simulation une synthèse des contrôleurs adéquats ainsi qu'une analyse et diagnostique dans les laboratoires de recherches et les résultats obtenus peuvent être directement implémentés dans le système PV réel.

Maintenant, nous allons essayer de développer un autre modèle PV à partir d'un circuit électrique équivalent possédant uniquement trois paramètres inconnus. Il faut noter ici que l'avantage d'élaborer un modèle avec un minimum de paramètres est de réduire au maximum possible la complexité du problème d'optimisation, ce qui permet d'éviter un fardeau de calcul énorme. De plus, il permet également de minimiser les incertitudes de modélisation qui affectent le modèle PV ce qui conduit à synthétiser des contrôleurs plus simples assurant la flexibilité de leur implémentation dans la boucle de commande ce qui peut augmenter la fiabilité de différents dispositifs utilisés durant l'extraction de la puissance maximale via le panneau PV réel.

Pour atteindre tous les objectifs suscités, le tableau 2-5 récapitule les trois paramètres optimaux du modèle PV souhaité en utilisant l'algorithme *PSO*

	A	R_s	R_p	MSE
PSO	0.71453	23.013	77.576	7.47741×10^{-4}

Tableau 2-5. Paramètres optimaux du modèle PV à trois paramètres

La figure 2.5.a compare les courants réel et prédit fournis par le système PV réel avec celui du modèle mathématique à trois paramètres, cependant la figure 2.5.b compare les puissances correspondantes fournies par le système PV réel avec celui du modèle PV.

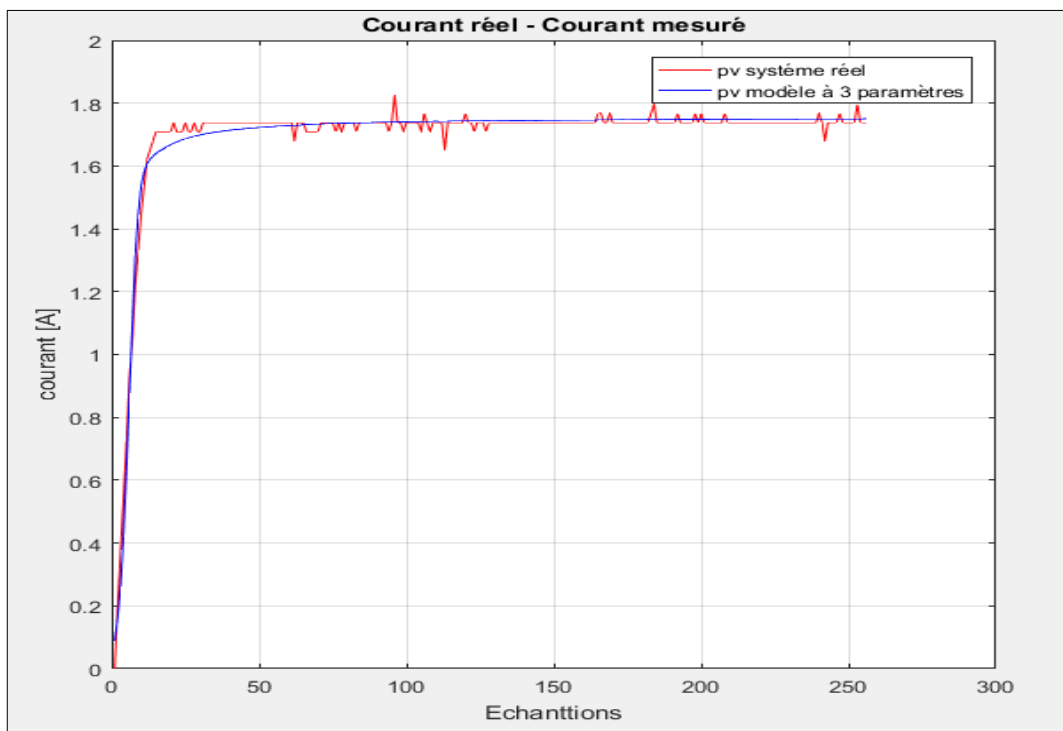


Figure 2.5.a. Comparaison des courants réel et prédit (cas du modèle PV à trois paramètres)

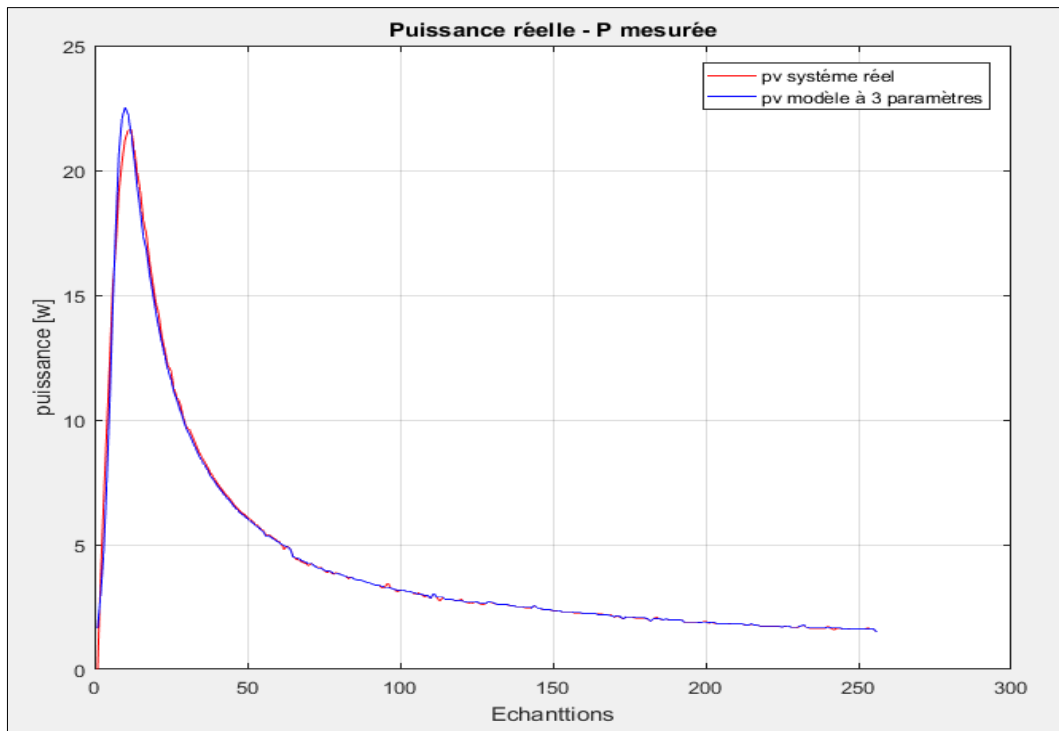


Figure 2.5.b. Comparaison des puissances fournies par le système PV réel et le modèle correspondant à trois paramètres

La figure 2.6.a compare les courbes $I - V$ du système PV réel et du modèle souhaité à trois paramètres. En revanche, la figure 2.6.b compare les courbes $P - V$ du système PV et le modèle correspondant.

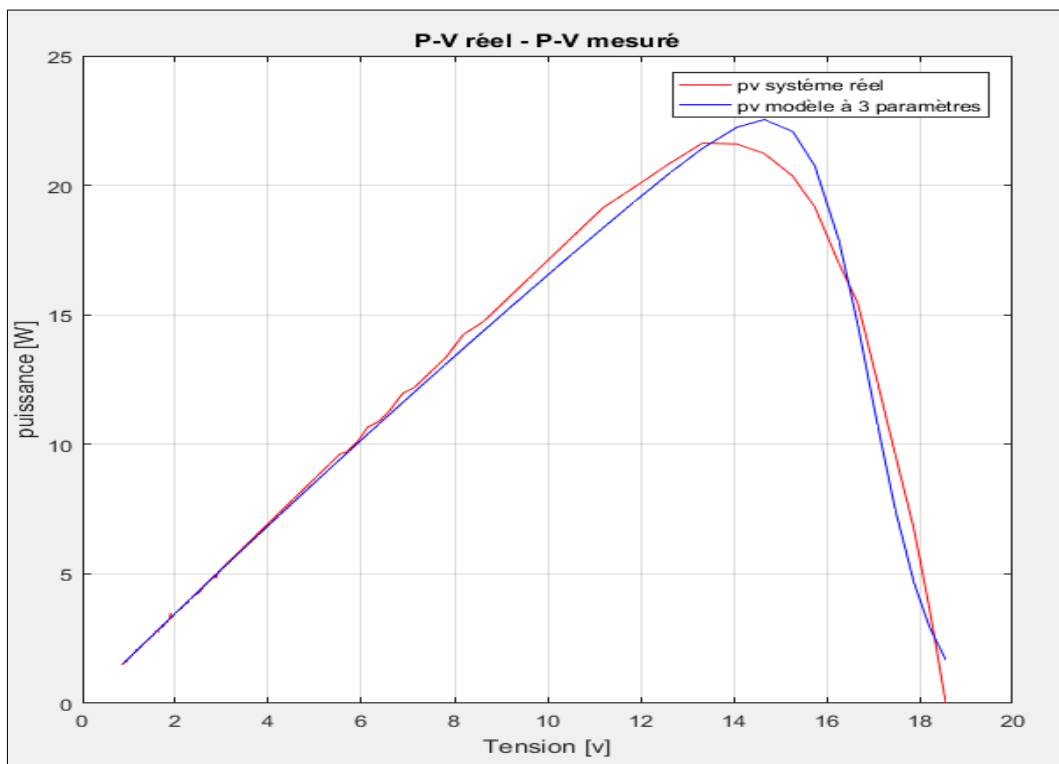


Figure 2.6.a. Caractéristique $I - V$ (comparaison) « cas du modèle PV à trois paramètres ».

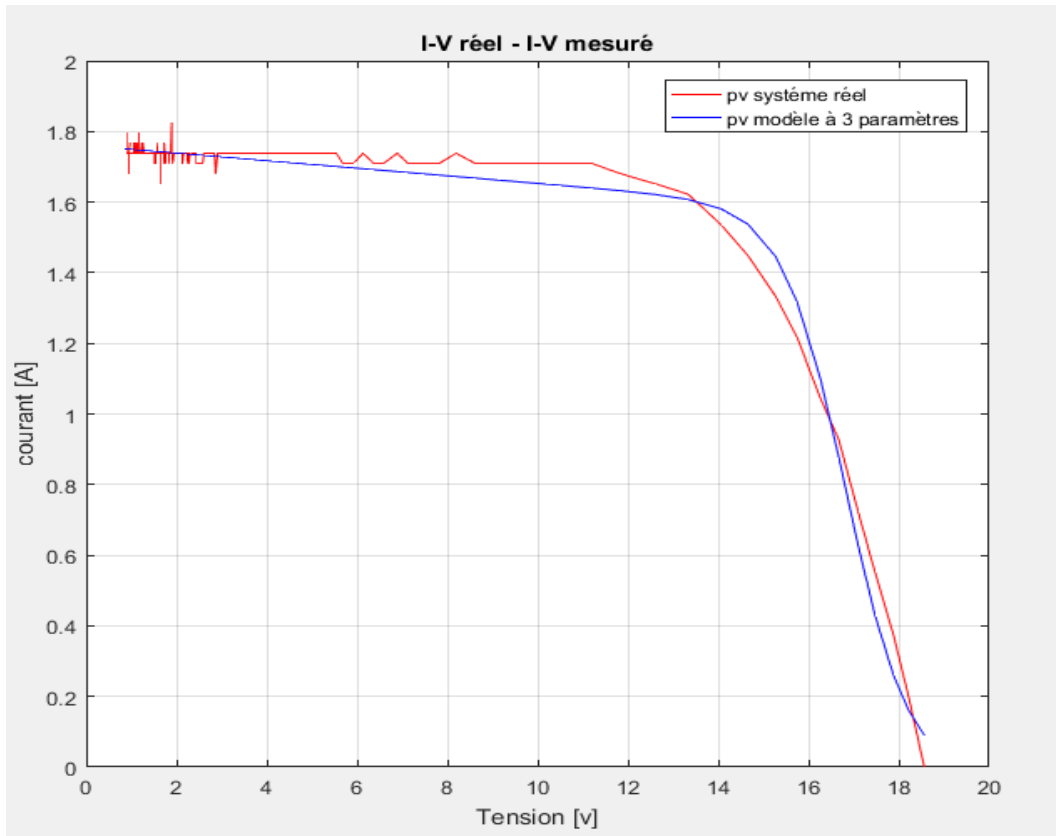


Figure 2.6.b. Caractéristique $P - V$ (comparaison) « cas du modèle PV à trois paramètres ».

L'observation sur les figures 2.6.a et 2.6.b montre que les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ du système PV réel et son modèle à trois paramètres correspondant sont identiques mais avec moins de précision on comparaison avec celles fournies par le modèle à quatre paramètres.

2.5. Conclusion:

Dans cette étude, nous avons présenté la modélisation d'un panneau solaire à partir des données expérimentales en utilisant deux modèles PV : l'un possédant quatre paramètres inconnus et l'autre est obtenu avec trois paramètres inconnus. L'optimisation des paramètres de chaque modèle PV précédent est assurée par l'algorithme *PSO* assurant la bonne minimisation du critère *MSE*. Les résultats de simulation ont permis de conclure que les caractéristiques électriques obtenus à partir d'un modèle mathématique à quatre paramètres assure une bonne précision de modélisation on comparaison avec celui de trois paramètres. Néanmoins, le coût de cette précision conduit à un modèle comportant plus d'incertitude de modélisation et plus de complexité prévue lors de la synthèse du contrôleur ainsi que leur implémentation dans la pratique.

Chapitre 3:

Modèle PV à double diode

3. Introduction :

Une cellule solaire est modélisée comme une jonction $P - N$ avec des caractéristiques non linéaires pour décrire sa réponse électrique. Pour analyser ces caractéristiques, un modèle mathématique de la cellule solaire est dérivé d'équations mathématiques en termes d'entrées et de sorties de cellules solaires [20].

Dans le chapitre précédent, nous avons évoqué le modèle mathématique à simple diode, qui est le modèle le plus couramment utilisé en raison du nombre réduit de paramètres de circuit à identifier. Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation de la cellule photovoltaïque à l'aide d'un modèle PV basé sur le circuit électrique équivalent à double diode dont ses paramètres nécessitant une optimisation plus poussée en comparaison avec celui cité en chapitre précédent.

3.1. Description du circuit électrique équivalent à double diode:

Le comportement réel de la cellule solaire PV est maintenant modélisé par un circuit électrique qui contient double diode D_1 et D_2 tel que ceci est représenté dans le schéma de la figure 3.1 ci-dessous :

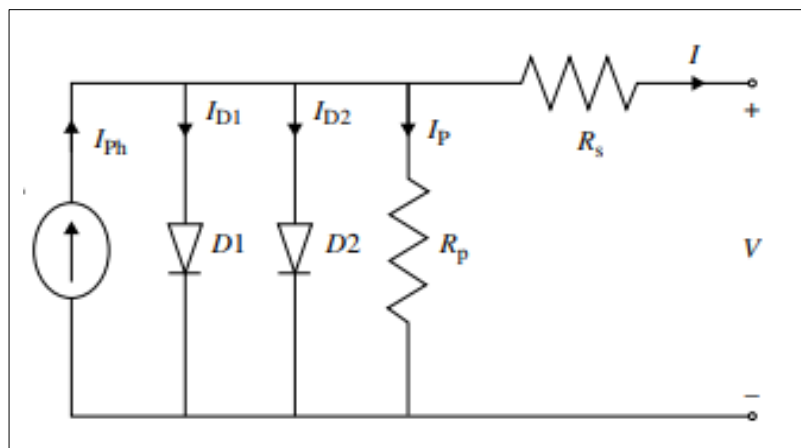


Figure 3.1. Circuit électrique équivalent à double diode de la cellule solaire.

Le modèle à une seule diode offre un comportement satisfaisant dans des conditions de fonctionnement normales mais offre souvent un comportement dégradé sous faible rayonnement solaire. Cependant, certains chercheurs ont exprimé l'effet des pertes de recombinaison des porteurs de charge dans la région d'appauvrissement par une diode supplémentaire. Ce modèle est appelé modèle PV à double diode [20].

A partir de la figure 3.1, il est clair d'observer que le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d_1} - I_{d_2} - I_p \quad (3.1)$$

Où I_{d_1} et I_{d_2} sont les courants de saturation de la première et de la deuxième diode respectivement. Le courant prédit par le circuit présenté par la figure 3.1 peut être exprimé comme suit:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[-1 + \exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_1 \cdot V_{t_1}} \right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_2 \cdot V_{t_2}} \right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (3.2)$$

Avec :

- I_{01} représente le courant de saturation de la première diode D_1 ;
- I_{02} représente le courant de saturation de la seconde diode D_2 ;
- A_1 et A_2 représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes D_1 et D_2 ;

En général, le facteur d'idéalité de la diode D_2 varie beaucoup d'une cellule à une autre, ce qui témoigne d'une fréquence de recombinaison plus ou moins grande suivant le matériau et sa qualité. A cet effet, le modèle à une seule diode ne fait pas la distinction entre la diffusion et la recombinaison et inclut les deux dans une même diode [21].

- Les résistances R_s et R_p tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule photovoltaïque. De plus, la résistance R_s est due à la contribution des résistances de base, du front de la jonction et des contacts avant et arrière. Cependant la résistance R_p rend compte des courants de fuites engendrés par des impuretés métalliques dans la jonction ou encore des imperfections du réseau cristallin. La connaissance des valeurs de ces deux résistances parasites est importante dans l'étude de la qualité du matériau et la recherche de l'amélioration du rendement d'une cellule photovoltaïque. En effet, le facteur de forme est directement lié à ces deux résistances. Plus la valeur de R_p est grande, moins il y a de courants de fuite et le facteur de forme est meilleur. En revanche, plus la valeur de R_s est petite, moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur ou à la surface du semi-conducteur ou le facteur de forme est meilleur [21].
- V_{t_1} et V_{t_2} représentent, respectivement, les tensions thermiques des deux diodes D_1 et D_2 .

Ces tensions peuvent être définies par :

$$V_t = V_{t_1} = V_{t_2} = N_s \cdot \frac{K \cdot T}{q} \quad (3.3)$$

Le courant de saturation inverse de l'une des diodes ($I_0 = I_{01} = I_{02}$) peut être trouvé en utilisant l'équation ci-après :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^{\frac{3}{A}} \cdot \exp \left\{ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right\} \quad (3.4)$$

Sachant que le courant I_{rs} est défini par $I_{rs} = \frac{I_{sc}}{-1 + \exp\left(\frac{V_{oc}}{A \cdot V_t}\right)}$. Bien que le modèle à double diode présente une plus grande précision que le modèle à une seule diode, il nécessite malheureusement des efforts de calcul considérables.

3.1.1. Différents modèle PV modélisant la cellule PV

3.1.1.1. Modèle mathématique comportant cinq paramètres inconnus :

D'après l'Eq. 3.2, le modèle à deux diodes comporte cinq paramètres à optimiser. Ces derniers doivent être déterminés de façon optimale afin de permettre la prédiction du courant de sortie ou la tension de sortie du module PV. Ces paramètres inconnus sont ensuite regroupés dans un vecteur de décision, noté par DV_{2d} avec $DV_{2d} = [I_{ph}, R_s, R_p, A_1, A_2]^T$.

3.1.1.2. Modèle mathématique comportant quatre paramètres inconnus :

D'une façon similaire, le modèle PV souhaité peut être élaboré à partir de quatre paramètres inconnus regroupés dans un vecteur de décision, noté par la suite par DV_{2d-4} avec $DV_{2d-4} = [R_s, R_p, A_1, A_2]^T$. Dans ce cas, le courant photonique I_{ph} peut être substitué par l'équation ci-dessous :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + K_i \cdot (T - T_n)] \quad (3.5)$$

3.2. Calcul du courant prédit par le modèle PV à double diode:

L'équation fournissant le courant de la cellule photovoltaïque est une fonction purement non linéaire (voir Eq. 3.2). Pour cela, la détermination du courant prédit nécessite l'application d'une méthode de résolution efficace. Parmi de celle-ci, on peut citer: méthode de *Newton – Raphson*, méthode utilisant la fonction *Lambert – W*, et la méthode utilisant la fonction *Matlab* « *fsolve* » où les détails de chaque méthode sont présentés dans la suite de ce travail.

3.2.1. Méthode de Newton – Raphson :

Comme nous l'avons mentionné précédemment, cette méthode est la plus couramment utilisée pour résoudre des équations non linéaires. La méthode de Newton est décrite comme $x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$. Sachant que $f(I)$ est donnée par :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_1 \cdot V_t1}\right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{A_2 \cdot V_t2}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (3.6)$$

D'où, L'application de la méthode de *Newton – Raphson* permet de calculer la valeur du courant I prédit, pour chaque itération, comme suit :

$$I_{pv_{n+1}} = I_{pv_n} - \frac{I_{ph} - I_{pv_n} - I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_1 \cdot V_t}\right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_2 \cdot V_t}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{R_p}}{-1 - \left(\frac{R_s \cdot I_{01}}{A_1 \cdot V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_1 \cdot V_t}\right) - \left(\frac{R_s \cdot I_{02}}{A_2 \cdot V_t}\right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_2 \cdot V_t}\right) - \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (3.7)$$

3.2.2. Fonction de Lambert – W :

Le courant de sortie des cellules solaires basé sur le modèle à double diode est donné par l'équation suivante [22]:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a_1}\right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a_2}\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} \quad (3.8)$$

Avec :

- a_1 et a_2 : sont, respectivement, donnés par $a_1 = \frac{A_1 \cdot N_s \cdot K \cdot T}{q}$ et $a_2 = \frac{A_2 \cdot N_s \cdot K \cdot T}{q}$;
- q : représente la charge de l'électron ;
- K : représente la constante de Boltzmann ;
- N_s : représente le nombre de cellules solaires en série ;
- T : représente la température absolue donnée en Kelvin.

Il est clair de noter que l'Eq. 3.8 contient deux fonctions exponentielles. Pour que chaque fonction exponentielle soit écrite sous la forme d'une fonction W de *Lambert*, il faut diviser l'équation de la caractéristique $I - V$ entière en deux équations, sous la forme suivante:

$$ax + b = e^{(cx+d)} \quad (3.9)$$

Où a , b , c et d sont des paramètres à déterminer. Les deux côtés de l'Eq. 3.9 sont multipliés par le terme $-\frac{c}{a}e^{(-cx-\frac{cb}{a})}$. On obtient donc :

$$\left(-cx - \frac{cb}{a}\right) e^{(-cx-\frac{cb}{a})} = -\frac{c}{a} e^{\left(\frac{ad-cb}{a}\right)} \quad (3.10)$$

Si on pose maintenant $x = -\frac{c}{a}e^{\left(\frac{ad-cb}{a}\right)}$ et $W(x) = \left(-cx - \frac{cb}{a}\right)$, alors nous pouvons trouver que l'Eq. 3.10 est équivalente à $W(x)e^{W(x)} = x$ qui est la définition de la fonction W de Lambert. Par conséquent, l'Eq. 3.8 peut être écrite comme suit :

$$-\frac{R_s+R_p}{R_p} \cdot I_{pv} + (I_{01} + I_{02} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p}) = I_{01} \cdot \exp\left(\frac{R_s}{a_1} \cdot I_{pv} + \frac{V_{pv}}{a_1}\right) + I_{02} \cdot \exp\left(\frac{R_s}{a_2} \cdot I_{pv} + \frac{V_{pv}}{a_2}\right) \quad (3.11)$$

Soient C_1 , C_2 , D_1 et D_2 données par :

$$C_1 = \frac{R_s}{a_1}, D_1 = \frac{V_{pv}}{a_1}, C_2 = \frac{R_s}{a_2} \text{ et } D_2 = \frac{V_{pv}}{a_2}$$

Pour tirer parti de la fonction W de Lambert, nous supposons que les Eqs. 3.12 et 3.13 tiennent les deux expressions ci-dessous :

$$I_{01} \cdot \exp(C_1 \cdot I + D_1) = I_{01} \cdot (A_1 \cdot I_{pv} + B_1) \quad (3.12)$$

$$I_{02} \cdot \exp(C_2 \cdot I + D_2) = I_{02} \cdot (A_2 \cdot I_{pv} + B_2) \quad (3.13)$$

Où A_1 , A_2 , B_1 et B_2 sont des paramètres à déterminer en utilisant la méthode du coefficient indéterminé. Selon les Eqs. 3.12 et 3.13, l'Eq. 3.11 peut être écrite comme suit :

$$I_{01} \cdot (A_1 \cdot I_{pv} + B_1) + I_{02} \cdot (A_2 \cdot I_{pv} + B_2) = -\frac{R_s+R_p}{R_p} \cdot I_{pv} + \left(I_{01} + I_{02} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p}\right) \quad (3.14)$$

En combinant des termes similaires, l'Eq. 3.14 devient :

$$(A_1 \cdot I_{01} + A_2 \cdot I_{02}) \cdot I_{pv} + (B_1 \cdot I_{01} + B_2 \cdot I_{02}) = -\frac{R_s+R_p}{R_p} \cdot I_{pv} + \left(I_{01} + I_{02} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p}\right) \quad (3.15)$$

Selon la méthode du coefficient indéterminé, les coefficients correspondants de termes similaires des deux côtés de l'Eq. 3.15 devrait être égale, pour tous I_{pv} . Ensuite, nous pouvons obtenir les deux expressions suivantes :

$$A_1 \cdot I_{01} + A_2 \cdot I_{02} = -\frac{R_s+R_p}{R_p} \quad (3.16)$$

$$B_1 \cdot I_{01} + B_2 \cdot I_{02} = I_{01} + I_{02} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (3.17)$$

Nous pouvons voir que les deux équations. 3.16 et 3.17 incluent quatre variables, à savoir : A_1 , A_2 , B_1 et B_2 . Par conséquent, la relation entre A_1 et A_2 et la relation entre B_1 et B_2 sont linéaires.

Afin de simplifier le calcul, supposons ici que $A_1 = A_2 = \mathcal{A}$ et $B_1 = B_2 = \mathcal{B}$. Si on remplace \mathcal{A} dans l'Eq. 3.16 et \mathcal{B} dans l'Eq. 3.17, respectivement, nous pouvons obtenir la valeur de \mathcal{A} et de \mathcal{B} comme suit:

$$\mathcal{A} = -\frac{R_s + R_p}{R_p \cdot (I_{01} + I_{02})} \quad (3.18)$$

$$\mathcal{B} = \frac{R_p \cdot (I_{01} + I_{02} + I_{ph}) - V_{pv}}{R_p \cdot (I_{01} + I_{02})} \quad (3.19)$$

Similaire au processus de déduction des Eqs. 3.9 et 3.10, les Eqs. 3.14 et 3.15 peuvent tous deux utiliser la fonction W de Lambert pour générer une expression explicite du courant I_{pv} .

En remplaçant \mathcal{A} , \mathcal{B} , C_1 et D_1 dans l'Eq. 3.12, nous pouvons obtenir une expression explicite du courant I_{pv} , notée I_{pv_1} comme l'Eq. 3.20 :

$$I_{pv_1} = \frac{R_p \cdot (I_{01} + I_{02} + I_{ph}) - V_{pv}}{(R_s + R_p)} - \left(\frac{a_1}{R_s} \cdot LambertW \left(\frac{R_s \cdot R_p \cdot (I_{01} + I_{02})}{a_1 \cdot (R_p + R_s)} \cdot \exp \left(\frac{R_p \cdot (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{01} + R_s \cdot I_{02} + V_{pv})}{a_1 \cdot (R_p + R_s)} \right) \right) \right) \quad (3.20)$$

En substituant \mathcal{A} , \mathcal{B} , C_2 et D_2 dans l'Eq. 3.11, nous pouvons obtenir une autre expression explicite du courant I_{pv} , notée I_{pv_2} comme l'Eq. 3.21 :

$$I_{pv_2} = \frac{R_p \cdot (I_{01} + I_{02} + I_{ph}) - V_{pv}}{(R_s + R_p)} - \left(\frac{a_2}{R_s} \cdot LambertW \left(\frac{R_s \cdot R_p \cdot (I_{01} + I_{02})}{a_2 \cdot (R_p + R_s)} \cdot \exp \left(\frac{R_p \cdot (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{01} + R_s \cdot I_{02} + V_{pv})}{a_2 \cdot (R_p + R_s)} \right) \right) \right) \quad (3.21)$$

Par conséquent, l'expression explicite du courant I_{pv} autour de la tension V_{pv} peut être représentée par l'Eq. 3.22 comme suit $I_{pv} = \frac{1}{2} \cdot I_{pv_2} + \frac{1}{2} \cdot I_{pv_1}$. D'où, on obtient :

$$I_{pv} = \left(\frac{R_p \cdot (I_{01} + I_{02} + I_{ph}) - V_{pv}}{(R_s + R_p)} \right) - \left(\frac{a_2}{2 \cdot R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_p \cdot (I_{01} + I_{02})}{a_2 \cdot (R_p + R_s)} \cdot \exp \left(\frac{R_p \cdot (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{01} + R_s \cdot I_{02} + V_{pv})}{a_2 \cdot (R_p + R_s)} \right) \right) \right) - \left(\frac{a_1}{2 \cdot R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_p \cdot (I_{01} + I_{02})}{a_1 \cdot (R_p + R_s)} \cdot \exp \left(\frac{R_p \cdot (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{01} + R_s \cdot I_{02} + V_{pv})}{a_1 \cdot (R_p + R_s)} \right) \right) \right) \quad (3.22)$$

3.2.3. Fonction *f* solve:

On utilise cette fonction pour la résolution du système d'équations non linéaires qui caractérise le modèle à double diode d'une cellule photovoltaïque. Ce système est obtenu via l'Eq. 3.23 ci-dessous :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_{01} \left[-1 + \exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a_1} \right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{a_2} \right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (3.23)$$

3.3. Identification paramétrique du modèle PV:

3.3.1. Identification utilisant l'optimisation par GA ou PSO :

L'extraction des paramètres du modèle de cellule solaire est un processus d'optimisation qui minimise la différence entre les mesures réelles du panneau et celles prédites par le modèle PV correspondant. L'estimation de paramètre utilisant la technique d'optimisation est implémentée dans l'approche suivante [23]:

- Un ensemble de données réelles des courants mesurés et de tensions mesurées pour une cellule solaire ou un module PV sont obtenues dans différentes conditions climatiques ;
- Une fonction objective est définie pour minimiser la différence entre les données réelles et les valeurs prédites par le modèle souhaité ;
- Les paramètres sont ajustés en appliquant un algorithme d'optimisation jusqu'à ce que la meilleure fonction objective soit minimisée au maximum possible ;
- Après avoir terminé l'algorithme d'optimisation, les paramètres optimaux sont extraits de la solution optimale du problème d'optimisation sous contraintes.

Selon l'Eq. 3.2, les paramètres inconnus sont nécessaires pour calculer le courant prédit du module PV [16]. Pour atteindre cet objectif, on utilise les deux algorithmes : PSO et GA du logiciel *Matlab*. Ces deux algorithmes sont disponibles dans les deux fonctions « *particleswarm.m* » et « *ga.m* » respectivement

3.3.2. Identification utilisant la résolution d'un système d'équations non linéaires :

Cette méthode, présente une méthodologie pour l'extraction des paramètres des cellules PV par l'utilisation des modèles électriques à double exponentiel, le but de la méthode proposée étant l'extraction des paramètres en utilisant uniquement les courbes expérimentales $I - V$ et $P - V$ du panneau solaire. A cet effet, la définition du système d'équations non linéaires est fondée sur le choix des trois points spécifiques ci-dessous ainsi que la condition aboutissant le *MPP* [24]. On aura donc :

- $P_1 \rightarrow (0, I_{sc})$: le courant égal au courant de court-circuit et la tension égale à zéro ;
- $P_2 \rightarrow (V_{oc}, 0)$: la tension égale à la tension en circuit ouvert et le courant égal à zéro ;
- $P_3 \rightarrow (V_m, I_m)$: le point fournissant la puissance maximale P_{max} ;
- $P_4 \rightarrow \left(\frac{dP}{dv}\right)_{\substack{V_{pv}=V_m \\ I_{pv}=I_m}}$: la condition assurant le *MPP*.

Les équations non linéaires du système à résoudre sont donc :

$$\begin{cases} I_{sc} - I_{ph} + I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{R_s \cdot I_{sc}}{A_1 \cdot V_{t1}}\right) \right] + I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{R_s \cdot I_{sc}}{A_2 \cdot V_{t2}}\right) \right] + \frac{R_s \cdot I_{sc}}{R_p} = 0 \\ I_{ph} - I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{oc}}{A_1 \cdot V_{t1}}\right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_{oc}}{A_2 \cdot V_{t2}}\right) \right] - \frac{V_{oc}}{R_p} = 0 \\ V_m \cdot \left(I_{ph} - I_{01} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{A_1 \cdot V_{t1}}\right) \right] - I_{02} \left[-1 + \exp\left(\frac{V_m + R_s \cdot I_m}{A_2 \cdot V_{t2}}\right) \right] - \frac{V_m + R_s \cdot I_m}{R_p} \right) - P_{max} = 0 \\ I_{ph} + I_{01} + I_{02} - I_{01} \left[\left(1 + \frac{V_m}{A_1 V_{t1}}\right) \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{A_1 V_{t1}}\right) \right] - I_{02} \left[\left(1 + \frac{V_m}{A_2 V_{t2}}\right) \exp\left(\frac{V_m + R_s I_m}{A_2 V_{t2}}\right) \right] - \frac{2V_m + R_s I_m}{R_p} = 0 \end{cases}$$

3.4. Simulation :

Nous appliquons la même expérience précédente au modèle à double diode de la cellule photovoltaïque de sorte que le panneau photovoltaïque soit exposé à la lumière durant le jour du 27 avril 2015, avec les capteurs de la température absolue et de l'éclairement solaire indiquant 31.97 °C et 761.28 W/m² respectivement. L'objectif est toujours de comparer le modèle mathématique à double diode avec le comportement réel fourni par le système PV réel, mais auparavant, une équation qui caractérise le modèle mathématique contient des paramètres à déterminer qui doivent être extraits par les deux algorithmes spécifiques : *GA* et *PSO*.

Il convient à noter que le modèle mathématique à double diode relatif à la cellule solaire PV comporte soit cinq paramètres ou bien quatre paramètres inconnus. Sachant que la méthode

de *Newton – Raphson*, *Lambert – W* et la fonction *fsolve* du *Matlab* sont utilisées pour prédire le vecteur de courant et cela à partir de 256 mesures réelles de tensions et 256 mesures réelles de courant. De plus, la fonction objective est formulée via le critère *MSE* obtenu à partir de l'écart de courant généré entre les deux vecteurs de courant prédit et réel. Les deux algorithmes : *GA* et *PSO* sont appliqués plusieurs fois pour minimiser le critère précédent et le tableau 3-1 récapitule les deux meilleures solutions optimales qu'à partir desquelles on peut développer les cinq paramètres du modèle souhaité. On aura donc :

	I_{ph}	A_1	A_2	R_s	R_p	<i>MSE</i>
PSO	1.7554	1.5034	0.56788	3.9088	263.39	2.1595×10^{-4}
GA	1.8146	1.000	0.4	8.2663	213.62	4.1237×10^{-4}

Tableau 3-1. Paramètres optimaux du modèle PV à double diode (cas de cinq paramètres inconnus)

Dans la section suivante, nous utilisons que le modèle PV fourni par l'algorithme *PSO* , sachant qu'il est produit une meilleure minimisation du critère *MSE* par rapport à celui de *GA*. Par conséquent, la figure 3.2 compare les deux courants réel et prédit, cependant la figure 3.3 compare les puissances correspondantes. On obtient:

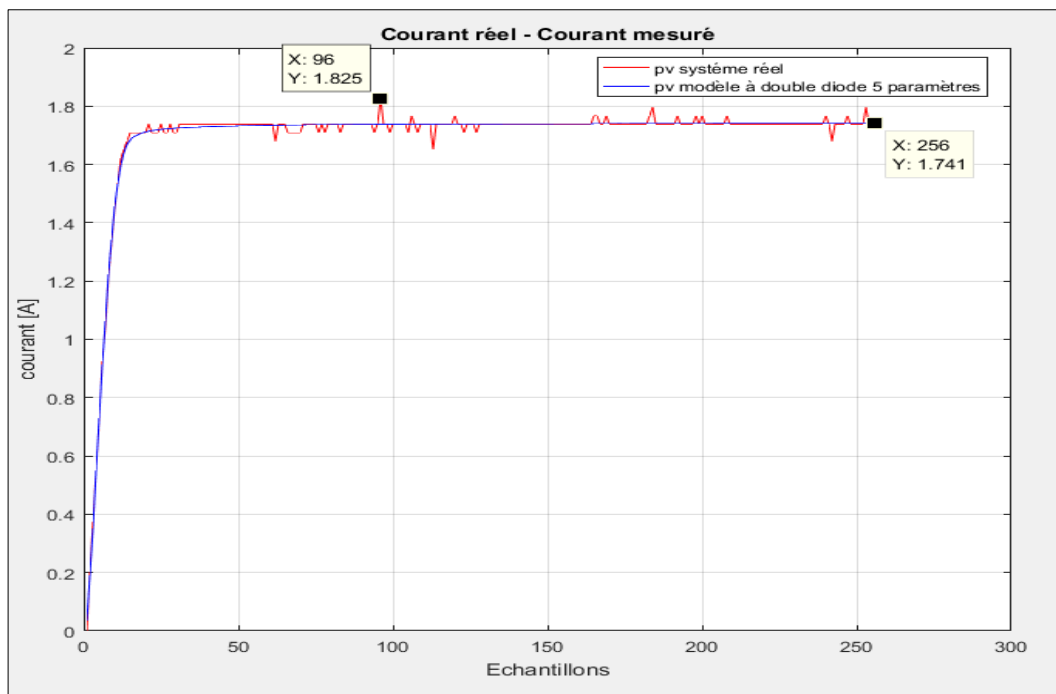


Figure 3.2. Comparaison des deux courants prédit et réel : cas du modèle PV à double diode comportant cinq paramètres inconnus.

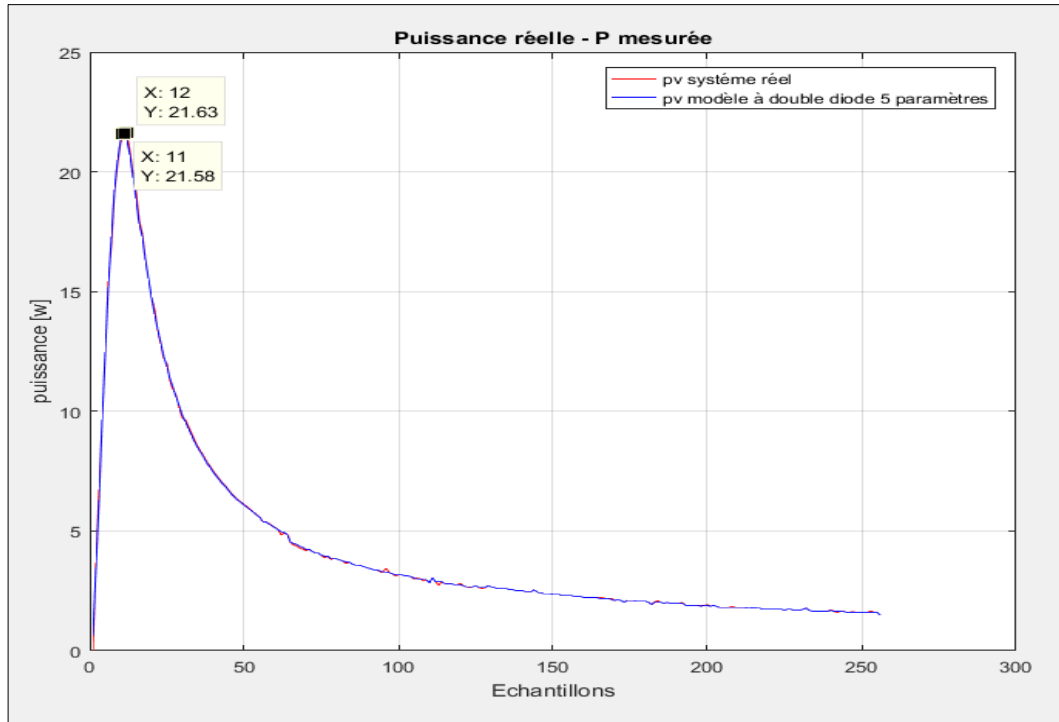


Figure 3.3. Comparaison des puissances du panneau et du modèle à double diode qui comporte cinq paramètres inconnus.

De plus, la figure 3.4 compare les caractéristiques $I - V$ fournies par le système PV réel et le modèle correspondant, cependant la figure 3.5 compare les caractéristiques $P - V$ correspondantes. On obtient :

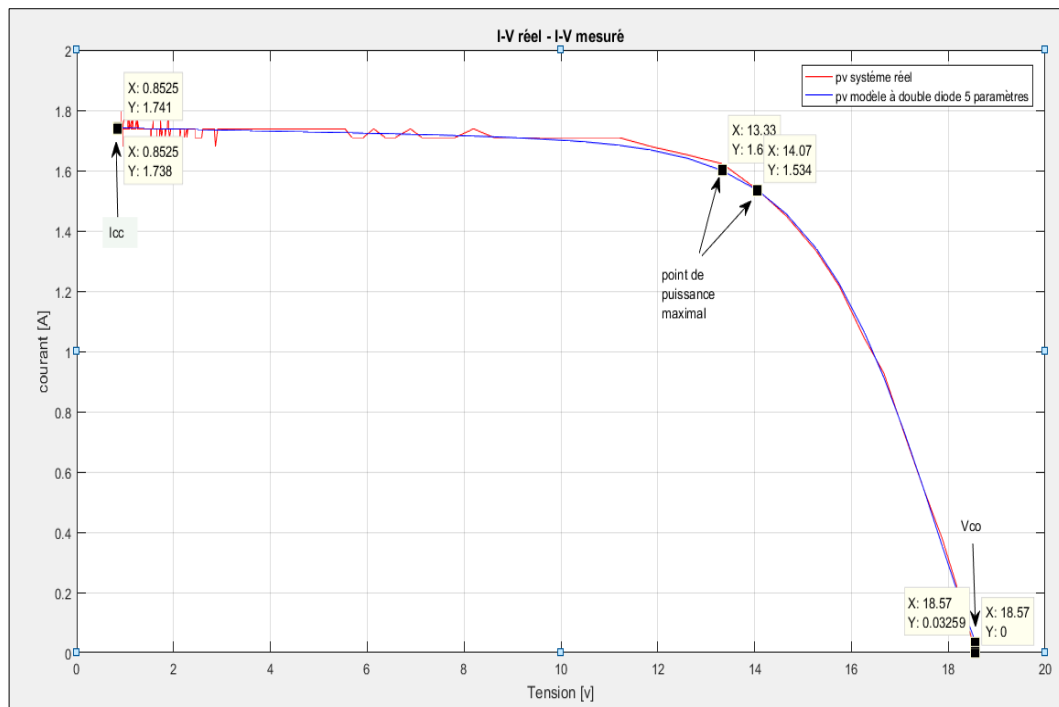


Figure 3.4. Caractéristique $I - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus.

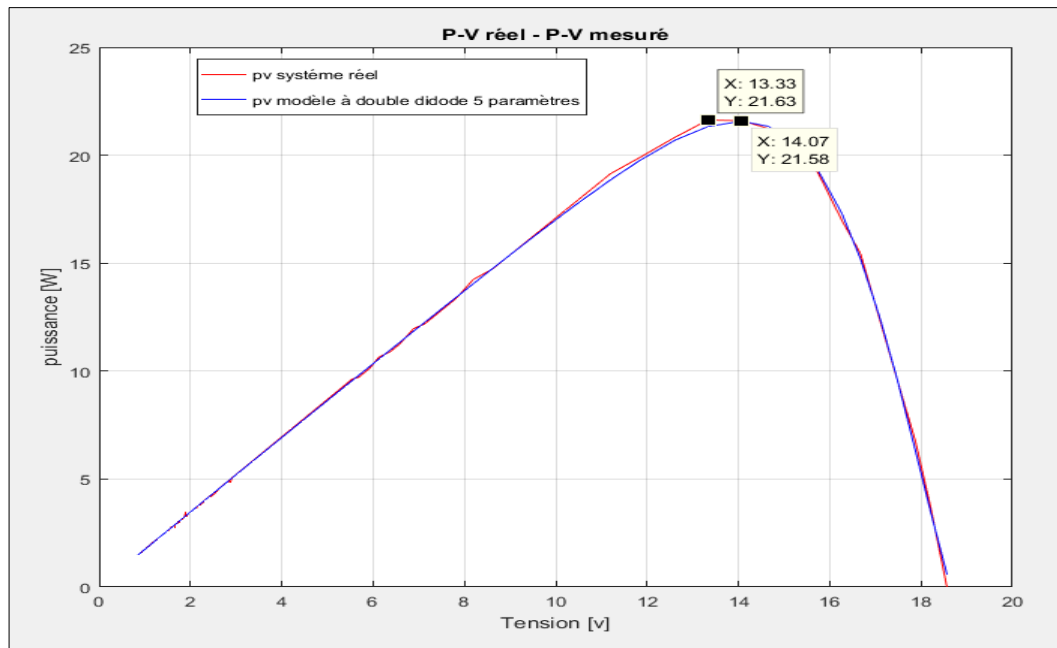


Figure 3.5. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus.

A partir des deux figures 3.2 et 3.3, on observe clairement que la valeur maximale du courant prédit atteint la valeur $I_m = 1.7414 A$ ainsi que la puissance maximale correspondante aboutie le seuil de $P_{max} = 21.577 W$. En revanche, les valeurs du courant réel ainsi que la puissance maximale correspondante sont égales à $I_m = 1.8252 A$, $P_{max} = 21.63 W$ respectivement. De plus, selon la figure 3.4, on peut remarquer que la valeur de la tension du circuit ouvert ainsi que celle du courant de court-circuit fournies par le modèle PV sont égales à $I_{cc} = 1.741 A$ et $V_{oc} = 18.57 V$ respectivement. Cependant, les valeurs réelles correspondantes sont données par $I_{cc} = 1.738 A$ et $V_{oc} = 18.57 V$. Dans ce cas, on peut conclure que le modèle PV à cinq paramètres a la capacité de décrire presque les mêmes grandeurs électriques du système réel. De plus, les deux figures 3.4 et 3.5 confirment l'efficacité de ce modèle via les deux caractéristiques $I - V$ et $P - V$.

Dans ce qui est suit, nous allons remplacer le modèle précédent par un modèle mathématique comportant seulement quatre paramètres inconnus. Ceci est assuré par l'introduction de l'expression équivalente du photo-courant définie préalablement par l'Eq. 3.5. Le processus de calcul du courant prédit ainsi que la minimisation du critère correspondant reste le même que celui suivi pour le cas du modèle PV à cinq paramètres. Par conséquent, le tableau 3.2 récapitule les quatre meilleurs paramètres optimaux du modèle fournis par l'algorithme *PSO*

	A_1	A_2	R_s	R_p	MSE
PSO	0.18166	0.72126	21.906	72.627	7.44884×10^{-4}

Tableau 3-2. les quatre meilleurs paramètres optimaux du modèle fournis par l’algorithme PSO

Les figures 3.6 et 3.7 comparent, respectivement, le courant et la puissance obtenue à partir du système PV réel et le modèle mathématique de double diode possédant les quatre paramètres optimaux cités précédemment. On obtient donc :

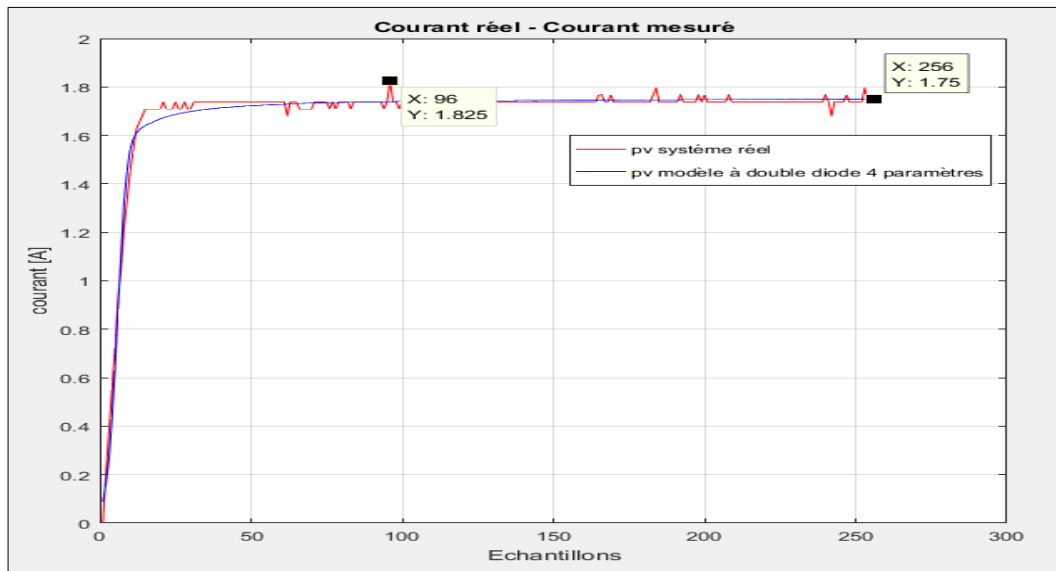


Figure 3.6. Comparaison du courant mesuré avec celui prédit par le modèle à double diode comportant quatre paramètres inconnus.

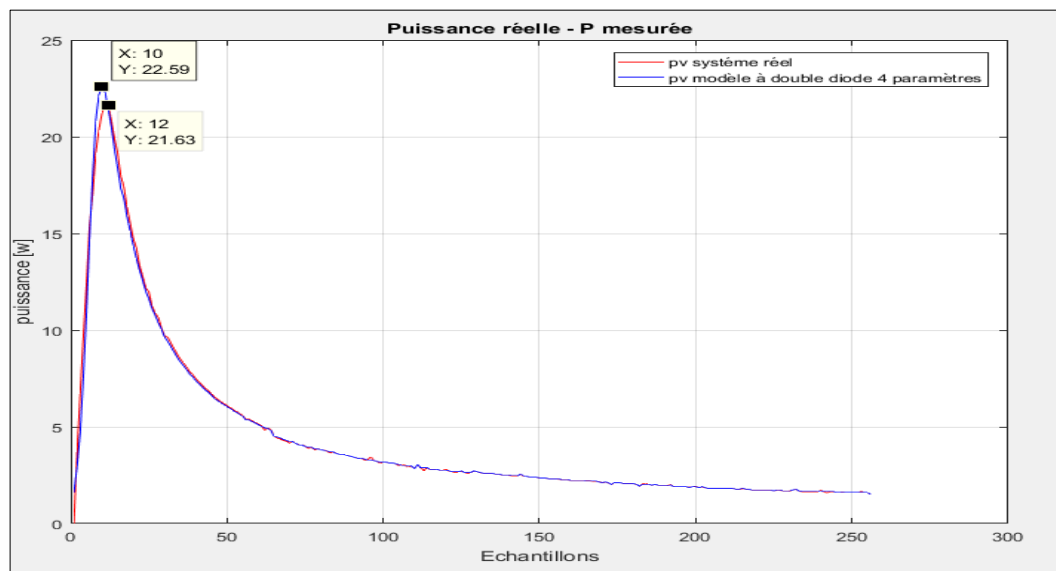


Figure 3.7. Comparaison des puissances du panneau et du modèle à double diode comportant cinq paramètres inconnus.

Les figures 3.8 et 3.9 comparent, respectivement, les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ fournies par le système PV réel et le modèle mathématique de double diode possédant les quatre paramètres optimaux cités dans le tableau 3-.2. On obtient donc :

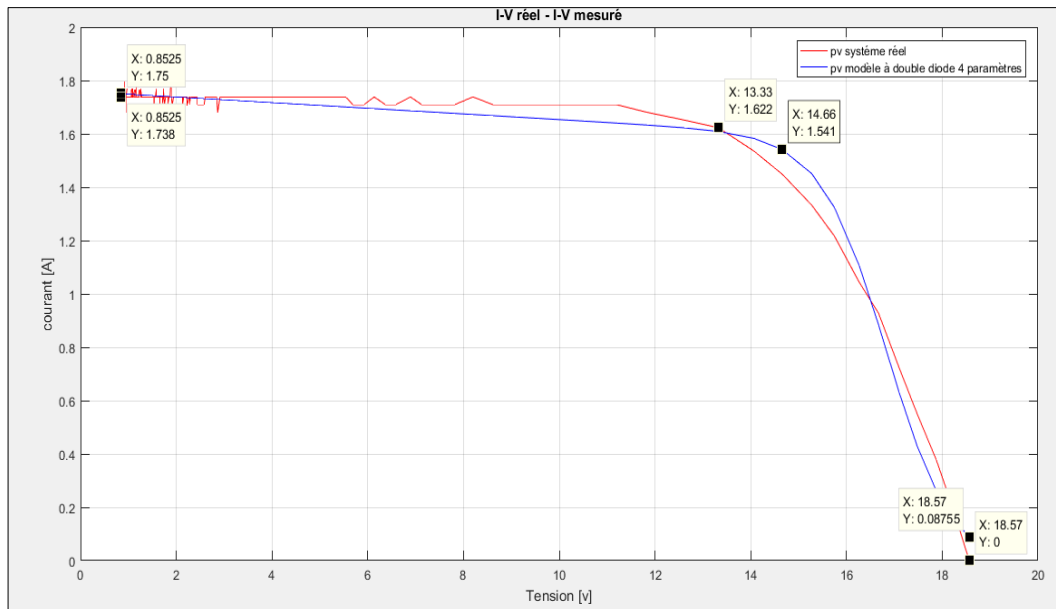


Figure 3.8. Caractéristique $I - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant quatre paramètres inconnus.

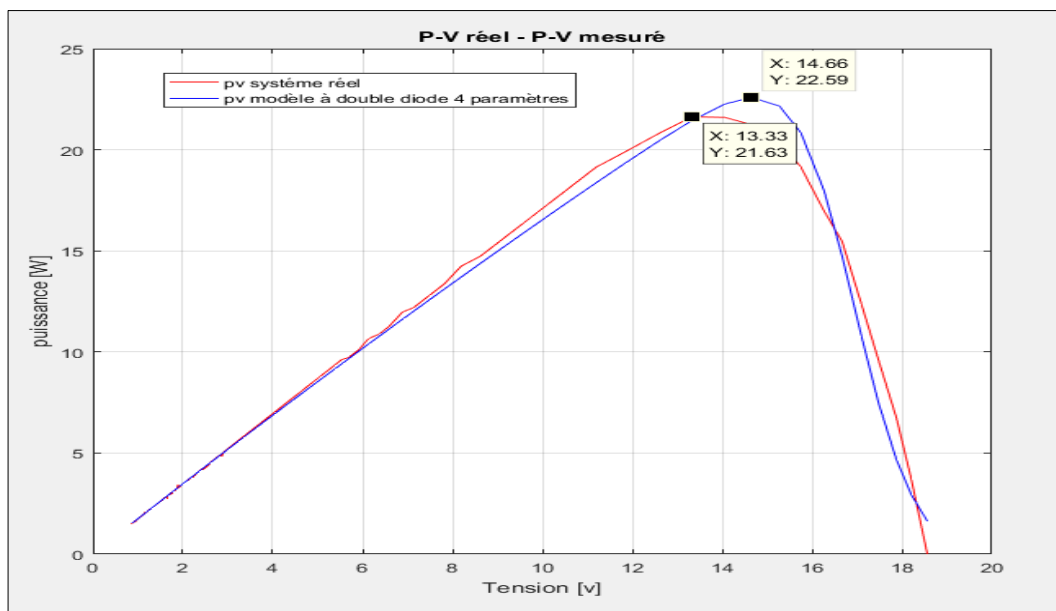


Figure 3.9. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant quatre paramètres inconnus.

L'observation sur les deux figures 3.8 et 3.9 montre clairement que les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ sont quasiment identiques. Comme résultat, on peut conclure que le modèle comportant l'extra-paramètre I_{ph} (modèle à cinq paramètres) a la capacité de fournir les meilleures caractéristiques $I - V$ et $P - V$ que celui qui comporte seulement à quatre paramètres.

De ce qui est suit, les résultats obtenus dans le deuxième chapitre et qui se concernent le modèle PV d'une seule diode sont comparés par le modèle de double diode mentionné dans ce

chapitre. A cet effet, le tableau 3-3 récapitule les paramètres optimaux des deux modèles PV précédents seulement fournis seulement par l’algorithme *PSO*. On obtient donc :

Modèle	Paramètre	V_{oc}	I_{cc}	I_{ph}	R_s	R_p	A_1	A_2	MSE
Une seule diode	4 p	18.57	1.741	1.7707	3.9088	263.39	1.2375	-	$3.17981 \cdot 10^{-4}$
	3 p	18.57	1.751	-	23.013	77.576	0.71453	-	$7.47741 \cdot 10^{-4}$
Double diode	5 p	18.57	1.741	1.7554	3.9088	263.39	1.5034	0.56788	$2.1595 \cdot 10^{-4}$
	4 p	18.57	1.75	-	21.906	72.627	0.1816	0.72126	$7.44884 \cdot 10^{-4}$
Modèle expérimental		18.57	1.738	-	-	-	-	-	-

Tableau 3-3. Paramètres optimaux des deux modèles PV d’une seule et double diode (comparaison avec les mesures réelles du panneau solaire)

Pour préciser cette comparaison, la figure 3.10 compare les caractéristiques $I - V$ fournies respectivement par : le système PV réel, le modèle PV d’une seule diode possédant quatre paramètres et le modèle PV de double diode possédant cinq paramètres. En revanche, la figure 3.11 compare les caractéristiques $I - V$ fournies respectivement par : le système PV réel, le modèle PV d’une seule diode possédant trois paramètres et le modèle PV de double diode possédant quatre paramètres.

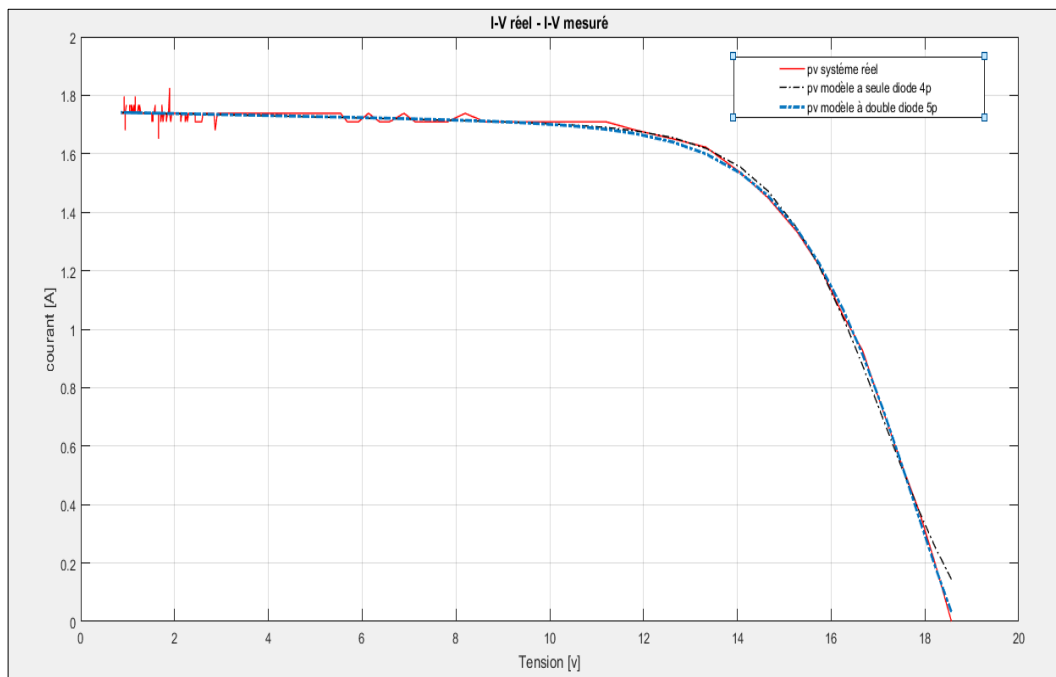


Figure 3.10. Caractéristique courant-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques

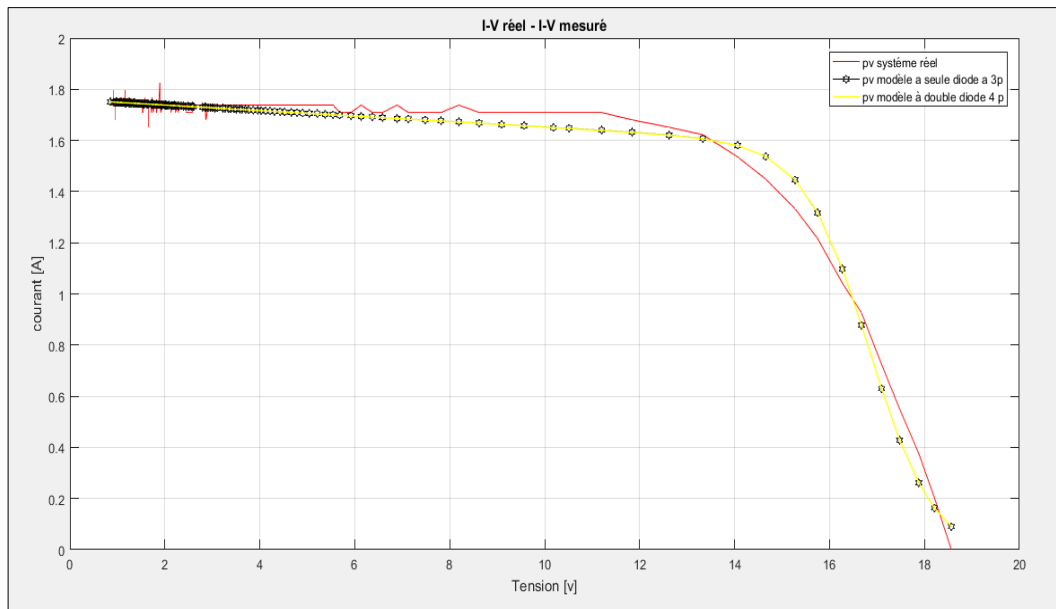


Figure 3.11. Caractéristique courant-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques

Le tableau 3-4 compare les valeurs des puissances maximales assurées par les différents types des modèles PV cités précédemment. On obtient :

Modèle	Double diode à 5 paramètres	Double diode à 4 paramètres	Une seule diode à 4 paramètres	Une seule diode à 3 paramètres	Puissance maximale réelle
P_{mx}	21.577	22.59	22.54	22.62	21.63

Tableau 3-4. Les puissances maximales obtenues pour les deux modèles mathématiques d'une cellule PV

La figure 3.12 compare les caractéristiques $P - V$ fournies respectivement par : le système PV réel, le modèle PV d'une seule diode possédant quatre paramètres et le modèle PV de double diode possédant cinq paramètres.

En revanche, la figure 3.13 compare les caractéristiques $P - V$ fournies respectivement par : le système PV réel, le modèle PV d'une seule diode possédant trois paramètres et le modèle PV de double diode possédant quatre paramètres.

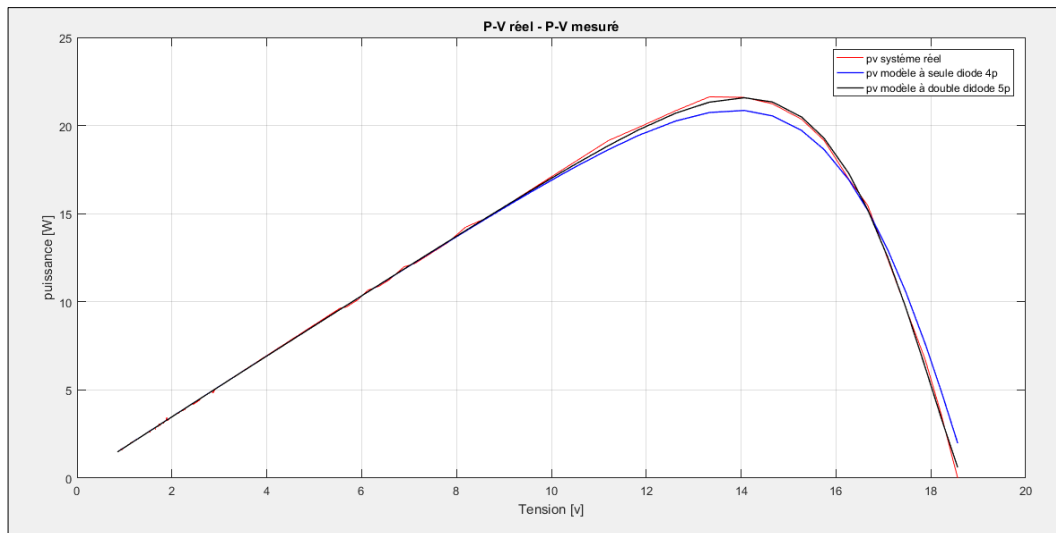


Figure 3.12. Caractéristique puissance-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques

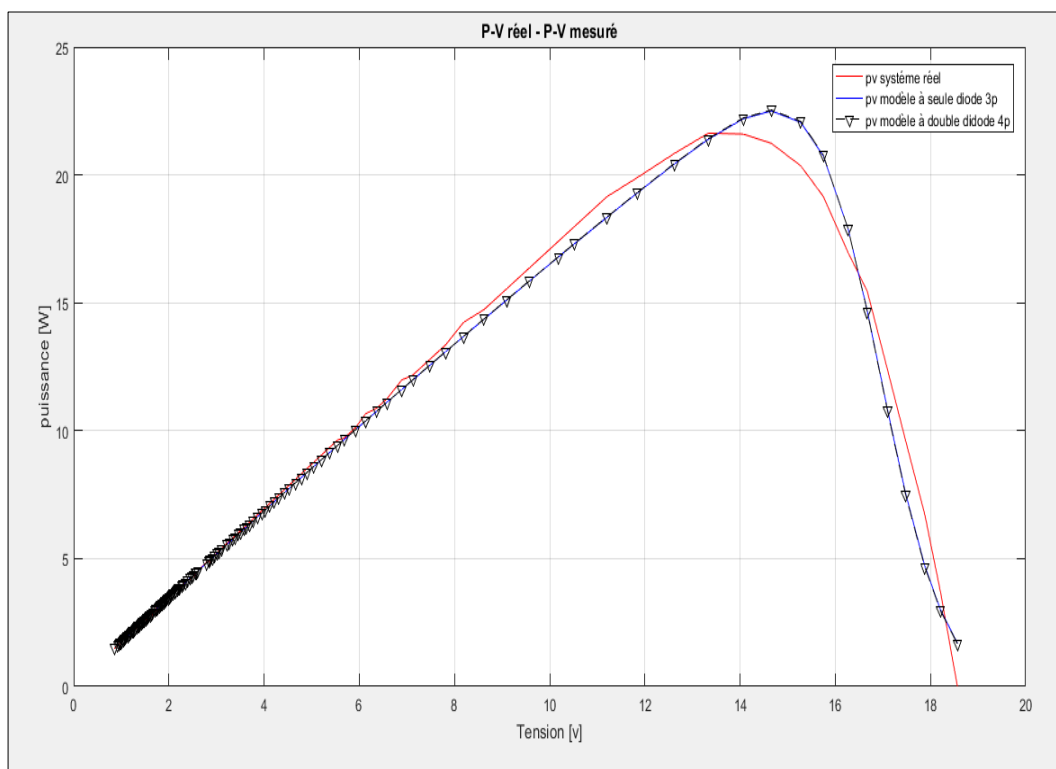


Figure 3.13. Caractéristique puissance-tension obtenues à partir du système PV réel avec celle donnée par les modèles mathématiques

Grâce aux résultats cités dans le tableau 3-3 et les courbes 3.10 et 3.11, il est facile de constater que la meilleure performance est celle fournie par le modèle PV à double diode qui possède cinq paramètres, car l'écart de puissance on comparaison avec la puissance maximale du système PV réel est d'environ de $2.1595 \cdot 10^{-4}$.

Nous notons également que le modèle à une seule diode et qui possède quatre paramètres fonctionne mieux que les autres deux modèles qui sont le modelé à une diode à trois paramètres

et le modèle à double diode à quatre paramètres, les deux derniers étant très similaires avec très peu de préférence pour le modèle à double diodes à quatre paramètres.

À travers de tous les résultats susmentionnés, nous remarquons que le modèle PV possédant cinq paramètres a la capacité de fournir des performances très proches du système PV réel par rapport aux autres types des modèles PV.

En général, le modèle mathématique à double diode est le plus précis et le plus performant que le modèle d'une diode car ce dernier est souvent fondé sur l'hypothèse que la perte de recombinaison dans la région d'appauvrissement est absente. Dans une cellule solaire réelle, la recombinaison représente une perte considérable, qui ne peut être adéquatement modélisée si on utilise un modèle PV d'une seule diode. C'est le cas contraire si on utilise le modèle de double diode qui a la capacité de prendre en considération ces pertes de recombinaison.

3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation de la cellule photovoltaïque à l'aide d'un modèle à double diode, en comparant ses grandeurs prédites avec celles existant dans la réalité. Nous avons également abordé l'analyse et la comparaison entre les modèles à une seule diode et ceux de double diode en terme des caractéristiques $I - V$ et $P - V$. Cette comparaison nous a permis de constater que le modèle de double diode offrait de meilleures performances, car il est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire porte les détails de la modélisation d'un panneau photovoltaïque de type ISOFOTON I-50 PV module. Cette modélisation est assurée par deux circuits électriques équivalents, on l'occurrence : le circuit électrique équivalent à base d'une seule diode et celui à base de double diode. Nous avons détaillé les différentes méthodes existant dans la littérature scientifique. Ces méthodes a pour but d'identifier les paramètres des deux circuits électriques susmentionnés. Cette identification peut être assurée de façon analytique ou numérique en utilisant les algorithmes d'optimisation heuristique. D'autre part, nous avons évalué les performances électriques fournies par chaque modèle PV. Cette évaluation est assurée via la comparaison des résultats de simulation obtenus à partir de différents modèles PV ainsi que les données expérimentales enregistrés auparavant à partir du panneau cité précédemment. Les résultats de la simulation ont démontré ce qui suit:

- L'algorithme PSO à la capacité de fournir de meilleurs résultats en extrayant des paramètres inconnus pour différents modèles PV proposés. Les erreurs de modélisation correspondantes sont meilleures par rapport à celles fournies par les algorithmes génétiques GA.
- Le modèle PV basé sur le circuit électrique équivalent à double diode et qui comporte cinq paramètres inconnus devient le plus proche au comportement réel du panneau suscité en comparaison avec les autres modèles PV restants.
- Il a été constaté que dans tous les cas, le modèle à base d'une double diode présente une meilleure précision en comparaison avec le modèle à une seule diode en particulier dans des conditions climatiques caractérisées par des faibles éclairagements.

Comme perspective, nous envisagerons les points ci-dessous :

- Faire la modélisation du comportement réel du panneau via l'introduction de l'intelligence artificielle à savoir celle utilisant les réseaux de neurones.
- Après l'étude de la modélisation, nous envisagerons de faire la commande du système PV par les algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking).

REFERENCES

- [1] BENSACI Wafa. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT. Mémoire de master. Université de Ourgla, Algérie, 2012.
- [2] IBRAHIM TAHRAOUI & AMINE HALIL. Dimensionnement et Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique. Mémoire de master. Université de Tlemcen, Algérie, 2017.
- [3] DAOUDI ALI. Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Mémoire de magister. Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [4] DAOUD AMINE. Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire. Thèse de Doctorat. Université d'Oran, Algérie, 2013.
- [5] ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ. Énergie solaire photovoltaïque. Dunod, 2^{ème} Edition.2005.304
- [6] YASSINE LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Mémoire de magister. Université de Sétif, Algérie, 2013.
- [7] Mlle BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA, La Commande d'un système photovoltaïque d'un Satellite. Mémoire de master. Université de Tlemcen, Algérie, 2014.
- [8] MERABET ABD EL HAK. Dimensionnement d'un système d'alimentation en énergie électrique par voie photovoltaïque pour l'alimentation d'une habitation. Mémoire de master. Université de Biskra, Algérie, 2018.
- [9] DI PIAZZA, MARIA CARMELA & VITALE, GIAMPOLO. Photovoltaic source: modeling and emulation. Springer edition, 2014. 316p.
- [10] MATALLAH SORYA. Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habitat dans la wilaya d'Ouargla. Mémoire de master. Université de Ouargla, Algérie, 2015.
- [11] ABDOULAYE KEBE. Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal. Thèse de doctorat. Université de Paris-sud, France .2014.
- [12] Mr FEROUANI ABDELMADJID. Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu(In,Ga)Se₂(CIGS). Thèse de doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2016.
- [13] ZAOUI FARES. Utilisation des énergies renouvelables influence de la température sur les performances du module p.v. Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie, 2016.

- [14] NESRINE KEFIF & SOUMEYA BELHAMICI. PV Module Parameters Identification Using Datasheet and Experimental Data. Mémoire de master, université de Bomerdes, Algérie, 2016.
- [15] Mathworks.fsolve. <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fsolve.html> > consulter le 25/04/2019.
- [16] ISMAIL, M. S., MOGHAVVEMI, M., & MAHLIA, T. M. I. Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm (2013). *Energy Conversion and Management*, 73, 10-25
- [17] M. ZAGROUBAA,C, M. BOUAÏCHAA , A. SELLAMIA,B AND M. KSOURIC . Optimisation par les algorithmes génétiques et modélisation par la méthode IPV d'un système photovoltaïque. Vème Congrès International sur les Energies Renouvelables et l'Environnement, 04-06 Novembre, 2010, Sousse, Tunisie, 1-6.
- [18] Mathworks. < <https://www.mathworks.com/help/gads/ga.html> > consulter le 30/04/2019.
- [19] M. GUENOUNOU ABDERRZAK. Contribution à la mise au point d'un banc de caractérisation photovoltaïque piloté par ordinateur. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2017.
- [20] TAMER, KHATIB. WILFRIED, ELMENRE. Modeling of photovoltaic systems using matlab. Canada: Wiley, 2016. 226.
- [21] THOMAS, MAMBRINI. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de doctorat. Université de Paris-sud, France, 2014.
- [22] SHU-XIAN LUN, SHUO WANG, GUI-HONG YANG, TING-TING GUO. A new explicit double-diode modeling method based on Lambert W-function for photovoltaic arrays. (2015) *Solar Energy* 116, 69–82.
- [23] C. CHELLASWAMY, R. RAMESH .Parameter extraction of solar cell models based on adaptive differential evolution algorithm. (2016) *Renewable Energy* 97, 823-837.
- [24] MOUCHA ABDEL HACK. Étude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique. Mémoire de master. Université de Batna, Algérie, .2011.