

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines Électriques

présenté par

OTSMANE Ouissem

et

Diboune Yaakoub

Thème

Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque à l'aide d'un algorithme de colonies de fourmis

Proposé par : Mme Boudissa E. & Mr Bounekhla M.

Année Universitaire 2019-2020

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MES CHERS TANTES HIZIA, FATIHA

Mes conseillées, et amies fidèles, qui m'ont assistées dans les moments difficiles et m'ont pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles.... Je vous suis très reconnaissante, et je ne vous remercierai jamais assez pour vos amabilités, vos générosités, vos aides précieuses.

A MES CHERS ET ADORABLE SCEURS Hanane, la prunelle de mes yeux, Nourhane, la douce, au cœur si grand.

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À MES CHERS COUSINS COUSINES Riad, Hamza, Yacine, Anes, Mohamed, Nesrine, Fares, Abd el kader.

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, Votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A MON CHER GRAND PERE

Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.

À MES CHERS ONCLES, TANTES, LEURS EPOUX ET EPOUSE Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À MES AMIS DE TOUJOURS : Souad, Hakima, Chaima, Ferial, Selma ...

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ A L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL À TOUS CEUX QUE J'AI OMIS DE CITER.

Ouissem

À l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

À mes chers parents, décédés

J'espère que, du monde qui est sien maintenant, ils apprécient cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de leur âme. Puisse Dieu, le tout puissant, les avoir en sa sainte miséricorde !

À mes chers frères Ali et Mostapha , et mes chers Sœurs, qui m'ont soutenu surtout sur le plan moral et qui m'ont accompagnés par leurs prières et leurs douceurs, puisse Dieu leurs prêter une longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.

À ma fidèle chère amie et binôme Otsmane Ouissem , Je te dis merci .

À mes chers amis Trad Abbes, Kada Ihcène et Zarzour Lamia .

À tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtout nos

Enseignants du département génie électrique.

À tous mes amis et camarade d'études et tout le groupe Machines électriques.

À tous ceux qui ont participés de près ou de loin pour la réalisation de ce travail et ceux qui m'espèrent la réussite

À tous ceux qui me sont chers.

Yaakoub

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-Puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude à nos encadreurs, Mme Boudissa E. et Mr Bounekhla M. Nous les remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion et ont accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions durant notre recherche.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements à nos familles qui ont toujours été là pour nous. Nous remercions nos ami(e)s pour leur encouragement, pour leur sincère amitié et confiance. À tous ces intervenants, nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive et nous remercions tous ceux et celles qui nous connaissent et qui nous permettent de nous sentir en vie...

Merci à toutes et à tous.

ملخص: يقدم هذا العمل التعريف البارامتري للوحة الكهروضوئية (PV). يتم إعطاء نظرة عامة على النمذجة الكهروضوئية. يسمح نهج التعريف بتحديد المعلمات الكهربائية لـ PV باستخدام metaheuristic يسمى Ant Colony Algorithm باستخدام طريقة النموذج المرجعي. تم تطوير خوارزمية مستعمرة النمل لتقليل الوظيفة الموضوعية التي يتم تقديمها كخطأ مربع بين التيار المقاس وتلك المحسوبة بطريقة نيوتن رافسون من النموذج المعتمد من PV. تم تأكيد التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام البيانات التجريبية المسجلة في ثلاث درجات حرارة مختلفة (25 درجة مئوية و 50 درجة مئوية و 75 درجة مئوية) من خلال التراكب الصحيح للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد من PV.

كلمات المفاتيح: لوحة الكهروضوئية، خوارزمية مستعمرة النمل، المعايير الكهربائية، نمذجة

Résumé : Ce mémoire présente l'identification paramétrique d'un panneau photovoltaïque (PV). Un aperçu sur la modélisation de PV est donné. L'approche d'identification permet de déterminer les paramètres électriques d'un PV à l'aide d'une métaheuristique nommée l'algorithme de colonie de fourmis en utilisant la méthode du modèle de référence. L'algorithme de colonies de fourmis est développé pour la minimisation de la fonction objectif définie par l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui calculé par la méthode de Newton-Raphson à partir du modèle adopté du PV. La validation des résultats obtenus à l'aide de données expérimentales relevées sur trois températures différentes (25°C, 50°C et 75°C), est confirmée par la bonne superposition des courants mesurés et ceux calculés par le modèle adopté du PV.

Mots clés : Mot clés: Identification, panneau photovoltaïque, métaheuristique, algorithme de colonies de fourmis.

Abstract : This work presents the parametric identification of a photovoltaic panel (PV). An overview on PV modeling is given. The identification approach allows the electrical parameters of a PV to be determined using a metaheuristic called the Ant Colony Algorithm using the Reference Model method. The ant colony algorithm is developed for the minimization of the objective function which is presented as the squared error between the measured current and that calculated by the Newton-Raphson method from the adopted model of the PV. The validation of the results obtained using experimental data recorded at three different temperatures (25°C, 50°C and 75°C) is confirmed by the correct superposition of the measured currents and those calculated by the adopted model of the PV.

Keywords : Identification, photovoltaic panel, metaheuristic, ant colony algorithm

Listes des acronymes et abréviations

R_s	Résistance série (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt (Ω)
I_{ph}	Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (A)
n_s	Nombre de cellules en série
n_p	Nombre de cellules en parallèle
V_{co}	La tension de circuit ouvert (V)
I_{cc}	Le courant de court-circuit (A)
I_{mpp}	Le courant au point de puissance maximale (A)
V_{mpp}	La tension au point de puissance maximale (V)
P_{max}	La Puissance maximale (W)
PV	Panneau photovoltaïque
STC	Standard Test Condition
I_D	Courant de la diode (A)
V_D	Tension de la diode (V)
V_t	Tension thermique
I_c	Courant calculé (A)
I_m	Courant mesuré (A)
V_m	Tension mesuré (V)

Liste des matières

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 1 : Modélisation d'un PV

1.1	Introduction	3
1.2	Généralité	3
1.2.1	Energie solaire	3
1.2.2	Effet photovoltaïque	4
1.3	Cellule photovoltaïque	4
1.3.1	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	5
1.3.2	Différentes technologie de la cellule photovoltaïque	6
	<i>a Silicium monocristallin</i>	6
	<i>b Silicium poly-cristallin</i>	7
	<i>c Silicium amorphe</i>	7
	<i>d Silicium multi-jonction</i>	8
1.4	Panneaux photovoltaïque.....	9
1.4.1	Association des cellules photovoltaïques	9
	<i>a Association en série</i>	9
	<i>b Association en parallèle</i>	10
1.5	Caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque	11
1.5.1	Les paramètres d'un panneau photovoltaïque	12
	<i>a La tension en circuit ouvert V_{co}</i>	12
	<i>b La courant de court-circuit I_{cc}</i>	12
	<i>c La puissance maximale P_{max}</i>	12
	<i>d Le rendement</i>	13
	<i>e Le facteur de forme</i>	13
1.6	Modélisation d'un panneau photovoltaïque	14
1.6.1	Le modèle idéal	14
1.6.2	Modèle a une diode.....	16
1.6.3	Modèle à deux diode	17
1.6.4	Modèle du panneau photovoltaïque	18
1.7	Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Techniques d'identification

2.1	Introduction	20
2.2	Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque.....	20
2.3	Méthodes d'identification	21
2.3.1	Méthodes applique au modèle à une diode	21
a	<i>Méthodes analytique</i>	21
b	<i>Méthode de cinq points</i>	23
c	<i>Méthode de modèle de référence</i>	25
2.3.2	Méthodes appliqué au modèle à deux diodes :	27
a	<i>Méthode analytique</i>	27
a.1	Solution quadratique de R_s	29
b	<i>Méthode de Newton-Raphson</i>	31
2.4	Conclusion.....	32

Chapitre 3 : Métaheuristiques et Résultats

3.1	Introduction	33
3.2	Métaheuristique.....	33
3.2.1	Métaheuristique à solution unique	34
a	<i>Recuit simulé</i>	34
b	<i>Recherche tabu</i>	35
3.2.2	Métaheuristique à base de population.....	35
a	<i>Algorithme génétique (AG)</i>	36
b	<i>Algorithme d'essaim particule</i>	36
c	<i>Optimisation par colonie de fourmi (ACO)</i>	37
c.1	Principe	37
c.2	Description simplifié de ACO	38
3.3	Optimisation continue de colonies de fourmis.....	39
3.3.1	ACO pour l'optimisation continue	39
3.3.2	CACS.....	40
3.4	Identification et résultats	41
3.4.1	Identification des paramètres électriques d'un PV avec la méthode analytique.....	41
➤	<i>Résultat Obtenu à $T = 25^{\circ}\text{C}$</i>	42
➤	<i>Résultat Obtenu à $T = 50^{\circ}\text{C}$</i>	45
➤	<i>Résultat Obtenu à $T = 75^{\circ}\text{C}$</i>	47

3.4.2	Identification des paramètres électriques d'un PV par l'algorithme de colonies de fourmis.	50
<i>a</i>	<i>Utilisation de l'algorithme de colonies de fourmis</i>	55
<i>a.1</i>	Sélection proportionnelle (roulette wheel)	55
<i>b</i>	Résultat obtenus par l'algorithme de colonies de fourmis.....	55
➤	Résultat Obtenu à $T = 25^{\circ}\text{C}$	56
➤	Résultat Obtenu à $T = 50^{\circ}\text{C}$	59
➤	Résultat Obtenu à $T = 75^{\circ}\text{C}$	61
3.5	Conclusion.....	63
	Conclusion générale	63
	Bibliographie	64

Listes des figures

Figure 1.1	Cellule photovoltaïque.....	5
Figure 1.2	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
Figure 1.3	Cellule photovoltaïque monocristallin.....	7
Figure 1.4	Cellule photovoltaïque poly-cristalline	7
Figure 1.5	Cellule photovoltaïque amorphe.....	8
Figure 1.6	Cellule photovoltaïque multi-jonction.....	9
Figure 1.7	Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.	10
Figure 1.8	Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle.	11
Figure 1.9	Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque	12
Figure 1.10	Facteur de forme pour une cellule PV.	14
Figure 1.11	Circuit électrique de modèle idéal.....	15
Figure 1.12	Circuit électrique de modèle à une diode.....	16
Figure 1.13	Circuit électrique de modèle à deux diodes.....	17
Figure 2.1	Les deux points sur la courbe I-V.	23
Figure 2.2	Les cinq points sur la courbe I-V	24
Figure 2.3	Principe d'identification	25
Figure 3.1	Classification des metaheuristiques	34
Figure 3.2	(a) Les fourmis suivent un chemin entre le nid et la nourriture. (b) Un obstacle apparaît sur le chemin ; les fourmis choisissent entre prendre à droite et à gauche avec équiprobabilité. (c) La phéromone s'évapore sur le chemin le plus long. (d) Toutes les fourmis choisissent le chemin le plus court.....	38
Figure 3.3	Caractéristiques I-V et P-V expérimentale pour $T=25^{\circ}\text{C}$:(a) courant mesuré (b) puissance mesuré	43
Figure 3.4	Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode analytique pour $T=25^{\circ}\text{C}$:(a) courant calculé (b) puissance calculé	43
Figure 3.5	Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=25^{\circ}\text{C}$	44
Figure 3.6	Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=25^{\circ}\text{C}$	44
Figure 3.7	L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés par la méthode analytique à $T=25$	45
Figure 3.8	Caractéristiques I-V et P-V expérimentale pour $T=50^{\circ}\text{C}$: (a) courant mesuré (b) puissance mesuré	45
Figure 3.9	Caractéristiques I-V et P-V simulé par la méthode analytique pour $T=50^{\circ}\text{C}$: (a) courant calculé (b) puissance calculé.....	46
Figure 3.10	Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=50^{\circ}\text{C}$	46
Figure 3.11	Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=50^{\circ}\text{C}$	47
Figure 3.12	L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés avec la méthode analytique à $T=50^{\circ}\text{C}$	47
Figure 3.13	Caractéristiques I-V et P-V expérimentale pour $T=75^{\circ}\text{C}$: (a) courant mesuré (b) puissance mesuré	48

Figure 3.14	Caractéristiques I-V et P-V simulé par la méthode analytique pour T=75°C : (a) courant calculé (b) puissance calculé	48
Figure 3.15	Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour T=75°C.....	49
Figure 3.16	Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour T=75°C.....	49
Figure 3.17	L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimé avec la méthode analytique à T=75°C.....	50
Figure 3.18	Dans un archive de solution triée pour un problème de minimisation, la valeur de la fonction associée aux solutions est $f(1) \ll f(2) \ll \dots f(3)$, donc le poids associé aux solutions est $\omega(1) \gg \omega(2) \gg \dots \omega(k)$. Le poids a indiqué que la meilleure solution devrait avoir le poids le plus élevé.	52
Figure 3.19	Représentation des portions de probabilités de sélection sur la Roulette wheel.....	53
Figure 3.20	Organigramme de l'algorithme de colonie de fourmis.	54
Figure 3.21	Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode de colonie de fourmis pour T=25°C : (a) courant calculé (b) puissance calculé	57
Figure 3.22	Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode de colonie de fourmis pour T=25°C.	57
Figure 3.23	Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode de colonie de fourmi pour T=25°C.....	58
Figure 3.24	L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimé avec l'algorithme de colonie de fourmis à T=25°C.	58
Figure 3.25	Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode de colonie de fourmis pour T=50°C : (a)courant calculé (b) puissance calculé	59
Figure 3.26	Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l'algorithme de colonie de fourmis pour T=50°C.	59
Figure 3.27	Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l'algorithme de colonie de fourmis pour T=50°C.....	60
Figure 3.28	L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimé avec la méthode analytique à T=50°C.....	60
Figure 3.29	Caractéristiques I-V et P-V calculé avec l'algorithme de colonie de fourmis pour T=75°C : (a) courant calculé (b) puissance calculé	61
Figure 3.30	Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l'algorithme de colonie de fourmis pour T=75°C.....	61
Figure 3.31	Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l'algorithme de colonie de fourmis pour T=75°C.....	62
Figure 3.32	L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimé avec l'algorithme de colonie de fourmis à T=75°C.	62

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Propriétés de divers modèles électriques photovoltaïques.	18
Tableau 3.1	Les paramètres identifiés de panneau PV en utilisant la méthode analytique pour les différentes températures.	41
Tableau 3.2	Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.....	42
Tableau 3.3	Les paramètres identifiés de panneau PV en utilisant l'algorithme de colonie de fourmis pour les différentes températures.....	56

Introduction générale

Avec la consommation mondiale d'électricité qui ne cesse d'augmenter, plusieurs fournisseurs ont proposé des offres d'électricité 100% verte. L'électricité verte est produite à partir de source d'énergie renouvelable, sous leurs diverses formes (photovoltaïque (PV), hydroélectricité, éolien, biomasse, géothermie...).

L'électricité photovoltaïque est produite à partir du rayonnement solaire grâce à des PV, ces derniers ont une caractéristique I-V qui dépend de plusieurs paramètres inconnus. Plusieurs méthodes ont été proposées pour identifier ces paramètres. Cependant, ces techniques dépendent de la précision des valeurs mesurées: sans mesure précise le modèle analytique ne peut converger vers une solution réelle.

Au cours de ces dernières années, certains chercheurs ont proposé l'utilisation des techniques d'intelligence artificielle pour identifier ces paramètres en raison de leur efficacité à converger vers une solution globale.

Ce travail présente l'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque d'un modèle à une diode à partir des caractéristiques expérimentales courant-tension avec trois températures différentes en utilisant l'algorithme de colonies de fourmis.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur l'énergie solaire, le fonctionnement et la technologie de fabrication des cellules photovoltaïques. Les principales propriétés et caractéristiques des panneaux photovoltaïques sont abordées, tout en focalisant sur leur modélisation.

Le deuxième chapitre consiste à présenter les différentes techniques d'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque.

Le troisième chapitre est consacré aux métaheuristiques, réparties en méthodes de voisinage et méthodes évolutionnaires dont les algorithmes de colonies de fourmis. Ces derniers seront développés. Les résultats de l'identification des paramètres électriques d'un

panneau photovoltaïque pour différentes températures (25°C, 50°C et 75°C) à l'aide du modèle de référence en utilisant les algorithmes de colonies de fourmis sont présentés.

La conclusion générale clôture ce mémoire tout en présentant certaines perspectives envisagées.

1.1 Introduction

L'énergie renouvelable provient de sources naturelles telles que le soleil, le vent, l'eau et les plantes qui sont «pratiquement inépuisables». Le soleil fournit une énergie importante variant d'une région à une autre de la terre. La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement qui subit de considérables modifications arrivant à la terre, à cause des phénomènes d'absorption et de diffusion.

Ce chapitre présente des généralités sur l'énergie photovoltaïque tout en focalisant sur la modélisation des panneaux photovoltaïques.

1.2 Généralité

Un aperçu sur l'énergie solaire, le fonctionnement de cellule photovoltaïque en citant les paramètres et les caractéristiques d'un panneau photovoltaïque ainsi que sa modélisation sont développés dans ce qui va suivre.

1.2.1 Energie solaire

L'énergie solaire est l'énergie qui provient du rayonnement solaire, directement à travers l'atmosphère sur la terre. L'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse réalisée par le règne végétal, dont dépend le règne animal via les chaînes alimentaires. L'énergie solaire est donc à l'origine de toutes les énergies sur terre à l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables (même si le soleil disparaîtra un jour). L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de

Chapitre 1 Modélisation de PV

photons. Ce rayonnement solaire est une ressource énergétique renouvelable ; une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour la production de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque.[1]

1.2.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il a été mis en évidence, pour la première fois par Edmond Becquerel en 1839 : il découvrit que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912, mais il fallut attendre le début des années 50 pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement très faible de 4,5% [2].

1.3 Cellule photovoltaïque

La cellule PV qui est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque, se compose de matériaux semi-conducteurs [3]. Elle transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques constituées :

- Une couche très fine semi-conductrice telle que le silicium, qui est un matériau qui présente une bonne conductivité électrique.
- Une couche antireflet qui permet de passer un maximum des rayons solaires.
- Une grille conductrice sur le dessus (cathode) et en dessous (anode) un métal conducteur.

La figure (1.1) montre une cellule photovoltaïque

Chapitre 1 Modélisation de PV

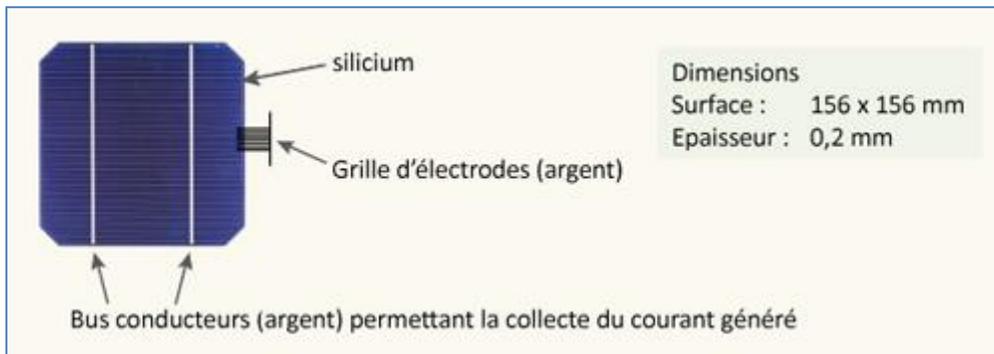


Figure 1.1 Cellule photovoltaïque

1.3.1 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p [4]. Une fois ces deux parties mises en contact, une jonction p-n a été formée qui permet de faire passer les électrons d'une couche à l'autre. En ajoutant deux électrodes qui sont installés sur les zones n et p : l'anode (ou côté positif) est située au-dessus de la couche n alors que la cathode (ou côté négatif) est située en dessous de la couche p. Enfin lorsque la cellule est éclairée, des photons (particules de lumière) bombardent la surface supérieure, les électrons s'activent et se mettent en mouvement. Ces électrons se déplacent dans une direction particulière, il y a donc une création d'une différence de potentiel électrique : le courant électrique circule.

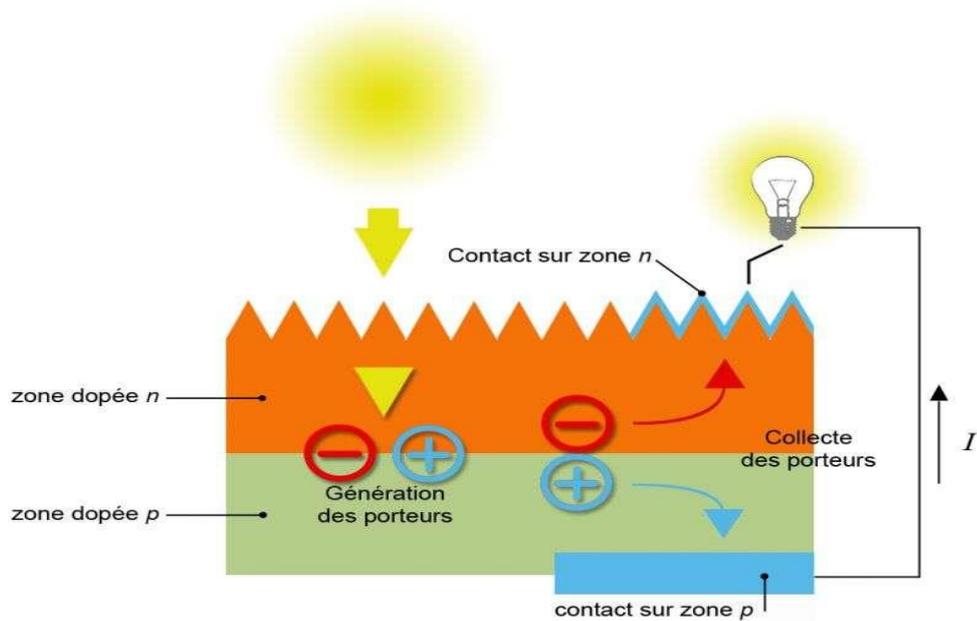


Figure 1.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

1.3.2 Différentes technologie de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux semi-conducteurs. Le matériau semi-conducteur utilisé presque universellement aujourd'hui est le silicium, cela est principalement dû à sa disponibilité illimitée sur terre. C'est un matériau extrêmement abondant, non toxique et stable, il y a plusieurs technologies distinctes de la part de la nature du silicium employé et sa méthode de fabrication.

a Silicium monocristallin

Le silicium monocristallin est la base de ce type de cellule. La fabrication de cellule de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifié et solidifié. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99% ce qui permet un rendement énergétique fort. Le silicium est alors fusionner avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupe en fine tranches d'environ 300 μm . Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduite via un processus de diffusion contrôlée : les tranches de silicium sont exposées à des vapeurs de phosphore dans un four où la température varie de 800 à 1000°C.[5]

Chapitre 1 Modélisation de PV

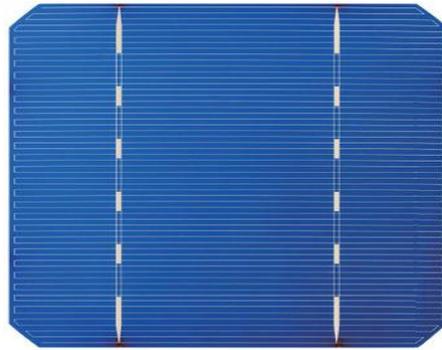


Figure 1.3 Cellule photovoltaïque monocristallin

b *Silicium poly-cristallin*

Le processus de production est semblable à celui présenté précédemment dans le cas de la fabrication de cellule en silicium mais avec un contrôle moins rigoureux. Il en résulte que les cellules obtenues sont moins coûteuses mais aussi moins efficaces (12,5% de rendement en moyenne).[5]

Leur intérêt réside dans la multiplicité des formes sous laquelle le revêtement peut se présenter : lingots à découper, ruban ou fil à déposer,... Chaque technique permet de produire des cristaux ayant des caractéristiques spécifiques, y compris la taille, la morphologie et la concentration des impuretés.

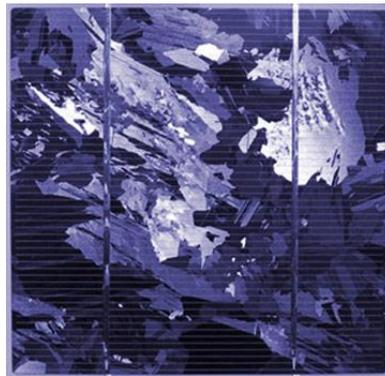


Figure 1.4 Cellule photovoltaïque poly-cristalline

c *Silicium amorphe*

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. L'utilisation

Chapitre 1 Modélisation de PV

de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages à la fois au niveau des propriétés électriques et le processus de fabrication (processus simple, faible consommation d'énergie, peu couteux, possibilité de produire des cellules avec grands secteurs.

Mais, même avec un cout réduit pour la production, l'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients: le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules de mono et poly cristallin de silicium. Le deuxième est le fait que les cellules sont affectées par un processus de dégradation dans les premiers mois d'opération, réduisant ainsi leur durabilité.[5]

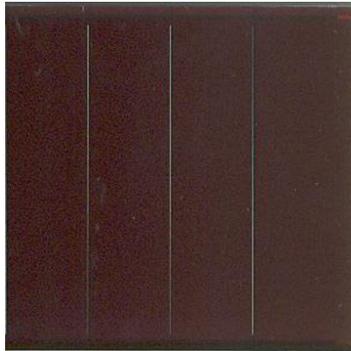


Figure 1.5 Cellule photovoltaïque amorphe

d Silicium multi-jonction

Les cellules multi-jonction différent des cellules présentées précédemment, car leur structure possèdent une meilleur absorption du spectre solaire, grâce à leur constitution de plusieurs couches de nature déférente (utilisant de différents matériaux semi-conducteur de gaps déférente).Elles ayant une grande efficacité, donc présentent des rendements plus élevés. La figure1.6 montre une cellule multi-jonction.

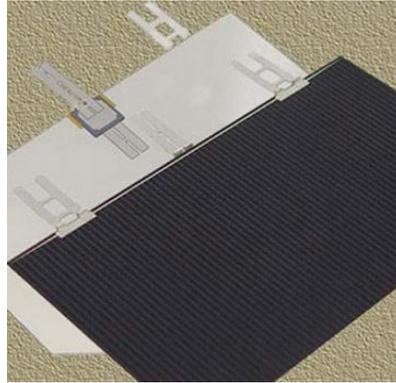


Figure 1.6 Cellule photovoltaïque multi-jonction.

1.4 Panneaux photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque se compose de plusieurs cellules solaires connectées électriquement les unes aux autres en série ou en parallèle. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association de cellules et de la matière qui les composent [6]. Le point de fonctionnement de cet ensemble de panneaux photovoltaïques est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge.

1.4.1 Association des cellules photovoltaïques

Une cellule solaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0.5 et 1.5 V selon technologie [7]. Pour produire une tension utilisable, les cellules sont assemblées pour former un panneau.

a Association en série

Dans l'association de plusieurs cellules identiques en série, le courant traversant chaque cellule est le même. La tension aux bornes de cette chaîne de cellule est obtenue en additionnant les tensions aux bornes de toutes les cellules [8]. La figure (1.7) illustre la caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série :

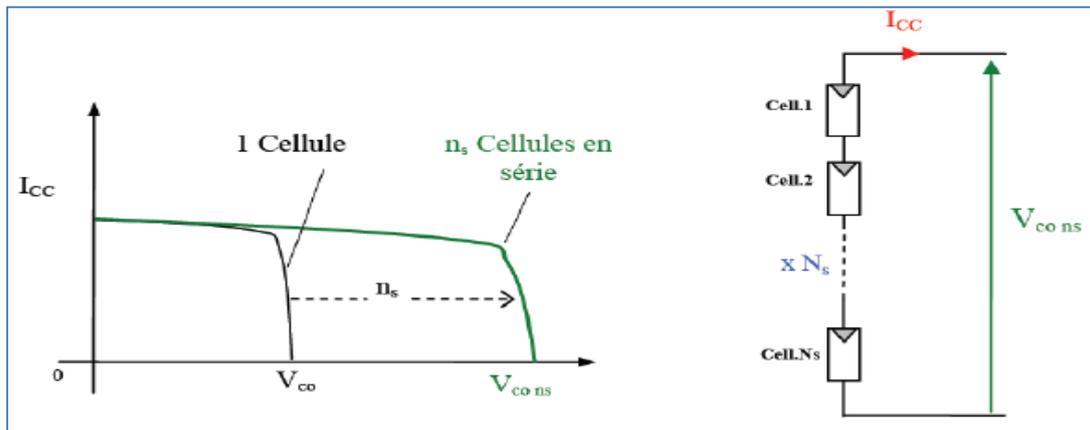


Figure 1.7 Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série.

$$V_{co n_s} = n_s \cdot V_{co} \quad (1.1)$$

$$I_{cc n_s} = I_{cc} \quad (1.2)$$

Où

n_s : nombre des cellules en série.

V_{co} : tension à vide d'une cellule.

b Association en parallèle

Les cellules identiques groupées en parallèle sont soumises à un même potentiel. Le courant résultant de ce groupement est la somme des courants fournis par toutes les cellules [8]. [8]. La figure (1.8) montre la caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle :

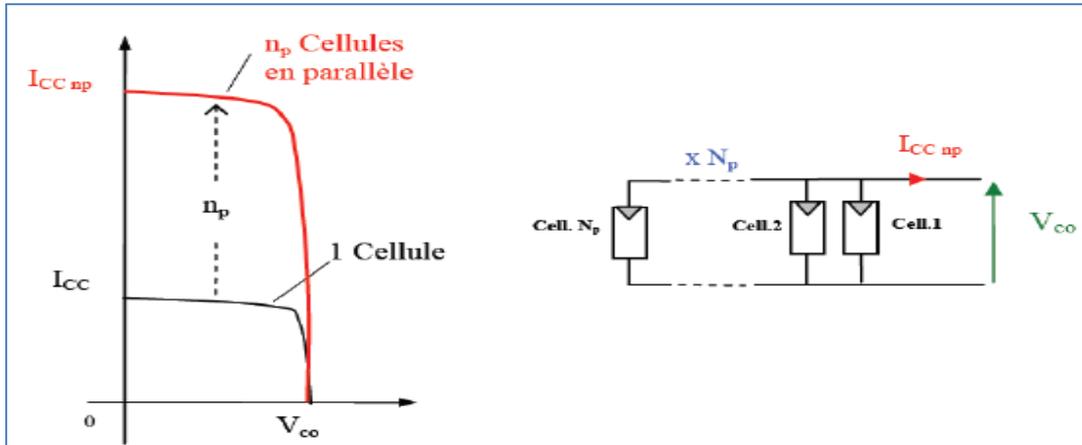


Figure 1.8 Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

$$I_{cc n_p} = n_p \cdot I_{cc} \quad (1.3)$$

$$V_{co n_p} = V_{co} \quad (1.4)$$

1.5 Caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque

Les caractéristiques courant-tension I-V et puissance-tension P-V d'un panneau photovoltaïque dans des conditions de température et d'irradiation constante sont illustrées par la figure (1.9). La courbe I-V se compose de deux régions: le côté droit de la courbe peut être appelé région de source de tension, où le point final indique la tension en circuit ouvert d'un panneau photovoltaïque (V_{co}) et le côté gauche de la courbe peut être appelé région de source de courant, où le point finale désigne le courant de court-circuit (I_{cc}) d'un panneau photovoltaïque[9]. Le point de puissance maximale (mp_p) du panneau est situé au coude de cette caractéristique.

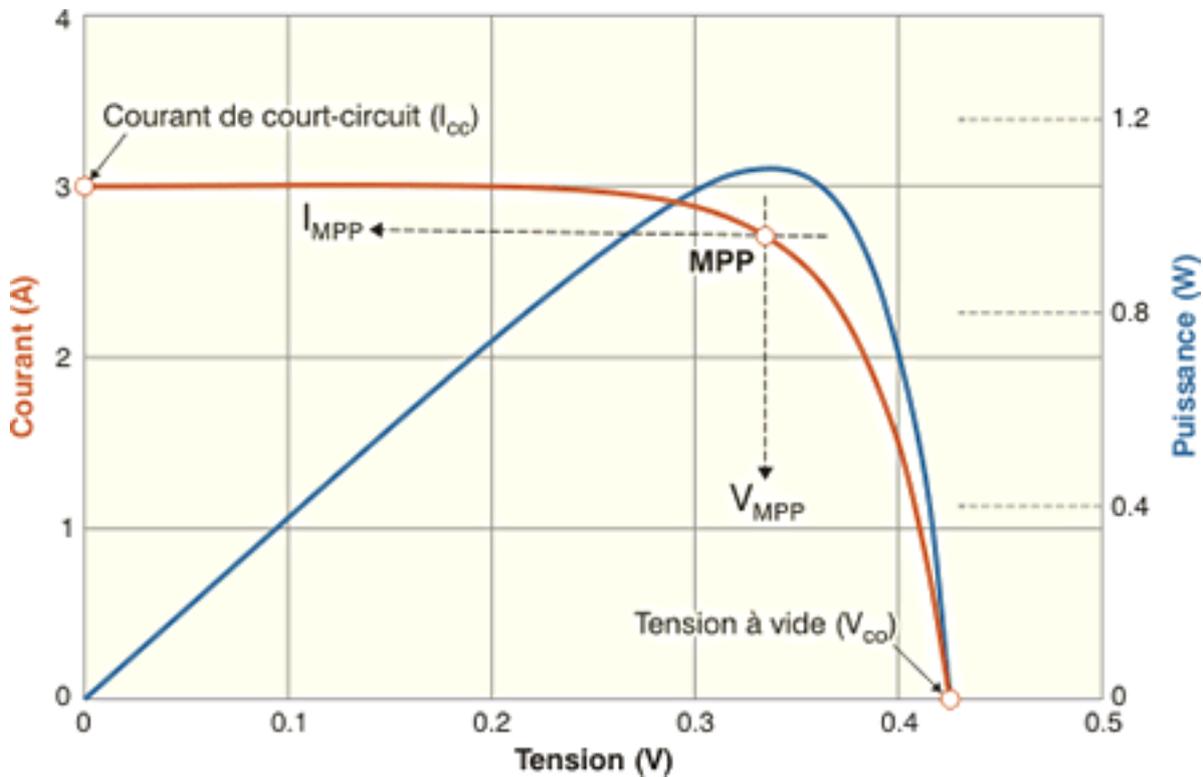


Figure 1.9 Caractéristiques électrique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque

1.5.1 Les paramètres d'un panneau photovoltaïque

Les paramètres essentiels d'un panneau PV sont cités comme suit:

a La tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'irradiation. Elle est obtenue quand le courant de la cellule est nul [3].

b La courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant I_{ph} .

c La puissance maximale P_{max}

La puissance maximale P_{max} délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au maximum du produit de la tension maximale appliquée par le courant maximale mesuré aux bornes de la cellule.

Chapitre 1 Modélisation de PV

La puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC : Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 W/m^2 et à la température de 25°C .

d Le rendement

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale générée P_{max} et la puissance du rayonnement solaire, qui arrive sur la cellule photovoltaïque :

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \quad (1.5)$$

Où

η : Rendement énergétique.

E : Éclairement (W/m^2).

S : Surface active de la cellule (m^2).

P_{max} : Puissance maximale (W).

e Le facteur de forme

Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} * V_{co}$ comme le montre la figure (1.10). Ce facteur est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.6)$$

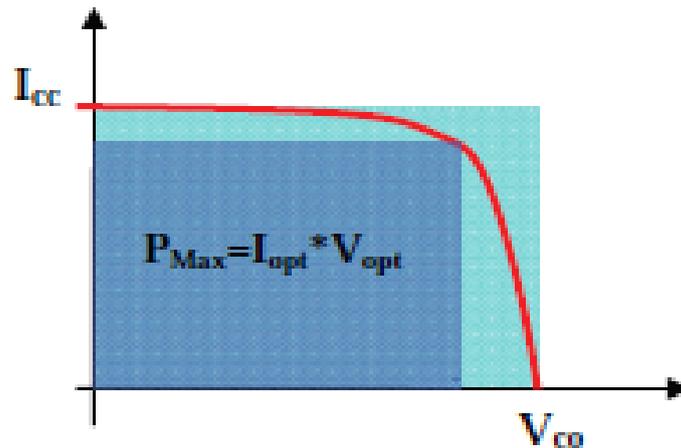


Figure 1.10 Facteur de forme pour une cellule PV.

1.6 Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Les performances d'un dispositif photovoltaïque (cellule, module ou panneau PV) peuvent être convenablement étudiées en utilisant des modèles mathématiques décrivant son fonctionnement. Modéliser un panneau photovoltaïque revient à modéliser une cellule.

La modélisation de cellules photovoltaïques s'impose comme une étape cruciale, qui offre une facilité d'utilisation. Plusieurs modèles peuvent être trouvés dans la littérature, leurs différences se situent principalement dans le nombre de diode et à chaque fois, des éléments ont été ajoutés afin que les modèles prennent en charge des aspects qui sont négligés telles que les pertes par résistance série, puis les pertes par recombinaison et autre. Cela a toujours été fait dans le souci, à chaque fois, de s'approcher le plus possible le comportement réel de la cellule.

1.6.1 Le modèle idéal

Le modèle idéal est le plus simple des modèles d'une cellule photovoltaïques, il génère un courant inverse lorsque sa jonction p-n est exposée à la lumière. Le courant est appelé photo-généré I_{ph} . Dans l'obscurité, les caractéristiques I-V sombres sont généralement exprimés mathématiquement par l'équation de la diode Shockley [10] comme suit:

Chapitre 1 Modélisation de PV

$$I_{D1} = I_{01} \left(e^{\frac{V_D}{A_1 V_t}} - 1 \right) \quad (1.7)$$

Où

V_D : Différence du potentiel électrique entre les deux extrémités de la diode.

I_{01} : Courant de saturation inverse de la diode.

A_1 : Facteur d'idéalité de la diode.

V_t : Tension thermique en fonction de la température T donnée par l'équation suivante:

$$V_t = \frac{k * T}{q} \quad (1.8)$$

Où

k et q représentent respectivement la constante de Boltzmann ($1.3806503 * 10^{-23} \text{ J/K}$) et la charge d'électrons ($1,602176 * 10^{-19} \text{ C}$).

En supposant que le principe de superposition se vérifie, les caractéristiques I-V complètes sont simplement la somme des caractéristiques I-V sombres et éclairées comme le montre l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_D}{A_1 V_t}} - 1 \right) \quad (1.9)$$

Dans la littérature [11][12], l'équation (1.9) est l'expression mathématique du modèle idéal, dans lequel I_{ph} est modélisé comme une source de courant.

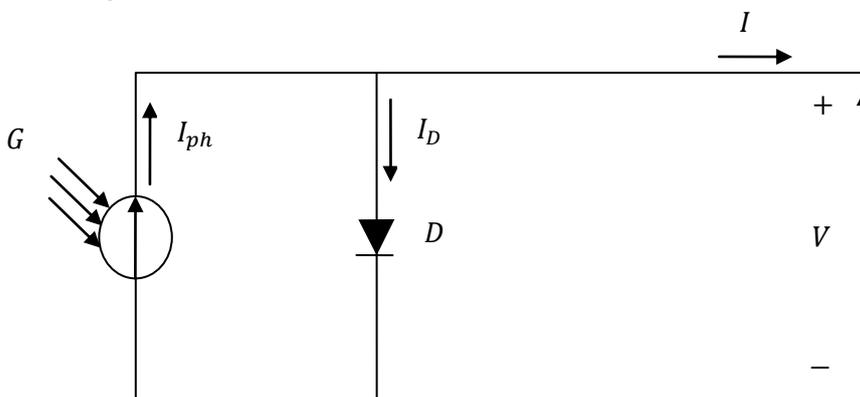


Figure 1.11 Circuit électrique de modèle idéal.

Chapitre 1 Modélisation de PV

1.6.2 Modèle à une diode

Pour obtenir une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule du modèle idéal, le second modèle tient compte de la résistivité des matériaux et des pertes ohmiques de toutes les couches dans la cellule. Ces pertes sont approximativement représentées par la résistance en série R_s .

En tenant compte des effets de la résistance en série, Townsend [13] a présenté un modèle de circuit en supposant que la résistance de shunt est infinie. Ce modèle est appelé modèle simplifié à une diode et sa valeur de courant est donnée par l'expression suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 V_t}} - 1 \right) \quad (1.10)$$

Duffie et Beckman[14] ont amélioré le modèle simplifié à une diode en incluant une résistance parallèle supplémentaire dans le modèle de circuit équivalent, appelé modèle à une diode. Sa relation I-V est donnée par l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.11)$$

Où

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

Le schéma électrique correspondant au modèle à une diode est illustré par la figure (1.12)

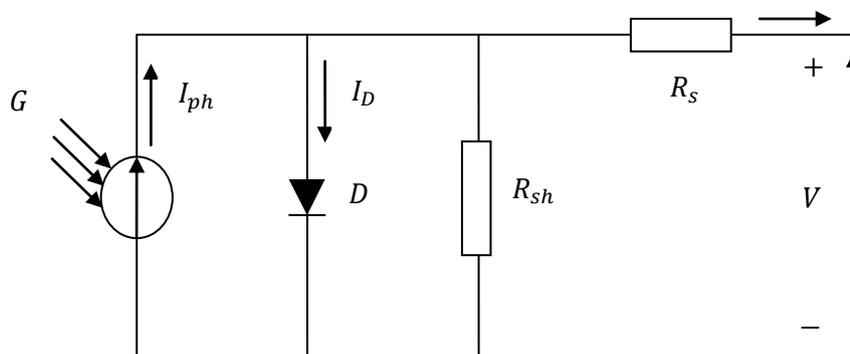


Figure 1.12 Circuit électrique de modèle à une diode.

1.6.3 Modèle à deux diode

Dans le modèle à deux diodes, la deuxième diode, en parallèle avec la première, est utilisée pour modéliser la recombinaison dans la région de charge d'espace [15][16]. La figure 1.13 montre le schéma électrique du modèle à deux diodes. Son modèle électrique est exprimé par l'équation suivante:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.12)$$

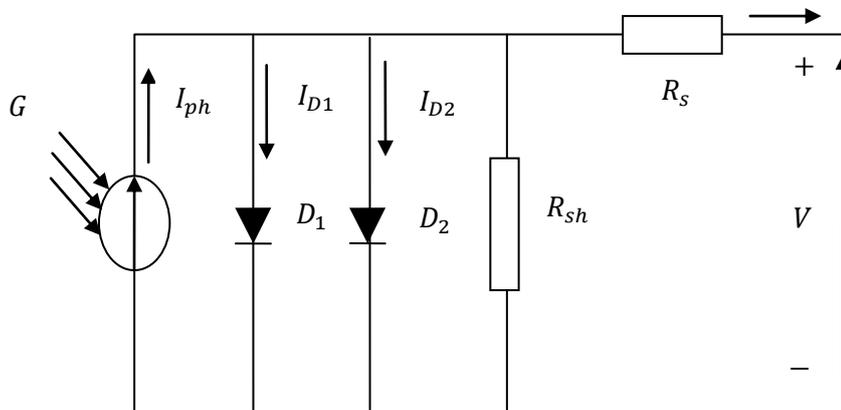


Figure 1.13 Circuit électrique de modèle à deux diodes.

Avec :

I_{01} et I_{02} sont les courants de saturation inverses de la première et de la deuxième diode, respectivement.

A_1 et A_2 sont les facteurs d'idéalité des deux diodes.

Les propriétés des différents modèles électriques PV sont récapitulées dans le tableau 1.1 :

Chapitre 1 Modélisation de PV

Nom du modèle	Quantité de diode	Paramètres	Équation du modèle
Modèle idéale	1	I_{ph}, I_{01}, A_1	$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_D}{A_1 V_t}} - 1 \right)$
Modèle simplifié à une diode	1	I_{ph}, I_{01}, A_1, R_s	$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 V_t}} - 1 \right)$
Modèle à une diode	1	$I_{ph}, I_{01}, A_1, R_s, R_{sh}$	$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$
Modèle à deux diodes	2	$I_{ph}, I_{01}, A_1, I_{02}, A_2, R_s, R_{sh}$	$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$

Tableau 1.1 Propriétés de divers modèles électriques photovoltaïques.

Les modèles sont caractérisés par le nombre de paramètres tels que le modèle simplifié à une diode, le modèle à une diode et le modèle à deux diodes qui sont respectivement des modèles à quatre, cinq et sept paramètres.

1.6.4 Modèle du panneau photovoltaïque

Les chercheurs ont développé le modèle de panneau photovoltaïque afin de prédire les caractéristiques I-V avant de modéliser l'ensemble du système. En supposant qu'il y ait n_s cellules connectées en série dans un panneau, la tension de sortie et la résistance du panneau sont exprimées de la manière suivante :

Chapitre 1 Modélisation de PV

$$V' = n_s \cdot V \quad (1.13)$$

$$I' = I \quad (1.14)$$

$$R'_s = n_s \cdot R_s \quad (1.15)$$

$$R'_{sh} = n_s \cdot R_{sh} \quad (1.16)$$

Où :

V' , I' , R'_s et R'_{sh} représente respectivement la tension, le courant, la résistance série et la résistance shunt du panneau photovoltaïque.

Donc :

Modèle idéal	$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V'}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right)$	(1.17)
--------------	--	--------

Modèle simplifié à une diode	$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V' + I' R'_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right)$	(1.18)
------------------------------	--	--------

Modèle à une diode	$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V' + I' R'_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V' + I' R'_s}{R'_{sh}}$	(1.19)
--------------------	---	--------

Modèle à deux diodes	$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V' + I' R'_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V' + I' R'_s}{A_2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V' + I' R'_s}{R'_{sh}}$	(1.20)
----------------------	--	--------

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques notions préliminaires pour la compréhension du comportement de panneau photovoltaïque. Nous avons également présenté la modélisation des panneaux photovoltaïques.

2.1 Introduction

Les méthodes d'identification estiment les paramètres du PV. Plusieurs méthodes d'identification sont proposées dans la littérature.

Ce chapitre aborde les différentes méthodes d'identification des paramètres électrique de la caractéristique I-V en utilisant le modèle à une diode et le modèle à deux diodes.

2.2 Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque

Il est bien connu que l'étape d'identification des paramètres de n'importe quel système est une étape déterminante aussi bien pour la simulation que pour la pratique. Donc comme tout système, une connaissance précise des paramètres de panneaux photovoltaïques est indispensable pour la conception, le contrôle de qualité et pour des estimations de leurs performances. Ces paramètres sont souvent déterminés à partir de données expérimentales sous un éclairage et une température bien contrôlés. Les constructeurs des cellules et des panneaux PV fournissent généralement une fiche technique contenant quelques paramètres de la cellule ou du panneau PV composé par un groupement de plusieurs cellules. Mais il y a d'autres paramètres qui ne sont pas fournis sur la fiche technique. En pratique la détermination de ces paramètres inconnus est très importante. Dans cette partie, on aborde une des questions importantes liées aux systèmes photovoltaïques qui consiste à la modélisation et à la détermination de ces paramètres inconnus. En effet, plusieurs méthodes d'identification ont été proposées dans la littérature.[17]

Le test standard d'un panneau photovoltaïque fournit la tension de circuit ouvert (V_{co}), courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à la puissance maximale (V_{mpp}), le courant à la

Chapitre 2 Techniques d'identification

puissance maximale (I_{mpp}), aux conditions standard de rayonnement de $1000 W/m^2$ et de température de $25^\circ C$.

2.3 Méthodes d'identification

Les différentes techniques d'identification peuvent être réparties comme suit :

- Méthode analytique
- Méthode des cinq points
- Méthode du modèle de référence

2.3.1 Méthodes applique au modèle à une diode

Dans cette partie, quelques méthodes sont présentées pour identifier les paramètres associés au modèle à une diode (I_{ph} , I_{01} , A_1 , R_s et R_{sh}), de l'équation :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V + I R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Avec :

- Au point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$)

$$0 = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

- Au point de court-circuit ($0, I_{cc}$)

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

- Au point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp})

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

a Méthodes analytique

Cette méthode est utilisée pour trouver les paramètres inconnus en utilisant les trois points remarquables de la courbe I-V, et deux autres points. Ces points doivent être : le

Chapitre 2 Techniques d'identification

point de court-circuit ($0, I_{cc}$), le point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$), le point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp}), la pente au point du circuit ouvert qui est R_{s0} , et la pente au point du court-circuit R_{sh0} .

Les expressions suivantes sont tirées de [18] :

$$A_1 = \frac{V_{mpp} + I_{mpp}R_{s0} - V_{co}}{n_s V_t \left[\ln \left(I_{cc} - \frac{V_{mpp}}{R_{sh0}} - I_{mpp} \right) - \ln \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) + \frac{I_{mpp}}{I_{cc} - (V_{co}/R_{sh0})} \right]} \quad (2.5)$$

$$I_{01} = \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) e^{\left(\frac{-V_{co}}{A_1 n_s V_t} \right)} \quad (2.6)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (2.7)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{A_1 n_s V_t}{I_{01}} e^{\left(\frac{-V_{co}}{A_1 n_s V_t} \right)} \quad (2.9)$$

Avec d'après la figure :

$$R_{sh0} = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=I_{cc}} \quad (2.10)$$

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=V_{co}} \quad (2.11)$$

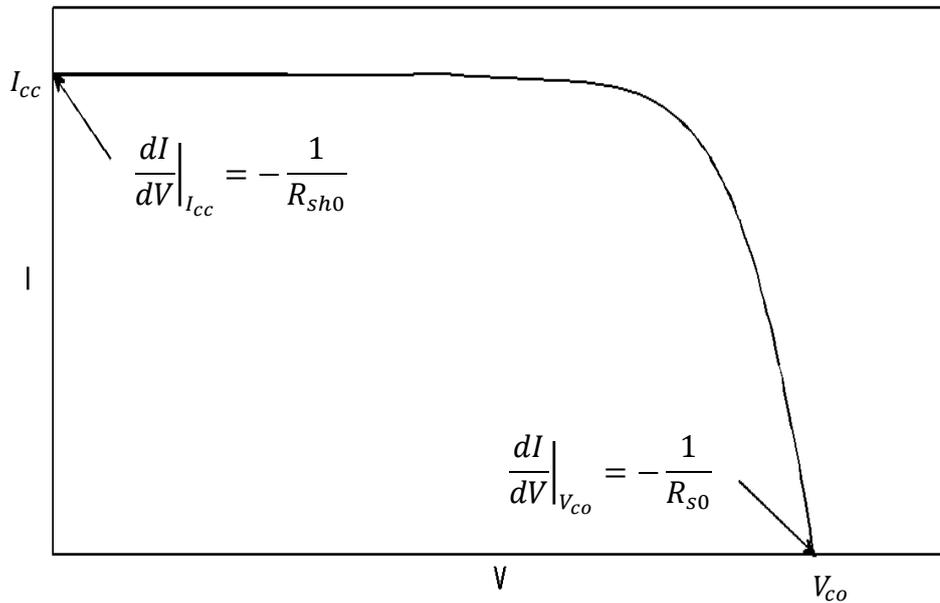


Figure 2.1 Les deux points sur la courbe I-V.

***b* Méthode de cinq points**

Cette méthode est utilisée pour trouver les paramètres inconnus en utilisant plus de trois points de la courbe I-V au lieu de seulement les trois points remarquables en fonction du nombre d'inconnues pour chaque modèle. Pour le modèle à une diode, cinq points sont nécessaires pour trouver les paramètres inconnus. Cette méthode, basée sur la résolution d'un système de cinq équations non linéaires résultant de l'application de l'équation (2.3) à cinq points qui doivent être : le point de court-circuit $(0, I_{cc})$, le point de circuit ouvert $(V_{co}, 0)$, le point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp}) , et deux autres points (V_x, I_x) et (V_{xx}, I_{xx}) tel que : $V_x = \frac{1}{2} V_{co}$ et $V_{xx} = \frac{1}{2} (V_{co} - V_{mpp})$ [19]. Ces points sont mentionnés sur le tracé de la figure (2.2) :

Chapitre 2 Techniques d'identification

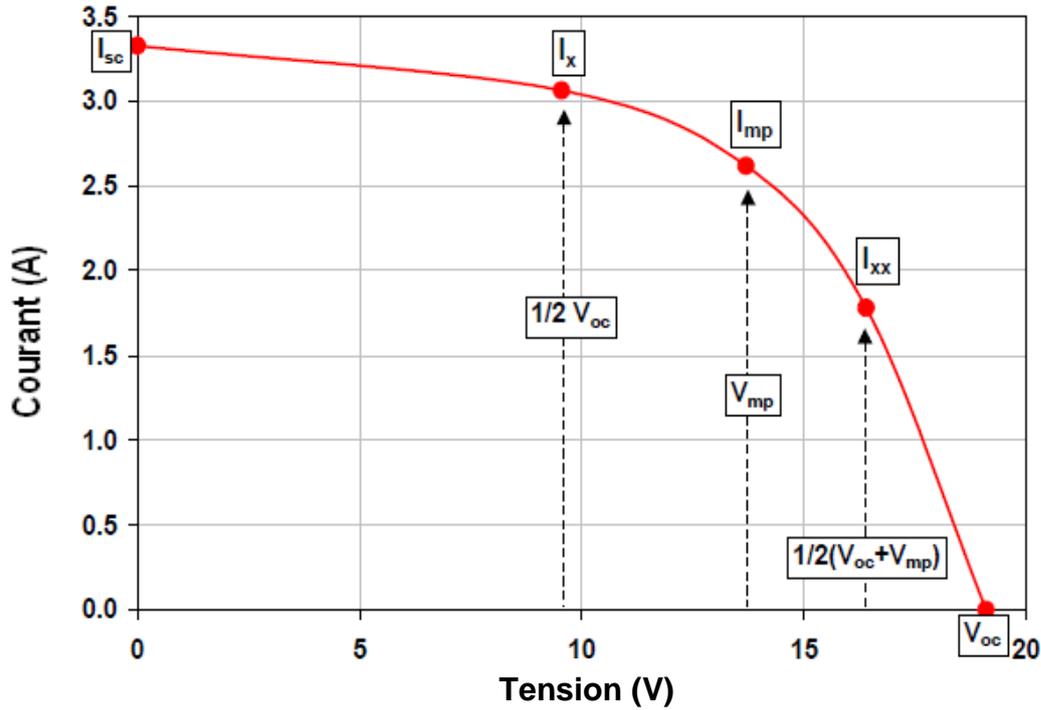


Figure 2.2 Les cinq points sur la courbe I-V

Donc, en réécrivant l'équation (2.1) sous la forme $f(I, V) = 0$, aux cinq points considérés, les cinq équations du système sont les suivantes :

$$I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (2.12)$$

$$I_{cc} - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (2.13)$$

$$I_{mpp} - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (2.14)$$

$$I_x - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{V_x + I_x R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{V_x + I_x R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (2.15)$$

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$I_{xx} - I_{ph} + I_{01} \left(e^{\frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{n_s A_1 V_t}} - 1 \right) + \frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (2.16)$$

Les équations allant de (2.12) à (2.16) constituent donc un système non linéaire qu'on peut résoudre avec des méthodes itératives connues comme la méthode de Newton-Raphson.

c Méthode de modèle de référence

Cette méthode utilise des signaux d'entrée-sortie pour identifier les paramètres des modèles mathématiques de structures variées. La figure (2.3) montre le schéma de principe de la méthode[20]-[21].

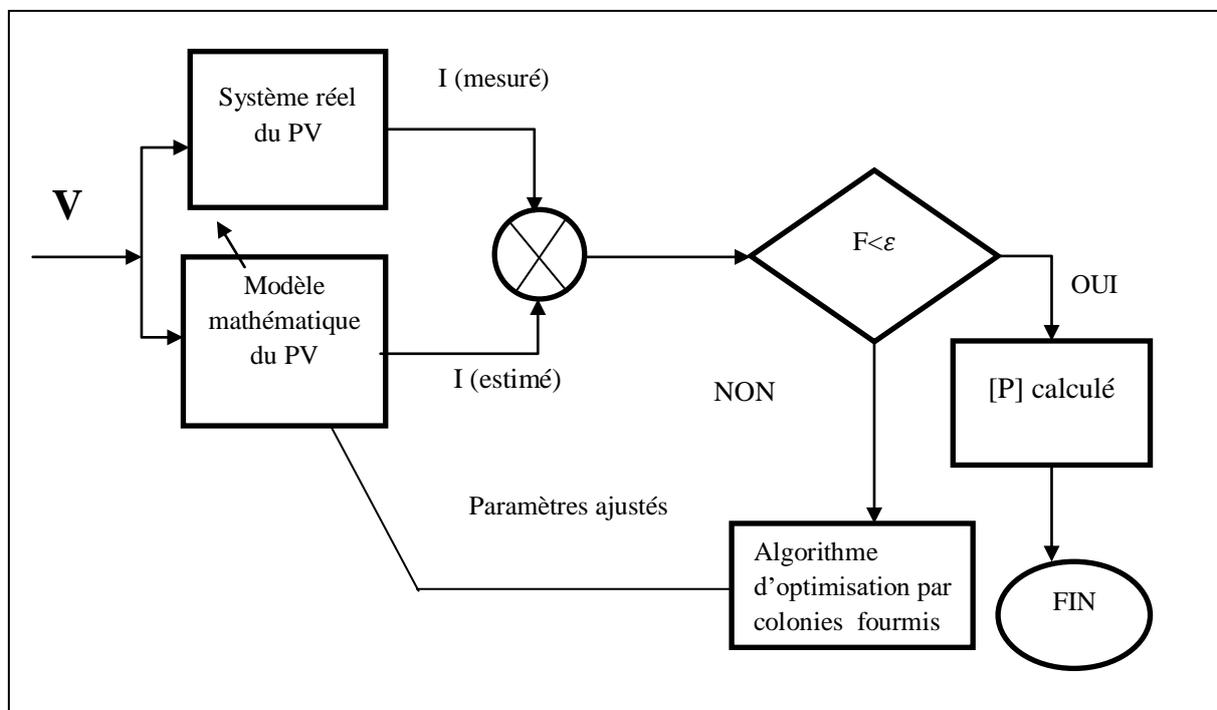


Figure 2.3 Principe d'identification

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

Le problème consiste à trouver le minimum du critère quadratique F , fonction qui

Chapitre 2 Techniques d'identification

dépend des paramètres. Si le critère est linéaire par rapport aux paramètres, son minimum peut être calculé analytiquement par la méthode des moindres carrés par exemple. Par contre, si la fonction est non linéaire par rapport aux paramètres, la solution est approchée par des algorithmes itératifs de programmation non linéaire.

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

$$\varepsilon(k) = I_m(k) - I_c(k) \quad k = 1, \dots, N \quad (2.17)$$

Où N désigne la dimension de vecteur de mesure.

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

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

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

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

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

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$F = \sum_{k=1}^N \varepsilon(k)^2 = \sum_{k=1}^N (I_m(k) - I_c(k))^2 \quad (2.18)$$

2.3.2 Méthodes appliquées au modèle à deux diodes

Dans cette section, quelques méthodes sont présentées pour identifier les sept paramètres ($I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s$ et R_{sh}) associés au modèle à deux diodes de l'équation :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.19)$$

a Méthode analytique

La méthode analytique a été proposée par Phang et al [18] pour identifier les paramètres d'une cellule PV. Pour simplifier le calcul, plusieurs chercheurs supposent que $A_1 = 1$ et $A_2 = 2$ [22].

Avec

- Au point de circuit ouvert ($V_{co}, 0$)

$$0 = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.20)$$

- Au point de court-circuit ($0, I_{cc}$)

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{I_{cc} R_s}{2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (2.21)$$

- Au point de puissance maximale (V_{mpp}, I_{mpp})

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (2.22)$$

Eliminant I_{ph} en faisant la soustraction entre les équations (2.20) et (2.21), on obtient l'expression suivante:

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$I_{cc} = I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} - e^{\frac{I_{cc} R_s}{n_s V_t}} \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} - e^{\frac{I_{cc} R_s}{2 n_s V_t}} \right) + \frac{V_{co} - I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (2.23)$$

On dérive l'équation (2.19) par rapport à I , on obtient l'expression suivant :

$$\begin{aligned} -\frac{dV}{dI} & \left(\frac{I_{01}}{n_s V_t} e^{\frac{V+IR_s}{n_s V_t}} + \frac{I_{02}}{2 n_s V_t} e^{\frac{V+IR_s}{2 n_s V_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) \\ & = 1 + \frac{I_{01} R_s}{n_s V_t} e^{\frac{V+IR_s}{n_s V_t}} + \frac{I_{02} R_s}{2 n_s V_t} e^{\frac{V+IR_s}{2 n_s V_t}} + \frac{R_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Au point de circuit ouvert $-\frac{dV}{dI} = R_{s0}$, on obtient l'expression suivante:

$$(R_{s0} - R_s) \left(\frac{I_{01}}{n_s V_t} e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} + \frac{I_{02}}{2 n_s V_t} e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (2.25)$$

Au point de court-circuit $-\frac{dV}{dI} = R_{sh0}$, on obtient l'expression suivante :

$$(R_{sh0} - R_s) \left(\frac{I_{01}}{n_s V_t} e^{\frac{I_{cc} R_s}{n_s V_t}} + \frac{I_{02}}{2 n_s V_t} e^{\frac{I_{cc} R_s}{2 n_s V_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (2.26)$$

Ou les résistances R_{sh0} et R_{s0} sont calculé à partir de la caractéristique I-V.

L'équation (2.21) est remplacée dans l'équation (2.22) :

$$\begin{aligned} I_{mpp} & \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) \\ & = I_{01} \left(e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} - e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t}} \right) \\ & + I_{02} \left(e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} - e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{2 n_s V_t}} \right) + \frac{V_{co} - V_{mpp}}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Les approximations suivantes peuvent être effectuées:

$$e^{\frac{V_{co}}{A V_t}} \gg e^{\frac{I_{cc} R_s}{A V_t}} \quad \text{avec : } A = 1 \text{ ou } 2 \quad (2.28)$$

$$R_{sh}, R_{sh0} \gg R_s \quad (2.29)$$

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$\frac{I_{01}}{n_s V_t} e^{\frac{I_{cc} R_s}{n_s V_t}}, \frac{I_{02}}{2 n_s V_t} e^{\frac{I_{cc} R_s}{2 n_s V_t}} \ll \frac{1}{R_{sh0}} \quad \text{et} \quad I_{cc} R_s \ll V_{co} \quad (2.30)$$

Les équations (2.23), (2.25), (2.26), (2.27) deviennent, respectivement :

$$I_{01} e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} + I_{02} e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} - I_{cc} + \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0 \quad (2.31)$$

$$(R_{s0} - R_s) \left(\frac{I_{01}}{n_s V_t} e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} + \frac{I_{02}}{2 n_s V_t} e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (2.32)$$

$$I_{01} e^{\frac{V_{co}}{n_s V_t}} + I_{02} e^{\frac{V_{co}}{2 n_s V_t}} - I_{01} e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{n_s V_t}} - I_{02} e^{\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{2 n_s V_t}} + \frac{V_{co} - V_{mpp}}{R_{sh}} - I_{mpp} = 0 \quad (2.33)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (2.34)$$

En éliminant I_{01} et I_{02} de (2.31)-(2.33) et en utilisant (2.34), on obtient :

$$I_{cc} - I_{mpp} - \frac{V_{mpp}}{R_{sh0}} - \left(\frac{V_{co}}{R_{sh0}} - I_{cc} + \frac{2 n_s V_t}{R_{s0} - R_s} \right) e^{\frac{V_{mpp} - V_{co}}{n_s V_t}} e^{\frac{I_{mpp} R_s}{n_s V_t}} - 2 \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh0}} - \frac{n_s V_t}{R_{s0} - R_s} \right) e^{\frac{V_{mpp} - V_{co}}{2 n_s V_t}} e^{\frac{I_{mpp} R_s}{2 n_s V_t}} = 0 \quad (2.35)$$

a.1 Solution quadratique de R_s

En utilisant l'approximation suivante :

$$e^{(k R_s)} = 1 + k R_s \quad (2.36)$$

Pour

$$k = \frac{I_{mpp}}{V_t} \quad \text{et} \quad \frac{I_{mpp}}{2 V_t} \quad (2.37)$$

Et par définition les nouveaux symboles suivants :

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$\alpha = I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh0}} \quad (2.38)$$

$$\beta = I_{cc} - I_{mpp} - \frac{V_{mpp}}{R_{sh0}} \quad (2.39)$$

$$\gamma = e^{\frac{V_{mpp} - V_{co}}{2V_t}} \quad (2.40)$$

$$\delta = \frac{I_{mpp}}{V_t} \quad (2.41)$$

L'équation quadratique suivante de R_s , peut être obtenue :

$$aR_s^2 + bR_s + c = 0 \quad (2.42)$$

Où

$$a = \alpha\gamma\delta(1 - \gamma) \quad (2.43)$$

$$b = \alpha\gamma(2 - \gamma) + \alpha\gamma\delta R_{s0}(\gamma - 1) - \beta + \gamma\delta V_t(1 - 2\gamma) \quad (2.44)$$

$$c = \alpha\gamma\delta R_{s0}(\gamma - 2) - \beta R_{s0} + 2\gamma V_t(1 - \gamma) \quad (2.45)$$

R_s peut alors être obtenu par la résolution de l'équation quadratique comme suit :

$$R_s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.46)$$

Donc, I_{01} , I_{02} , R_{sh} , et I_{ph} sont obtenus à partir de (2.31), (2.32), (2.26), (2.20), respectivement :

$$I_{01} = \left(\frac{V_{co}}{R_{sh0}} - I_{sc} + \frac{2 n_s V_t}{R_{s0} - R_s} \right) e^{\left(\frac{V_{co}}{n_s V_t} \right)} \quad (2.47)$$

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$I_{02} = 2 \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh0}} - \frac{n_s V_t}{R_{s0} - R_s} \right) e^{\left(\frac{V_{co}}{2 n_s V_t} \right)} \quad (2.48)$$

$$R_{sh} = \left[\frac{1}{R_{sh0} - R_s} - \frac{I_{01}}{n_s V_t} e^{\left(\frac{I_{cc} R_s}{n_s V_t} \right)} - \frac{I_{02}}{2 n_s V_t} e^{\left(\frac{I_{cc} R_s}{2 n_s V_t} \right)} \right]^{-1} \quad (2.49)$$

$$I_{ph} = I_{01} \left(e^{\left(\frac{V_{co}}{n_s V_t} \right)} - 1 \right) + I_{02} \left(e^{\left(\frac{V_{co}}{2 n_s V_t} \right)} - 1 \right) + \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.50)$$

Et R_s est obtenu avec la solution quadratique.

b Méthode de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson[23] est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. C'est une méthode itérative basée sur l'évaluation de la fonction objectif ainsi que sa dérivée dans un point X_n . Sa formule s'écrit comme suit :

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (2.51)$$

Où

- $f'(X_n)$: Evaluation de la dérivée de la fonction objectif $f(X)$ au point solution X_n .
- $f(X_n)$: Evaluation de la fonction objectif $f(X)$ à la valeur actuelle X_n .
- X_{n+1} : Mise à jour de la solution actuelle X_n .

Pour former la fonction objectif, l'équation $I = F(V)$ donnée par l'expression (2.19) est réécrite sous la forme suivante [24]:

$$\begin{aligned} & F(I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) \\ &= I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.52) \\ & - I \end{aligned}$$

Donc, en exploitant toutes les mesures du courant et tension issues directement à partir d'une cellule panneau PV, on construit un système de N équations et de sept inconnues.

Chapitre 2 Techniques d'identification

$$\begin{cases} F(I_{m1}, V_{m1}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m2}, V_{m2}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m3}, V_{m3}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ \vdots \\ F(I_{mN}, V_{mN}, I_{ph}, I_{01}, I_{02}, A_1, A_2, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \end{cases} \quad (2.53)$$

Ou I_m, V_m sont respectivement le courant et la tension mesuré.

En partant d'une valeur initiale X_0 , la formule de Newton-Raphson permettant de trouver la solution du système d'équations non linéaires est donnée comme suit:

$$X_{n+1} = X_n - J^{-1}(X_n)F(X_n) \quad (2.54)$$

Ou

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial I_{ph}} & \frac{\partial F_1}{\partial I_{01}} & \frac{\partial F_1}{\partial I_{02}} & \frac{\partial F_1}{\partial A_1} & \frac{\partial F_1}{\partial A_2} & \frac{\partial F_1}{\partial R_s} & \frac{\partial F_1}{\partial R_{sh}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial I_{ph}} & \frac{\partial F_2}{\partial I_{01}} & \frac{\partial F_2}{\partial I_{02}} & \frac{\partial F_2}{\partial A_1} & \frac{\partial F_2}{\partial A_2} & \frac{\partial F_2}{\partial R_s} & \frac{\partial F_2}{\partial R_{sh}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_N}{\partial I_{ph}} & \frac{\partial F_N}{\partial I_{01}} & \frac{\partial F_N}{\partial I_{02}} & \frac{\partial F_N}{\partial A_1} & \frac{\partial F_N}{\partial A_2} & \frac{\partial F_N}{\partial R_s} & \frac{\partial F_N}{\partial R_{sh}} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

Et

$$X = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_{01} \\ I_{02} \\ A_1 \\ A_2 \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix} \text{ et } F(X) = \begin{bmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ F_4(X) \\ F_5(X) \\ F_6(X) \\ F_7(X) \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes techniques d'identification des paramètres électriques d'un panneau photovoltaïque ont été présentées pour le modèle à une diode et celui à deux diodes.

Chapitre 3 Métaheuristiques et résultats

3.1 Introduction

Les métaheuristiques sont des méthodes d'optimisation globales, itératives s'appuyant sur des mécanismes de transition probabiliste (recherche aléatoire). Le terme métaheuristique est composé du préfixe méta signifiant au-delà, « un niveau supérieur » et heuristique qui dérive du grec ancien heuriskêin et signifiant « trouver ».

Elles sont inspirées d'analogie avec la réalité:

- Physique (Recuit simulé)
- Biologie (Algorithme génétique, Recherche tabou)
- Ethologie(Optimisation par essaims particulaires, Algorithme de Colonies de Fourmis)

Contrairement aux méthodes déterministes, les métaheuristiques ne nécessitent aucune connaissance sur la continuité ou la dérivabilité de la fonction objectif. Ces méthodes sont dédiées aux problèmes de grande taille.

Ce chapitre présente les métaheuristiques les plus utilisées dans la littérature. La méthode des colonies de fourmis étant utilisée comme technique de minimisation dans le modèle de référence pour l'identification des paramètres du PV, sera détaillée.

3.2 Métaheuristique

Les métaheuristiques sont réparties en deux catégories comme suit:

- Méthodes de Voisinage ou de parcours
- Méthodes évolutionnaires ou à population

La figure 3.1 présente les principales métaheuristiques

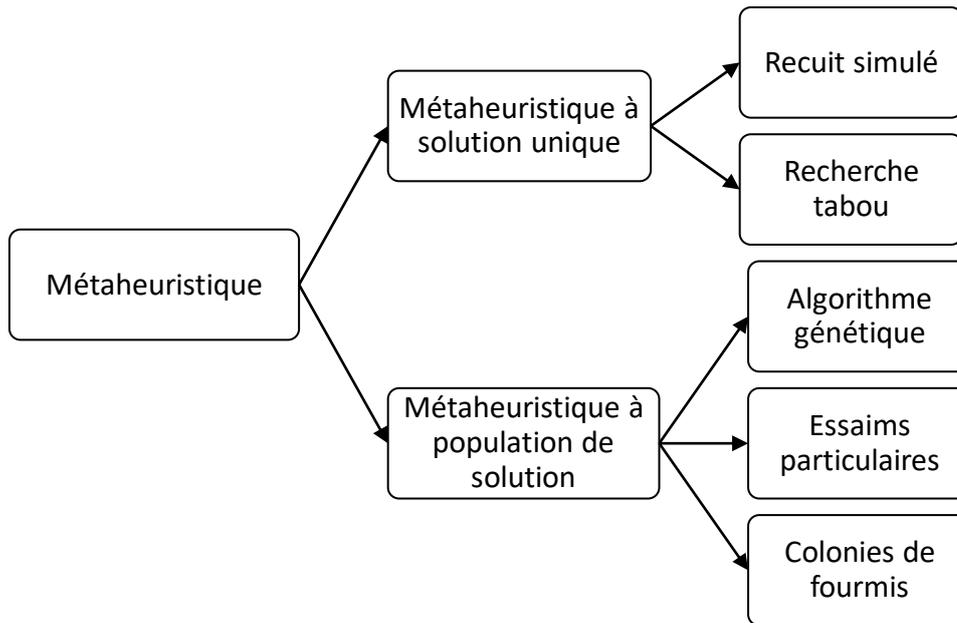


Figure 3.1 Classification des metaheuristiques

3.2.1 Métaheuristique à solution unique

Les méthodes itératives à solution unique sont toutes basées sur un algorithme de recherche de voisinage qui commence avec une solution initiale, puis l'améliore pas à pas en choisissant une nouvelle solution dans son voisinage. Le processus s'arrête lorsqu'on ne peut plus améliorer la solution courante ou parce que le nombre maximal d'itérations (fixé au départ) est atteint [25]. On peut citer:

- Recuit simulé
- Recherche tabou

a Recuit simulé

La méthode du recuit simulé a été introduite en 1983 par Kirkpatrick[26]. L'analogie de la méthode s'inspire du recuit des métaux en métallurgie : un métal refroidi trop vite présente de nombreux défauts microscopiques, c'est l'équivalent d'un optimum local pour un problème d'optimisation. Si on le refroidit lentement, les atomes se réarrangent, les défauts disparaissent, et le métal a alors une structure très ordonnée, équivalente à un optimum global [8]. La méthode du recuit simulé, appliquée aux problèmes d'optimisation, considère une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire. Il est possible, contrairement à un algorithme déterministe, d'accepter une dégradation de la

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

fonction objectif avec une certaine probabilité, sachant que cette dégradation pourra entraîner une amélioration ultérieure.

b Recherche tabou

Cette méthode a été proposée par Glover [27]. Elle consiste à choisir la meilleure solution dans le voisinage de la solution de départ. Elle repose sur des transformations taboues que l'on garde en mémoire.

- Elle utilise la notion de mémoire pour éviter l'optimum local.
- A chaque itération, le voisinage de la solution courante est examiné et la meilleure solution est sélectionnée. En appliquant ce principe, la méthode accepte des solutions apparemment moins intéressantes pouvant générer un meilleur voisinage, et encourageant un risque de répétitions cycliques. En effet, lorsque l'algorithme a quitté un minimum quelconque par acceptation de la dégradation de la fonction objectif, il peut reconsidérer les solutions antérieures.

Pour pallier ce problème, l'algorithme utilise une mémoire pour conserver la trace des dernières meilleures solutions rencontrées. Ces solutions sont déclarées taboues, d'où le nom de la méthode. Elles sont stockées dans une liste dite taboue. Une nouvelle solution n'est acceptée que si elle ne figure pas dans cette liste taboue. Ce critère d'acceptation d'une nouvelle solution évite la réexécution de l'algorithme, durant la visite de la liste taboue. Par conséquent, il dirige l'exploration de la méthode vers des régions du domaine de solutions non encore visitées.

3.2.2 Métaheuristique à base de population

Contrairement aux méthodes à solution unique qui font intervenir une seule solution, les méthodes de recherche à population manipulent un ensemble de solutions appelé population. Le principe général de toutes ces méthodes consiste à combiner des solutions entre elles pour en former de nouvelles en essayant d'hériter des 'bonnes' caractéristiques des solutions parents. Un tel processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint [25]. Parmi ces algorithmes à population, on peut citer :

- Algorithmes génétiques
- Optimisation par essaims de particules

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

- Algorithme de colonies de fourmis

a Algorithme génétique (AG)

Le concept de l'AG [28] a été proposé par Holland en 1975. Les AGs sont fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la biologie. Le vocabulaire employé est calqué sur celui de la théorie de l'évolution et de la génétique. Nous parlerons d'individus (solutions potentielles), de populations, de gènes (variables), de chromosomes, de parents, de descendants, de reproduction. Les points de l'espace de recherche sont les individus d'une population et la fonction à optimiser correspond à leur adaptation. Ces algorithmes font évoluer une population de manière itérative. Certains individus se reproduisent, d'autres mutent ou encore disparaissent et seuls les individus les mieux adaptés sont supposés survivre. L'héritage génétique des générations doit permettre à la population d'être de mieux en mieux adapté et donc de mieux répondre au critère d'optimisation.

Les AGs sont basés sur les étapes suivantes:

1. Choisir le codage des solutions
2. Générer une population initiale de taille fixe N , formée d'un ensemble fini d'individus, dite génération initiale
3. Définir une fonction d'évaluation (fitness) permettant d'évaluer un individu et le comparer aux autres
4. Choisir les individus par le mécanisme de couplage
5. Générer de nouveaux individus à l'aide des opérateurs génétiques en utilisant :
 - L'opérateur de croisement manipule la structure des chromosomes des parents afin de produire des individus meilleurs ou différents. Cet opérateur est effectué selon une probabilité de croisement P_c
 - L'opérateur de mutation évite d'établir des populations uniformes incapables d'évoluer. Il consiste à varier les valeurs de gènes de chromosomes selon une probabilité de mutation P_m .

b Algorithme d'essaim particule

Les algorithmes d'essaims particuliers connus sous le nom de Particles swarm optimisation (PSO) ont été introduits par Kennedy et Eberhart [29]. Ces algorithmes s'inspirent de particules (des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

mouvements coordonnés. En effet, ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture.

- Les individus de l'algorithme sont appelés particules (agents)
- Dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée, et en fonction de la configuration adoptée du voisinage.
- Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances : la propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers son meilleur voisin.

c Optimisation par colonie de fourmi (ACO)

L'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis (ou Optimization of AntColony (ACO)) est basé sur le mouvement réel de fourmis dans la nature. Cet algorithme a été proposé par Marco Dorigo en 1992 [30] sous le nom de système de fourmis (ou Ant System) pour résoudre le problème du voyageur de commerce.

Cette approche a connu des variantes importantes dont on peut citer :

- Système de fourmis élitiste (ou Elitist Ant System)[31]
- Max-Min Système de fourmis (ou Max-Min Ant System) [32]
- Système de colonies de fourmis (ou Ant Colony System) [33]
- Système de fourmis basé sur le rangement (ou Rank Based Ant System)[34]

c.1 Principe

L'idée consiste à imiter le comportement des fourmis réelles qui collaborent pour la recherche de sources de nourriture en mélangeant comportement d'exploration aléatoire et suivi des traces chimiques laissées par leur consœurs. Ces traces chimiques : les phéromones, sont utilisées par les fourmis pour communiquer entre elles de manière indirecte, par le biais de l'environnement.

La faculté d'une colonie de fourmis est de retrouver le plus court chemin

- Les fourmis suivent un chemin entre le nid et la nourriture

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

- Devant un obstacle, les fourmis prennent avec des probabilités égales un des deux chemins; la phéromone est déposée plus vite sur le chemin le plus court
- Toutes les fourmis choisissent le chemin le plus court

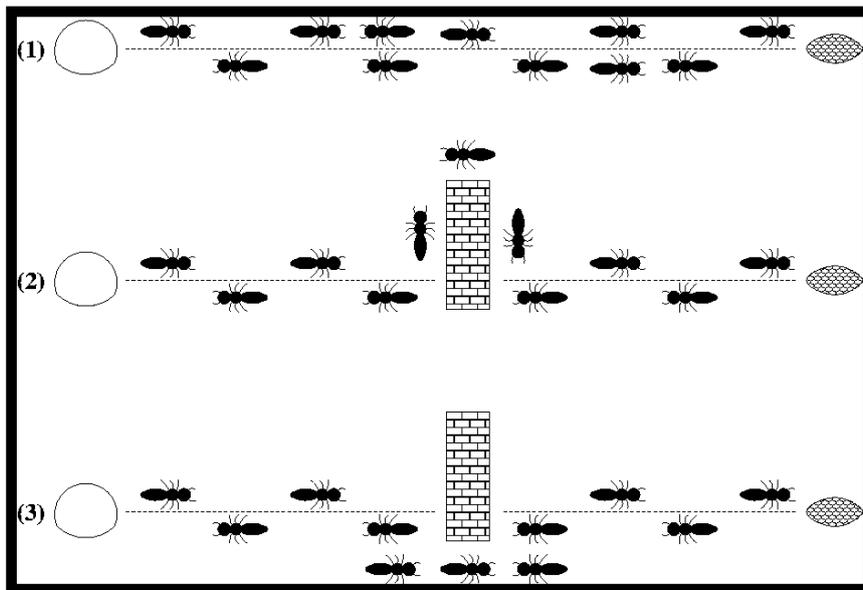


Figure 3.2 (a) Les fourmis suivent un chemin entre le nid et la nourriture. (b) Un obstacle apparaît sur le chemin ; les fourmis choisissent entre prendre à droite et à gauche avec équiprobabilité. (c) La phéromone s'évapore sur le chemin le plus long. (d) Toutes les fourmis choisissent le chemin le plus court.

c.2 Description simplifié de ACO

Les fourmis commencent par se déplacer au hasard. Puis, lorsqu'elles trouvent de la nourriture, elles retournent vers leur colonie, en marquant leur chemin à l'aide de phéromone. Si d'autres fourmis rencontrent ce chemin, il y a de fortes chances qu'elles arrêtent leurs déplacements aléatoires et qu'elles rejoignent le chemin marqué, en renforçant le marquage à leur retour, s'il mène bien vers la nourriture. Par conséquent, le chemin le plus court sera davantage parcouru, et donc plus renforcé et plus attractif. Par conséquent, le nombre de fourmis suivant cette trajectoire augmente. Au fil du temps, la quantité de phéromones déposée sur le plus long chemin diminue et finit par disparaître. Toutes les fourmis suivent alors le chemin le plus court. L'algorithme de colonies de fourmis a été principalement utilisé pour produire des solutions quasi-optimales au problème du

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

voyageur de commerce, puis, plus généralement, aux problèmes d'optimisation combinatoire. Récemment, son emploi se généralise à plusieurs domaines, depuis l'optimisation continue jusqu'à la classification, ou encore le traitement d'image et l'identification.

3.3 Optimisation continue de colonies de fourmis

Plusieurs algorithmes de colonies de fourmis pour l'optimisation continue sont présentés dans la littérature. On peut citer :

- Algorithme de colonies de fourmis continu (ou Continuous Ant Colony Algorithm (CACO)) [35][36]
- Système de colonies de fourmis continu (Continuous Ant Colony System (CACS)) [37]
- API [38]
- Colonie de fourmis à interaction continue [39]
- ACO pour l'optimisation continue [40]

3.3.1 ACO pour l'optimisation continue

Dans cette méthode, on génère aléatoirement une population de fourmis dans une distribution de probabilité. Les fourmis n'étant plus que des points à évaluer. De cet ensemble de points ne sont conservés que les meilleurs points, qui servent à construire une meilleure distribution de probabilité.

La distribution de probabilité utilisée est un ensemble de distributions normales combinées :

$$P(x) = \sum_{j=1}^k w_j \cdot \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \right) \quad (3.1)$$

Où

μ : Moyenne.

σ^2 : Variance d'undensité de fonction gaussienne.

w_j : Pondération.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

Chaque distribution n'est utilisée que sur une variable, sans dépendance avec les autres. La modification des distributions est nommée mise à jour de phéromone, et consiste à renforcer ou à diminuer l'influence des densités de fonction gaussienne correspondantes aux solutions.

La fourmi prend la valeur S_j^i , elle échantillonne son voisinage pour une nouvelle valeur pour la variable i et répète cette procédure pour toutes les variables $i = 1, \dots, n$ en utilisant la même $j^{\text{ème}}$ solution. Ceci se fait à l'aide de l'équation (3.1).

L'expression de σ la distance moyenne entre la $i^{\text{ème}}$ variable de la solution sélectionnée s_j^i et la $i^{\text{ème}}$ variable de toutes les autres solutions mémorisées, est donnée comme suit:

$$\sigma = \xi \sum_{r=1}^k \frac{|s_r^i - s_j^i|}{k-1} \quad (3.2)$$

3.3.2 CACS

Le principe du CACS « Continuous Ant Colony System » [37] est très proche du ACO pour l'optimisation continue. Dans l'algorithme CACS, la distribution normale est utilisée et son expression est donnée comme suit:

$$P(x) = e^{-\frac{(x-x_{min})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.3)$$

Où

x_{min} : Mode de la distribution

σ^2 : Indice de dispersion

L'expression de l'indice de dispersion est donnée comme suit :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{1}{(f_j - f_{min})} (x_j - x_{min})^2}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{(f_j - f_{min})}} \quad (3.4)$$

Où

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

m : le nombre de fourmis, f_j : la valeur de la fonction objectif associée à la fourmi j , et f_{min} : la meilleure valeur de la fonction objectif trouvée.

3.4 Identification et résultats

3.4.1 Identification des paramètres électriques d'un PV avec la méthode analytique

Afin de valider la méthode d'identification par la méthode analytique, nous allons l'appliquer sur les caractéristiques I-V et P-V d'un PV du modèle à une diode.

Le tableau (3.1) montre les paramètres identifiés du panneau photovoltaïque pour les températures différentes suivantes: $T = 25^\circ\text{C}$, $T = 50^\circ\text{C}$ et $T = 75^\circ\text{C}$.

Modèle	Paramètres				
	I_{ph} (A)	I_{01} (A)	A_1	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
$T = 25^\circ\text{C}$	5.2740	$3.4118 * 10^{-8}$	0.2258	0.2258	1030.8
$T = 50^\circ\text{C}$	5.3875	$4.6068 * 10^{-7}$	0.5892	0.1961	96.8333
$T = 75^\circ\text{C}$	5.4797	$7.3233.10^{-7}$	0.3013	0.2476	675.7451

Tableau 3.1 Les paramètres identifiés de panneau PV en utilisant la méthode analytique pour les différentes températures.

Une fois les paramètres électriques du circuit équivalent sont déterminés, pour les trois températures, on peut tracer les caractéristiques à l'aide de l'expression du modèle à une diode. La comparaison entre les caractéristiques I-V, P-V expérimentales et les

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

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

Tableau 3.2 Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.

caractéristiques simulées sont illustrées dans les figures (3.5) et (3.6) ,(3.9) et (3.10), (3.13) et (3.14),pour $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=75^{\circ}\text{C}$, respectivement.

On présente les caractéristiques électriques typiques du PV dans le tableau 3.2 :

➤ **Résultat Obtenu à $T = 25^{\circ}\text{C}$**

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

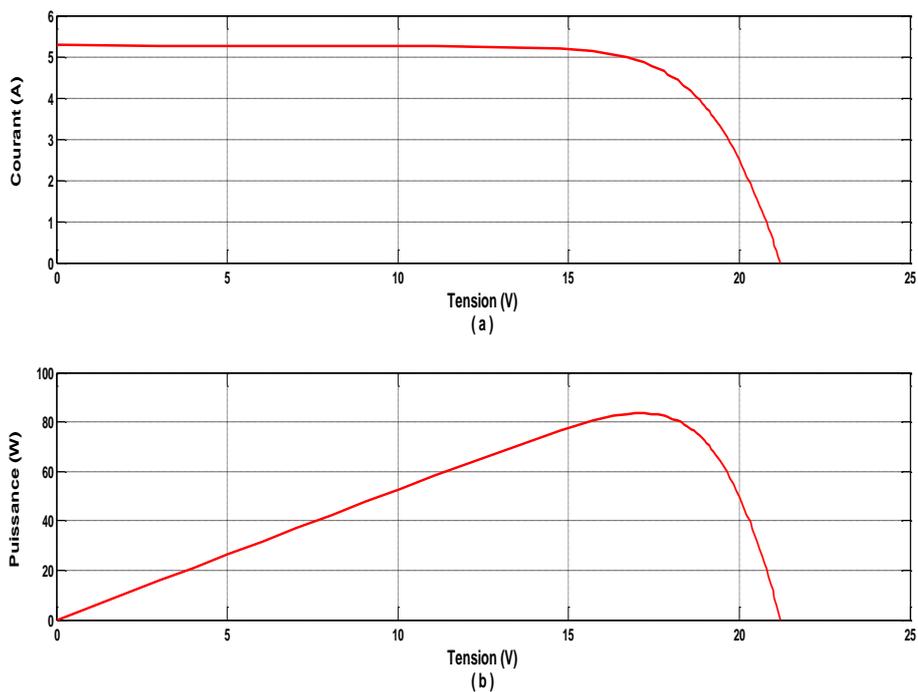


Figure 3.3 Caractéristiques I-V et P-V expérimentale pour $T=25^{\circ}\text{C}$:

(a) courant mesuré (b) puissance mesuré.

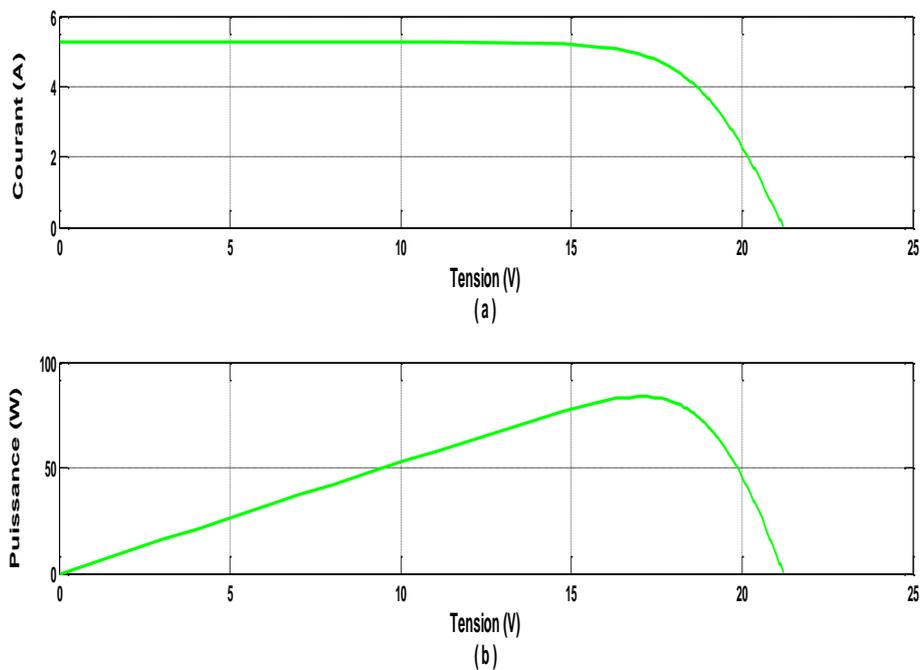


Figure 3.4 Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode analytique pour $T=25^{\circ}\text{C}$:

(a) courant calculé (b) puissance calculé.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

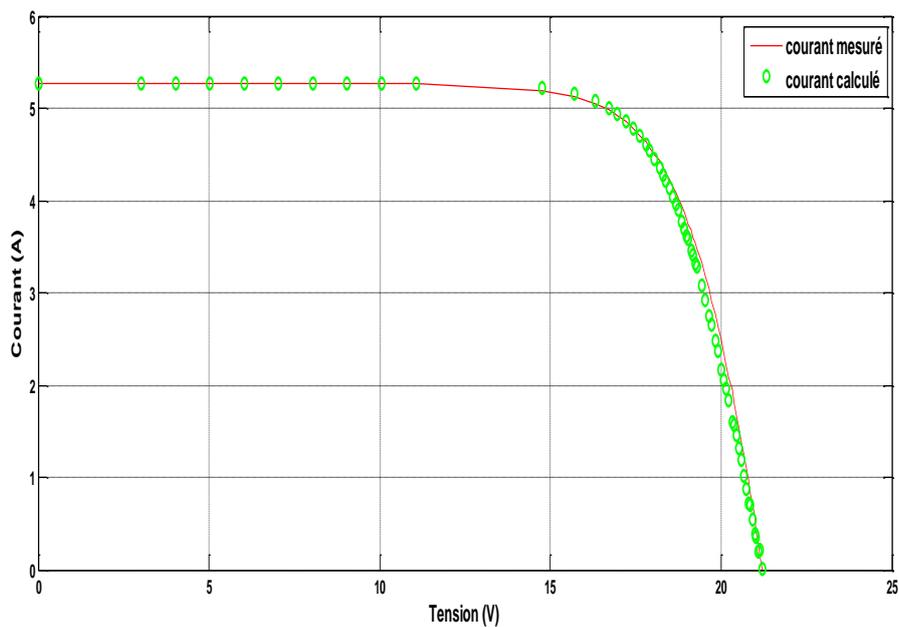


Figure 3.5 Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=25^{\circ}\text{C}$.

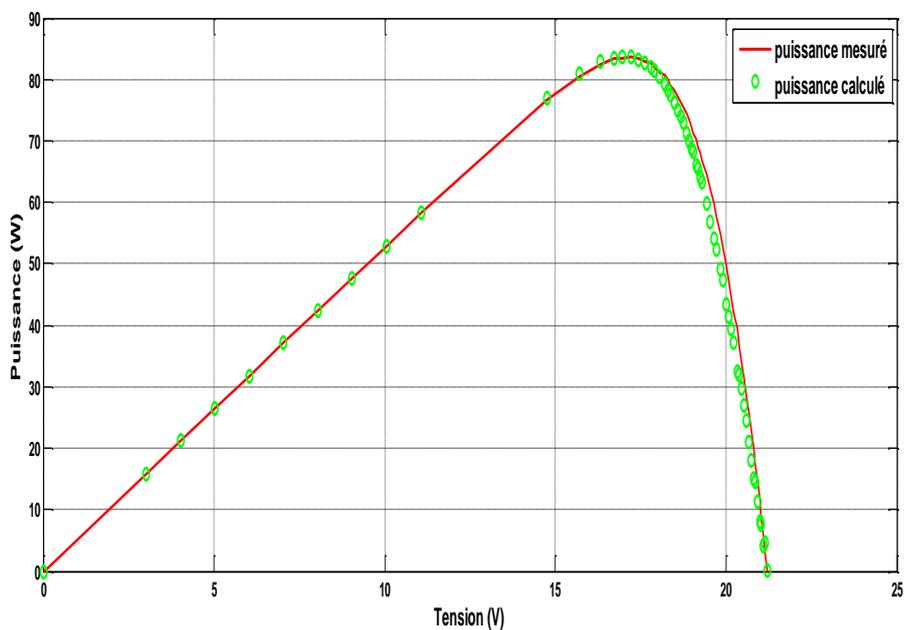


Figure 3.6 Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=25^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

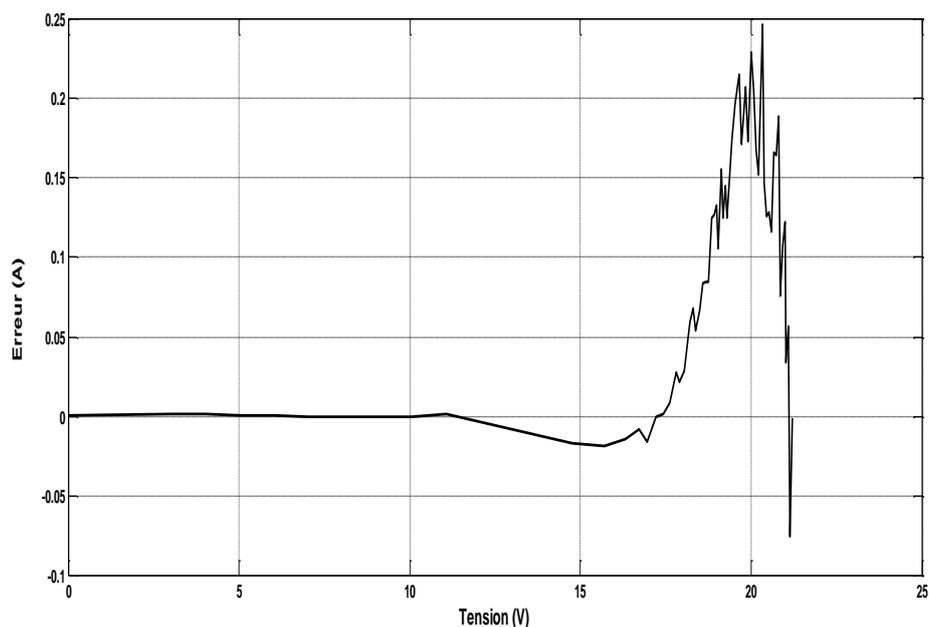


Figure 3.7 L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés par la méthode analytique à $T=25$.

➤ Résultat Obtenu à $T = 50^{\circ}\text{C}$

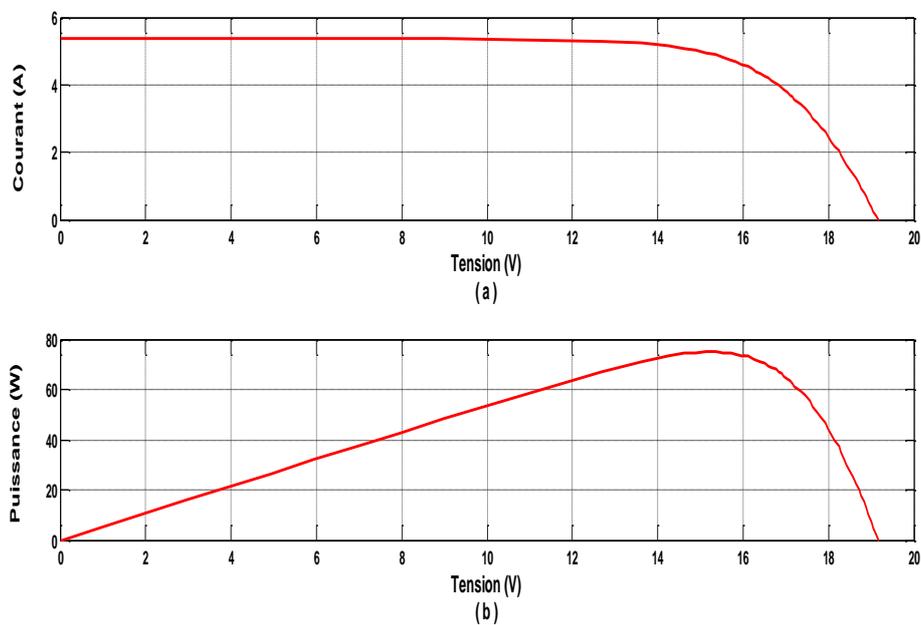


Figure 3.8 Caractéristiques I-V et P-V expérimentale pour $T=50^{\circ}\text{C}$:

(a) courant mesuré (b) puissance mesuré.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

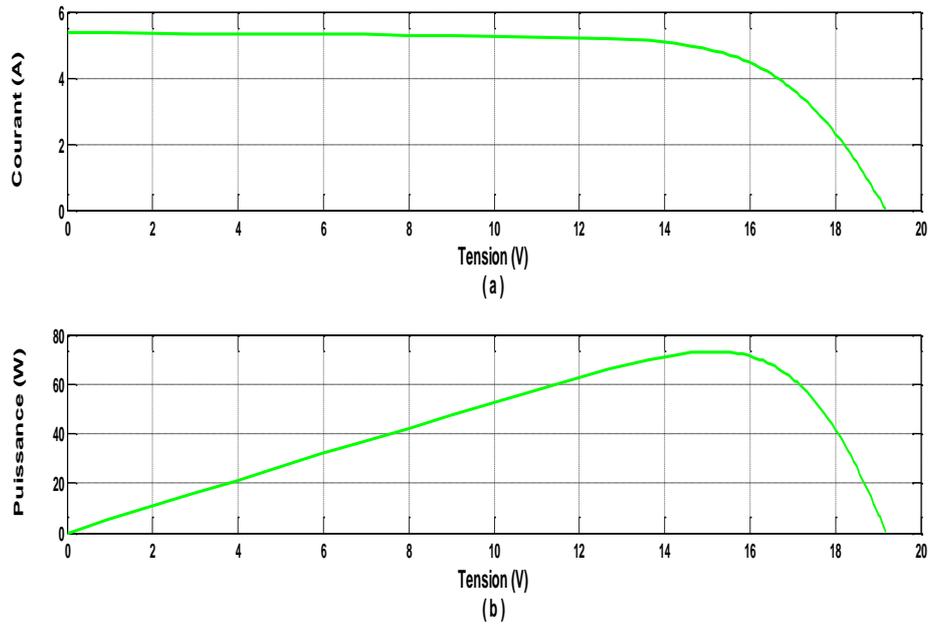


Figure 3.9 Caractéristiques I-V et P-V simulé par la méthode analytique pour $T=50^{\circ}\text{C}$:
(a) courant calculé (b) puissance calculé

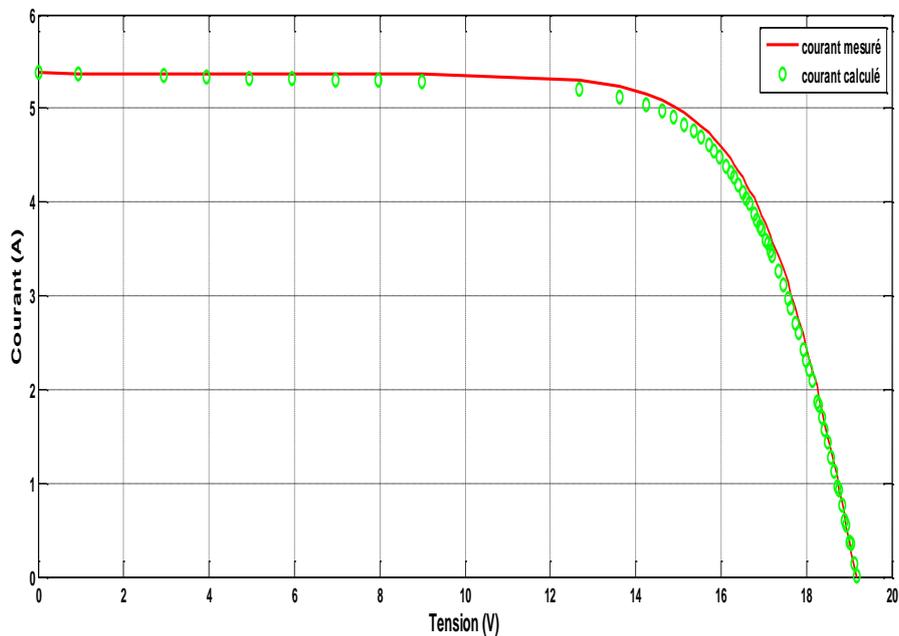


Figure 3.10 Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=50^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

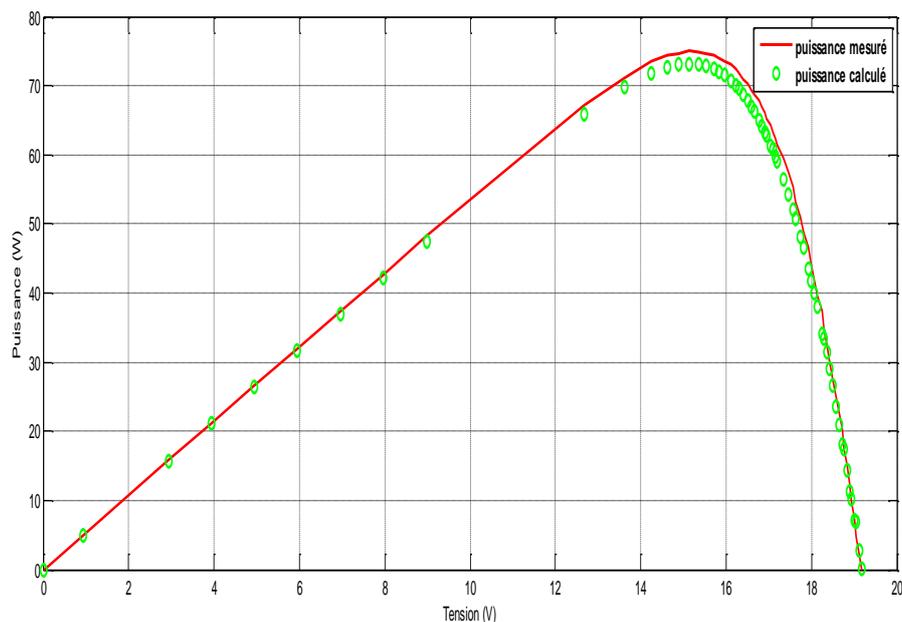


Figure 3.11 Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=50^{\circ}\text{C}$.

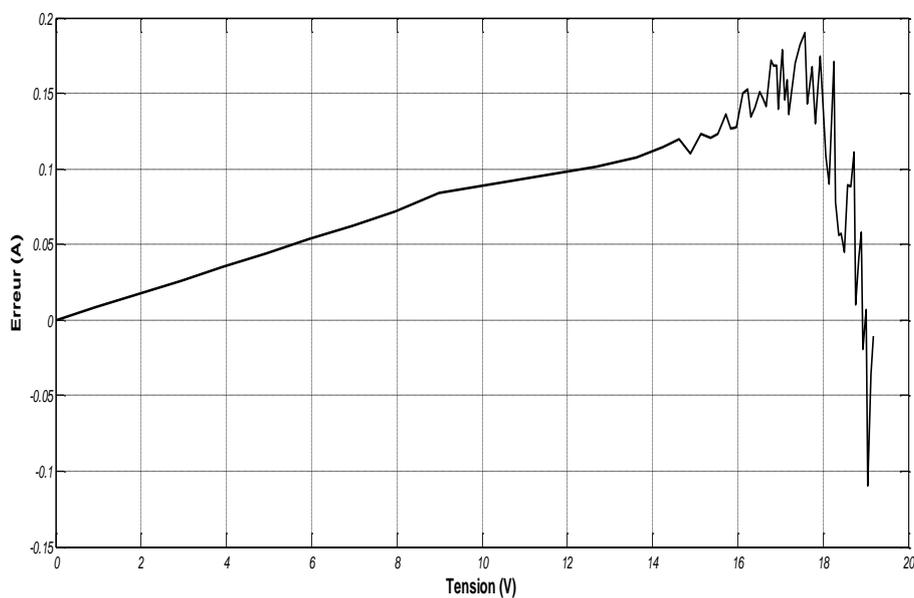


Figure 3.12 L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés avec la méthode analytique à $T=50^{\circ}\text{C}$.

➤ **Résultat Obtenu à $T = 75^{\circ}\text{C}$**

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

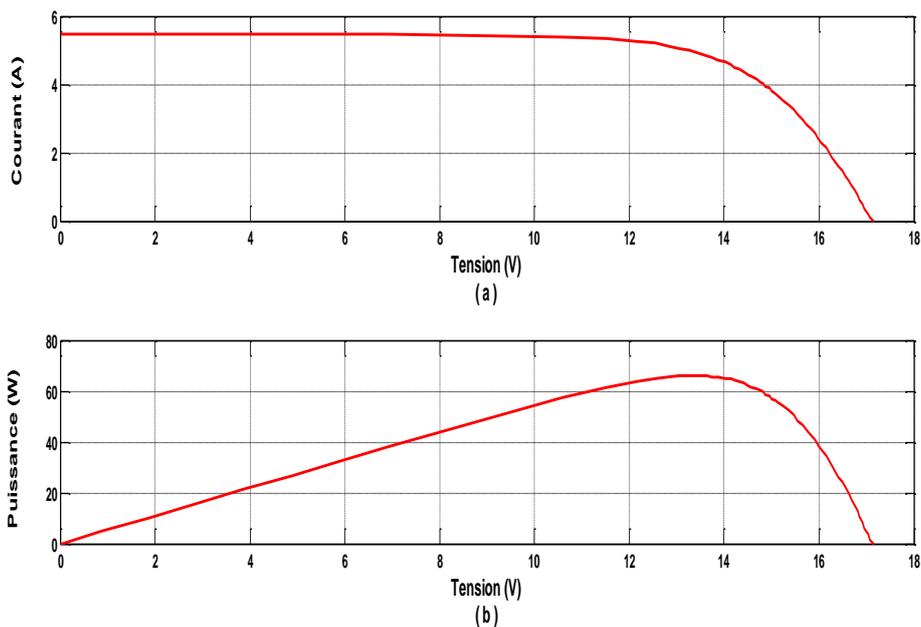


Figure 3.13 Caractéristiques I-V et P-V expérimentale pour $T=75^{\circ}\text{C}$:

(a) courant mesuré (b) puissance mesuré.

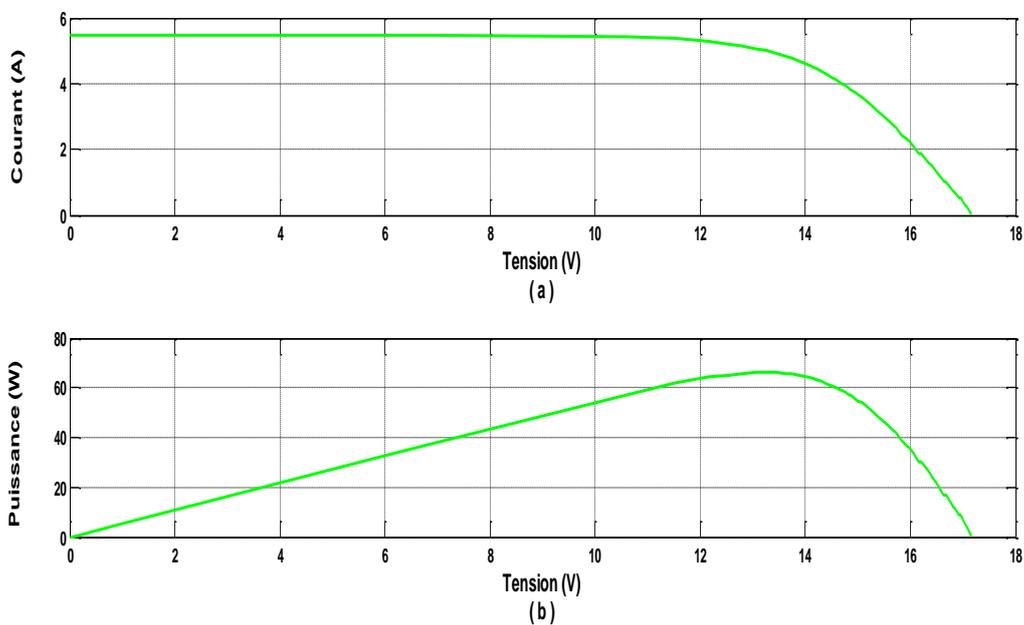


Figure 3.14 Caractéristiques I-V et P-V simulé par la méthode analytique pour $T=75^{\circ}\text{C}$:

(a) courant calculé (b) puissance calculé

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

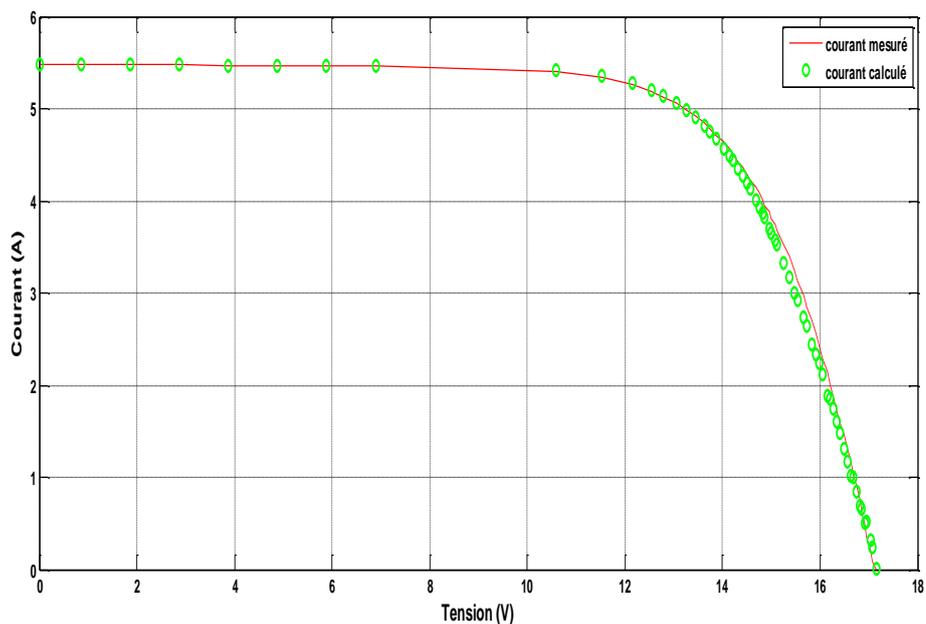


Figure 3.15 Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=75^{\circ}\text{C}$.

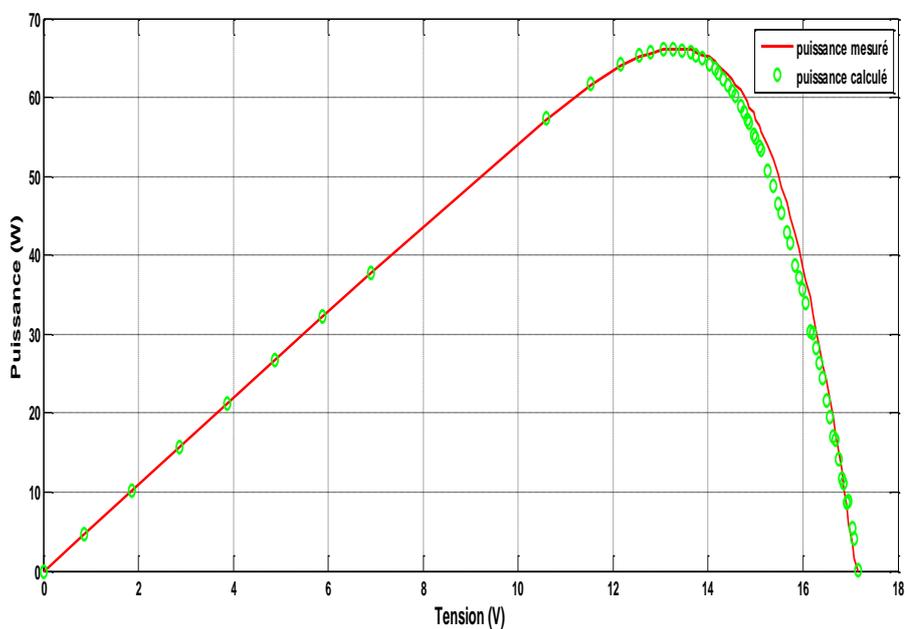


Figure 3.16 Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode analytique pour $T=75^{\circ}\text{C}$.

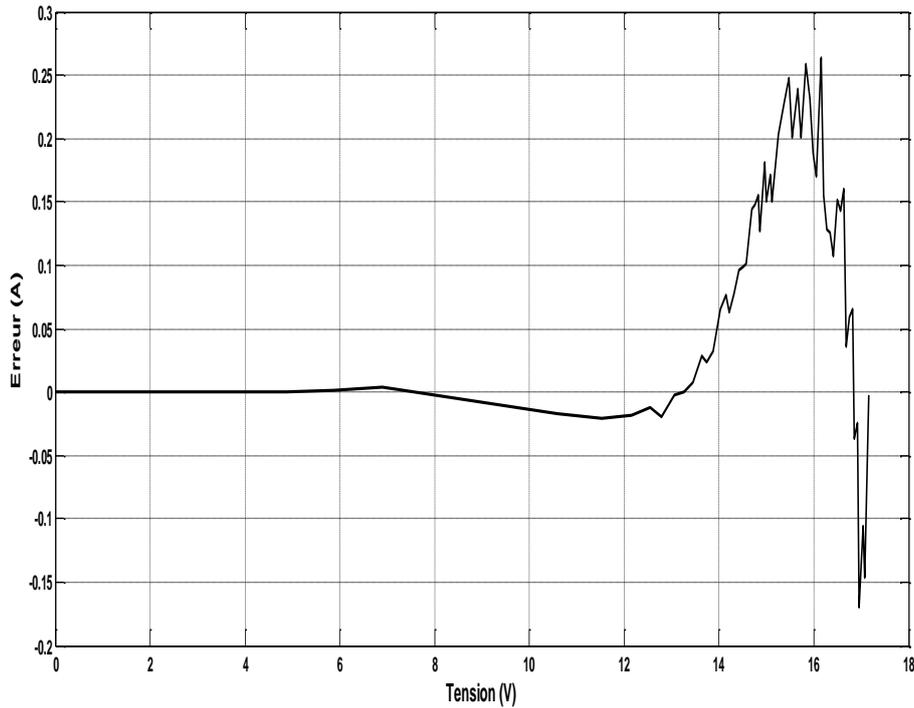


Figure 3.17 L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés avec la méthode analytique à $T=75^{\circ}\text{C}$.

D'après les figures (3.5) et (3.6), (3.10) et (3.11), (3.15) et (3.16), pour $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=75^{\circ}$, respectivement, on remarque que les caractéristiques I-V, P-V calculées se rapproche de celles de l'expérimentales.

On remarque aussi d'après la figure (3.5), (3.10), (3.15) que L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension et une augmentation du courant dans la caractéristique I-V.

Il est à remarquer que cette technique analytique peut donner un ordre de grandeur pour les bornes maximale et minimale de l'espace de recherche de la métaheuristique développée.

3.4.2 Identification des paramètres électriques d'un PV par l'algorithme de colonies de fourmis

Dans cette section, l'objectif recherché est l'amélioration de la précision de l'identification des paramètres de panneau photovoltaïque. Nous mettons en œuvre une métaheuristique,

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

en l'occurrence l'algorithme de colonie de fourmis[41] pour la minimisation de la fonction objectif du modèle de référence.

Le but de l'algorithme de colonie de fourmis est de trouver une solution pour la fonction à minimiser dite fonction objectif, il s'agit d'un algorithme itérative, dont le but est de minimiser l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui calculé à partir du modèle adopté du PV.

Dans cet algorithme, les meilleures solutions sont conservées, évaluées, classées et archivées (figure 3.18). Le poids associé à chaque solution est défini par l'équation suivante :

$$w(l) = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (3.7)$$

Avec

q : facteur d'intensification

k : nombre de fourmis

Ce poids représente la force potentielle de la solution à explorer les zones prometteuses de l'espace de recherche pour trouver de nouvelles meilleures solutions.

Pour générer de nouvelles solutions, une probabilité de sélection est calculée pour chaque solution de l'archive par l'expression suivante:

$$p(l) = \frac{w(l)}{\sum_{r=1}^k w(l)} \quad (3.8)$$

Les meilleures solutions seront issues du processus de la sélection de la roulette wheel. Chaque probabilité $p(l)$ est présentée comme une proportion de la roue (Figure 3.19), et un processus de sélection aléatoire est effectué de la même manière pour faire tourner la roue de roulette. Un nouveau nombre aléatoire $mest$ est utilisé selon la distribution normale caractérisé par la moyenne (μ_i^i) et l'écart type (σ_i^i) pour la fourmi i dans le groupe l .

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

$$(\mu_i^i) = (\sigma_i^i) \tag{3.9}$$

$$\sigma = \xi \sum_{r=1}^k \frac{|s_r^i - s_l^i|}{k-1} \tag{3.10}$$

Avec

ξ : Paramètre constant similaire à la vitesse d'évaporation du phéromone.

Variable Groupe	Les vecteurs paramètres							
1	s_1^1	s_1^2	...	s_1^i	...	s_1^n	$\omega(1)$	$f(1)$
2	s_2^1	s_2^2	...	s_2^i	...	s_2^n	$\omega(2)$	$f(2)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
l	s_l^1	s_l^2	...	s_l^i	...	s_l^n	$\omega(l)$	$f(l)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
k	s_k^1	s_k^2	...	s_k^i	...	s_k^n	$\omega(k)$	$f(k)$

Figure 3.18 Dans un archive de solution triée pour un problème de minimisation, la valeur de la fonction associée aux solutions est $f(1) \ll f(2) \ll \dots f(k)$, donc le poids associé aux solutions est $\omega(1) \gg \omega(2) \gg \dots \omega(k)$. Le poids a indiqué que la meilleure solution devrait avoir le poids le plus élevé.

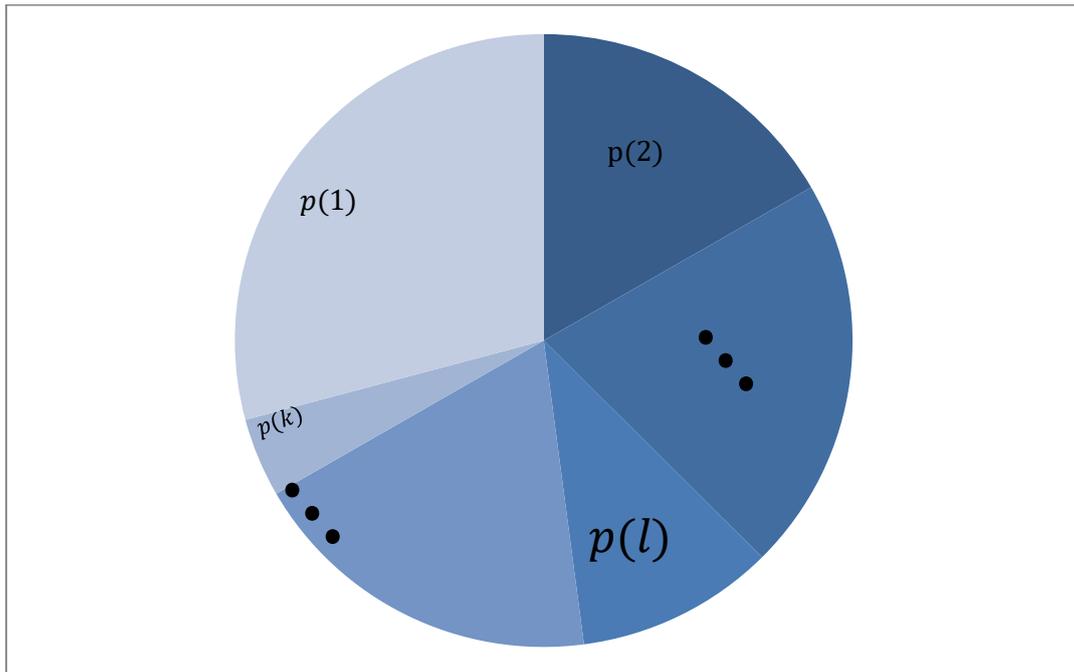


Figure 3.19 Représentation des portions de probabilités de sélection sur la Roulette wheel.

L'organigramme de l'algorithme de colonies de fourmis est illustré par la (3.19) :

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

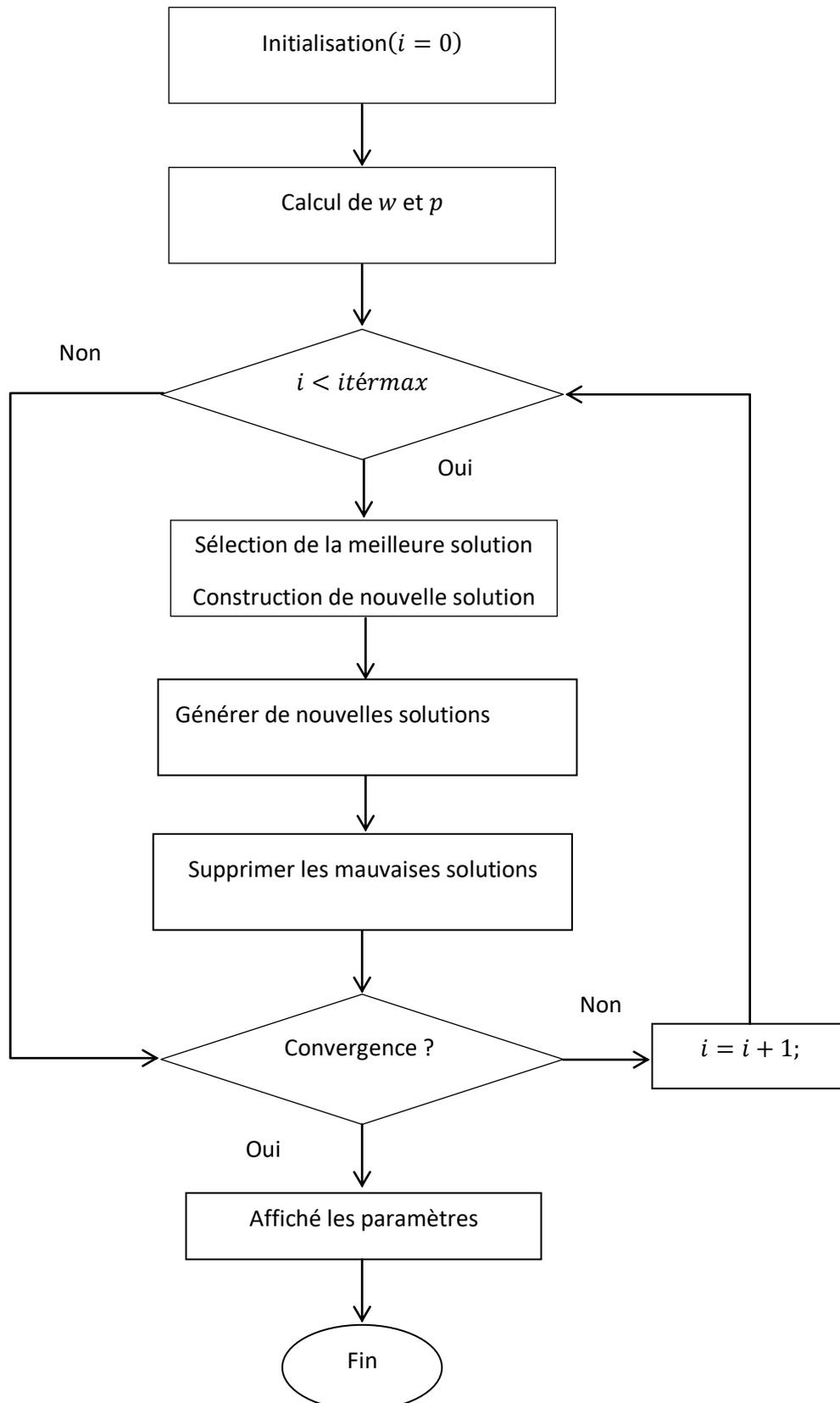


Figure 3.20 Organigramme de l'algorithme de colonie de fourmis.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

a Utilisation de l'algorithme de colonies de fourmis

L'organigramme illustré par la figure (3.19) montre bien que le cycle constitué d'un ensemble d'étape ayant servi de base de l'implémentation de l'algorithme de colonie de fourmis.

Pour atteindre notre objectif, on tire aléatoirement une population de fourmis dans un espace de recherche borné. Dans notre application, chaque fourmi est défini par le vecteur paramètre $X = [I_{ph} I_0 A_1 R_s R_{sh}]$.

Après l'évaluation de la fonction objectif pour chaque fourmi, les solutions dans l'archive sont toujours classées en fonction de leur fonction objectif.

Chaque fourmi possède une probabilité de sélection, proportionnelle au poids calculé.

Le principe de la sélection, consiste à choisir la fourmi ayant la plus basse fonction objectif.

a.1 Sélection proportionnelle (roulette wheel)

Comme montre la figure (3.19), la roue est divisée en autant de portions, ou la taille de ces portions est proportionnelle à l'adaptation de chaque fourmi (la probabilité d'être choisie). La sélection de la roulette est appliquée pour sélectionner la meilleure fourmi. Chaque probabilité est présentée comme une portion de la roue, En faisant tourner la roue, la fourmi pointée à l'arrêt de la roue est sélectionné. La fourmi la mieux adaptés a donc plus chance d'être tirée.

La construction de solution est faite par rapport à la fourmi sélectionner.

Ensuite, m nouvelles solutions sont ajoutés à l'archive de la solution et réorganisés. Les solutions (fourmis) non adaptées sont supprimées et seules les k meilleures sont conservées après chaque itération.

b Résultat obtenus par l'algorithme de colonies de fourmis

Les résultats obtenus pour les trois températures sont donnée dans le tableau suivant :

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

Modèle	Paramètres				
	I_{ph} (A)	I_{01} (A)	A_1	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
$T = 25^\circ\text{C}$	5.3010	$6.1553 * 10^{-8}$	0.6283	0.1806	199.9647
$T = 50^\circ\text{C}$	5.4023	$2.3315 * 10^{-7}$	0.5647	0.1908	161.9958
$T = 75^\circ\text{C}$	5.5130	$9.9390.10^{-7}$	0.5116	0.1977	118.4483

Tableau 3.3 Les paramètres identifiés de panneau PV en utilisant l'algorithme de colonie de fourmis pour les différentes températures.

Les paramètres électriques extraits du tableau 3.3 nous a permis de tracer les caractéristiques I-V à l'aide de l'expression du modèle à une diode. La figure suivante montre la comparaison entre les caractéristiques expérimentales et les caractéristiques simulées en utilisant l'algorithme de colonie de fourmi.

➤ **Résultat Obtenu à $T = 25^\circ\text{C}$**

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

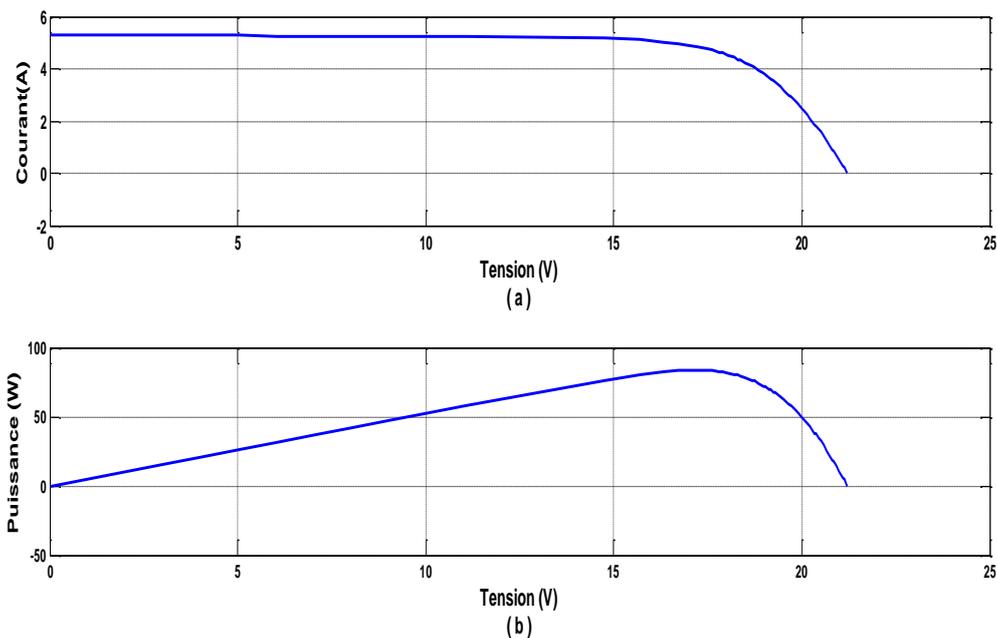


Figure 3.21 Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode de colonie de fourmis pour $T=25^{\circ}\text{C}$:

(a) courant calculé (b) puissance calculé

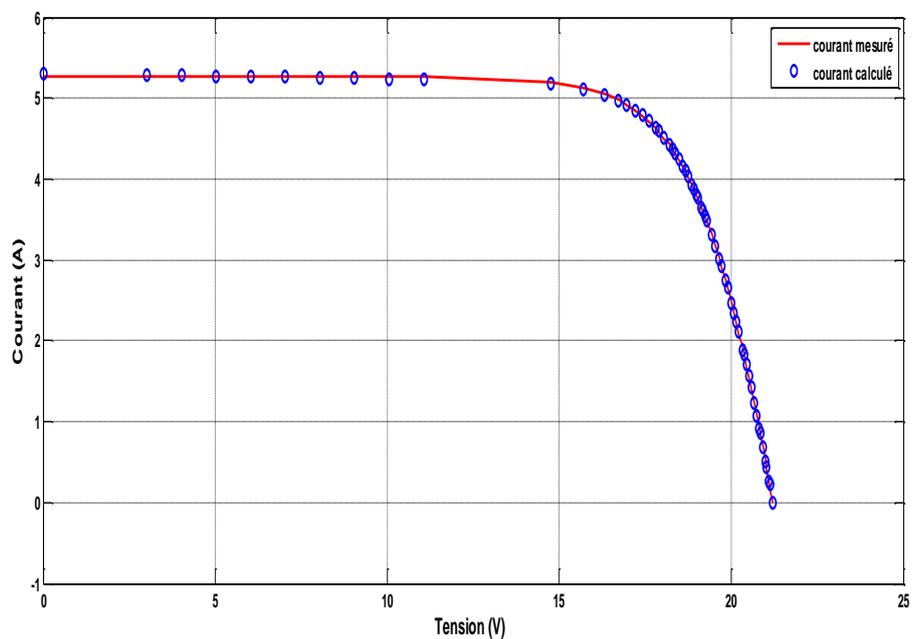


Figure 3.22 Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode de colonie de fourmis pour $T=25^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

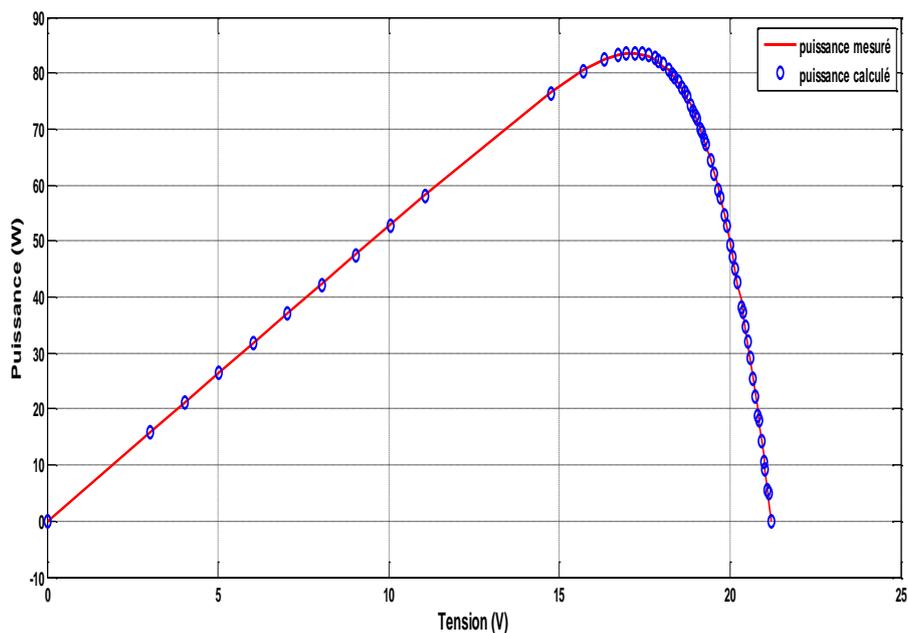


Figure 3.23 Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par la méthode de colonie de fourmi pour $T=25^{\circ}\text{C}$.

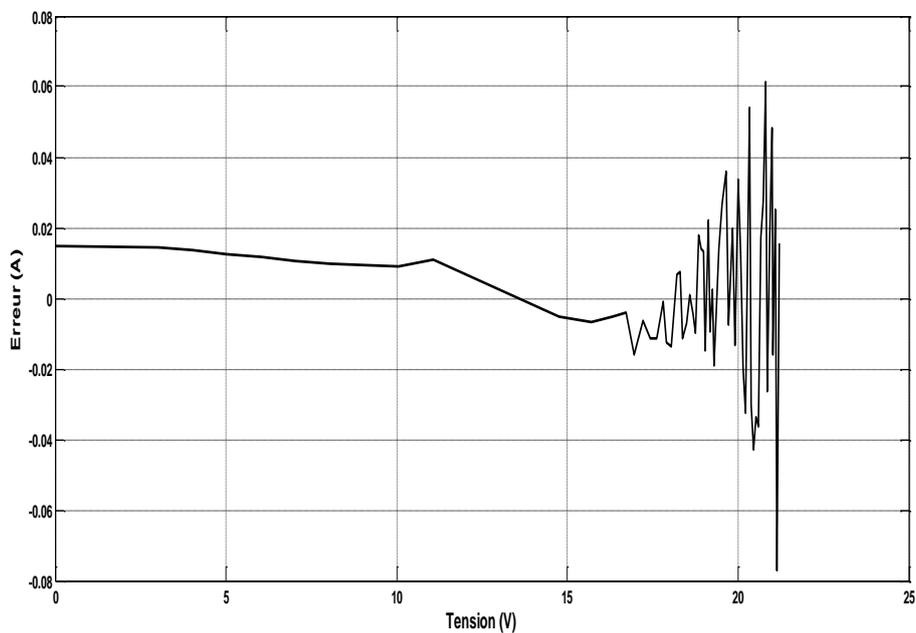


Figure 3.24 L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés avec l'algorithme de colonie de fourmis à $T=25^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

➤ *Résultat Obtenu à $T = 50^{\circ}\text{C}$*

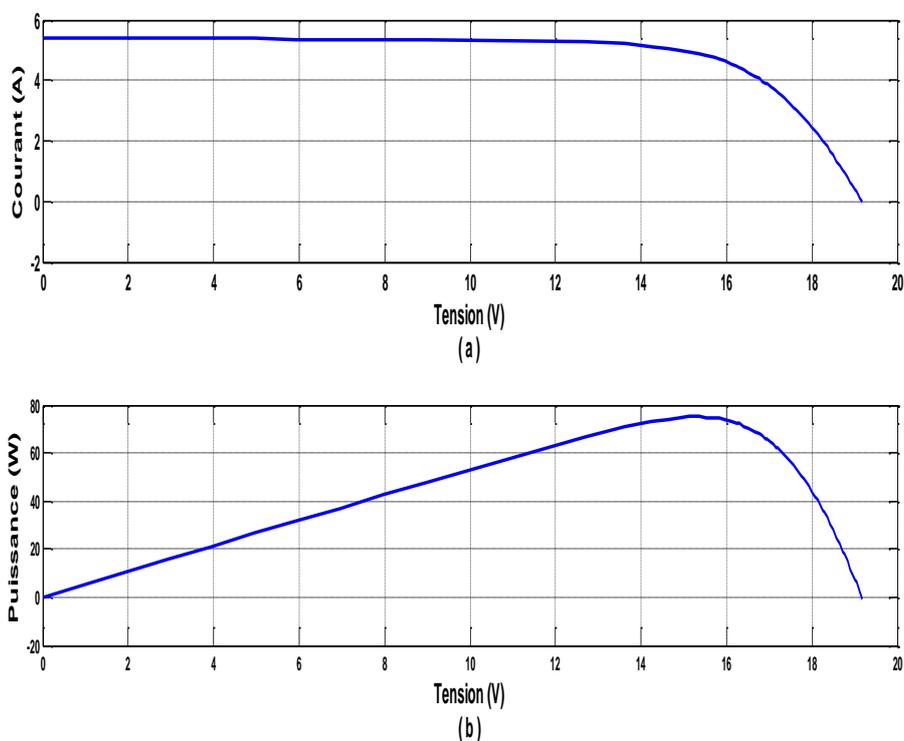
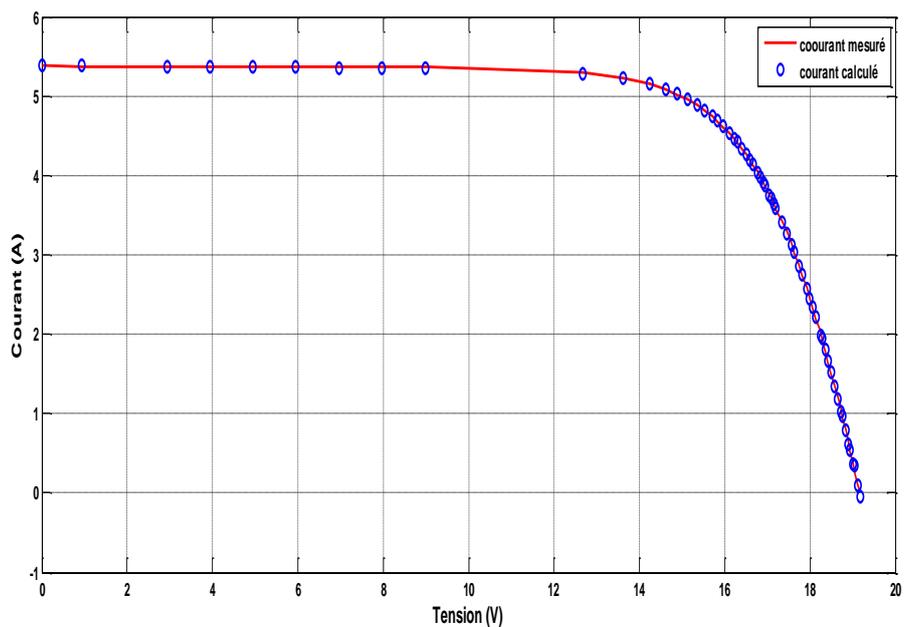


Figure 3.25 Caractéristiques I-V et P-V calculé par la méthode de colonie de fourmis pour $T=50^{\circ}\text{C}$:

(a) courant calculé (b) puissance calculé



ré

Figure 3.26 Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l’algorithme de colonie de fourmis pour $T=50^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

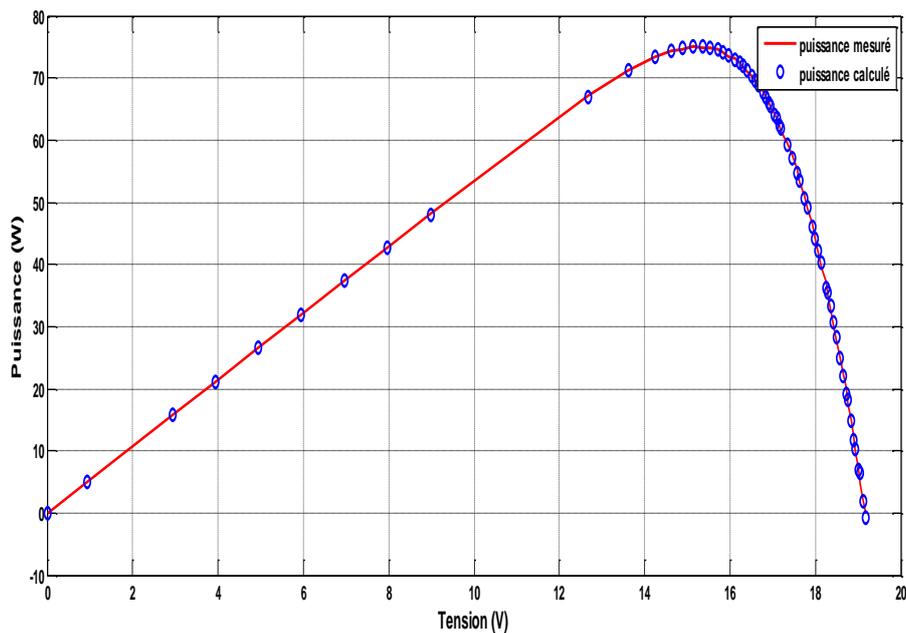


Figure 3.27 Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l'algorithme de colonie de fourmis pour $T=50^{\circ}\text{C}$.

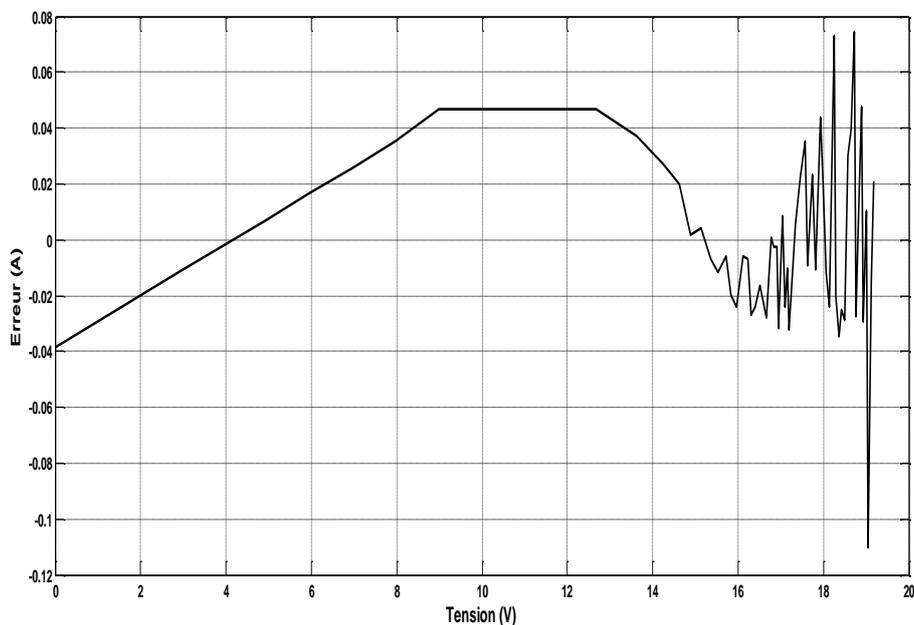


Figure 3.28 L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés avec la méthode analytique à $T=50^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

➤ *Résultat Obtenu à $T = 75^{\circ}\text{C}$*

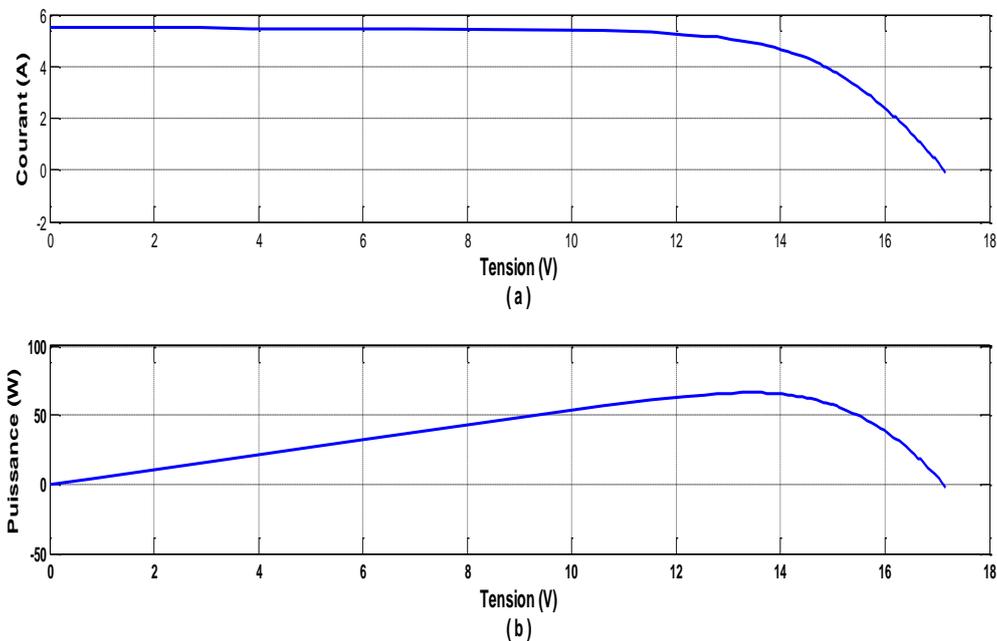


Figure 3.29 Caractéristiques I-V et P-V calculé avec l’algorithme de colonie de fourmis pour $T=75^{\circ}\text{C}$:

(a) courant calculé (b) puissance calculé

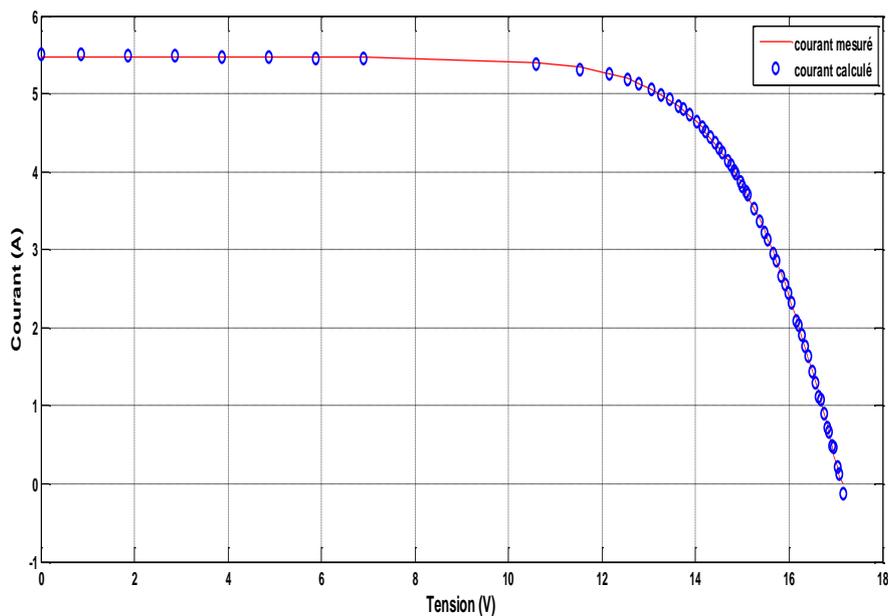


Figure 3.30 Caractéristique I-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l’algorithme de colonie de fourmis pour $T=75^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

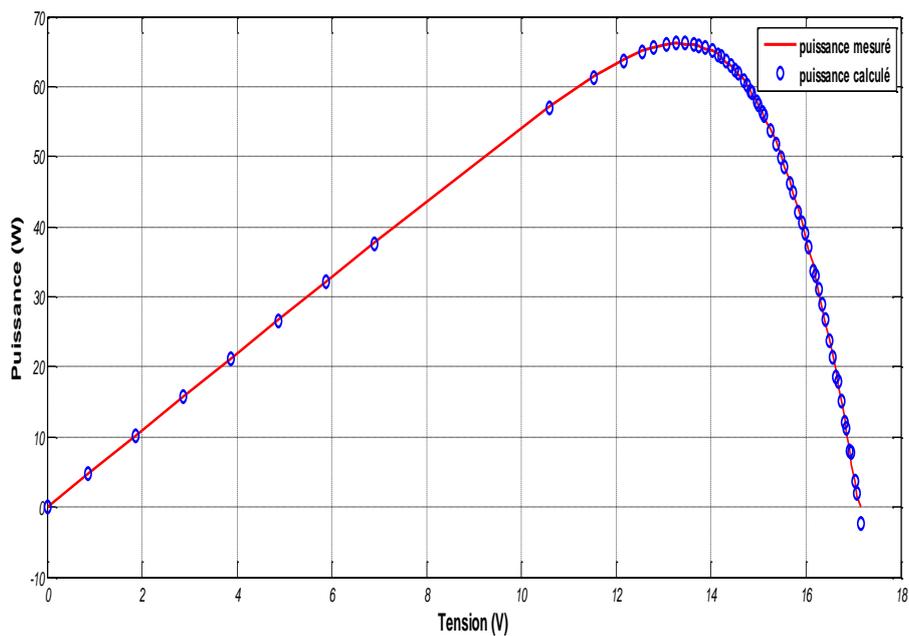


Figure 3.31 Caractéristique P-V expérimentale et simulé avec les paramètres estimés par l'algorithme de colonie de fourmis pour $T=75^{\circ}\text{C}$.

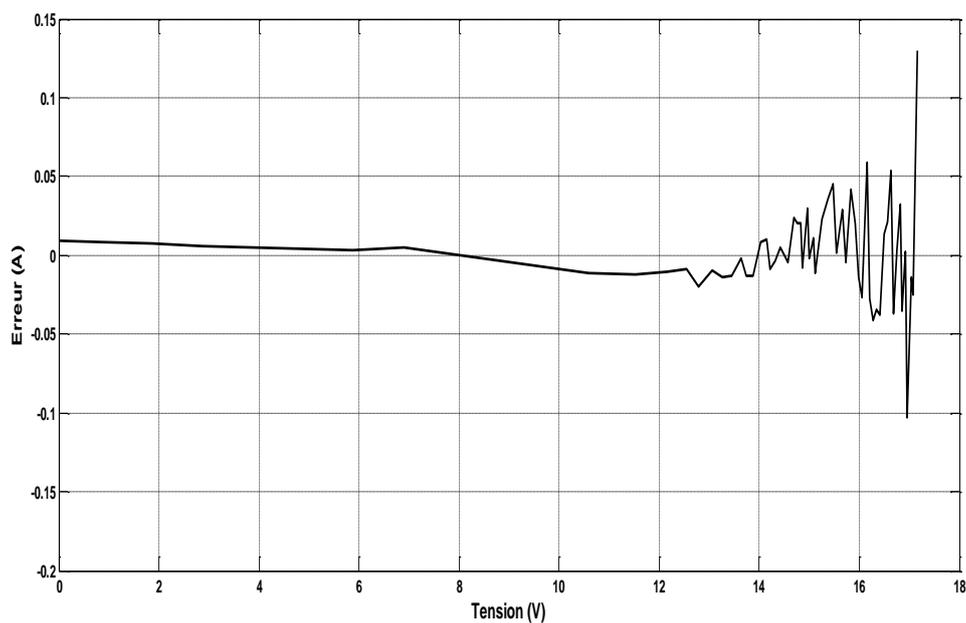


Figure 3.32 L'erreur entre le courant mesuré et le courant calculé avec les paramètres estimés avec l'algorithme de colonie de fourmis à $T=75^{\circ}\text{C}$.

Chapitre 3 Métaheuristiques et Résultats

D'après les figures (3.22) et (3.23), (3.26) et (3.27), (3.30) et (3.31), pour $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=50^{\circ}\text{C}$, $T=75^{\circ}\text{C}$, respectivement, on remarque que les caractéristiques I-V, P-V calculées se coïncident avec celles de l'expérimentales.

3.5 Conclusion

Le but primordial recherché dans ce travail est l'identification optimale des caractéristiques d'un panneau photovoltaïque. Plusieurs méthodes d'identification des paramètres sont proposées.

La méthode analytique est utilisée pour donner une idée sur le vecteur paramètres du panneau. Ce résultat trouvé est associé à la méthode de colonies de fourmis pour déterminer l'espace de recherche.

La superposition des courants mesurés et calculés (I-V) montre l'efficacité de l'algorithme de colonies de fourmis.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'une des problématiques les plus importantes dans le volet de l'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque. Dans la littérature, nous trouvons un nombre impressionnant de publications qui ne cesse d'augmenter, et qui traite ce sujet. Plusieurs méthodes y sont proposées, basés sur de nouvelles idées en proposant l'amélioration des versions précédentes déjà existantes, toutes ces méthodes visent le même but : identifier les paramètres électriques d'un panneau photovoltaïque.

Dans notre travail, la méthode de modèle de référence est utilisée comme méthode d'identification. Le vecteur paramètre est obtenu par minimisation de l'erreur quadratique entre le courant mesuré et le courant calculé. L'algorithme de colonies de fourmis est adopté comme technique de minimisation.

On a identifié un panneau photovoltaïque pour trois températures différentes.

Dans un premier temps, on a utilisé l'identification analytique pour déterminer l'espace de recherche associé à l'algorithme de colonies de fourmis.

Les résultats obtenus par l'identification analytique sont proches.

La superposition des courants mesurés et ceux calculés par ACO montre l'efficacité de l'approche utilisée.

Les perspectives suivantes sont envisagées :

- Une étude comparative basée sur les différents modèles présentés.
- Réalisation d'un banc d'essais.

- [1] A. Méroïan et H. Omar, « «ETUDE COMPARATIVE ENTRE DIFFERENTS MODELES ELECTRIQUES PHOTOVOLTAIQUES».Mémoire de Master en Génie Electrique,Université Larbi Ben M'hidi de Oum Bouaghi,Oum Bouaghi,2012 ».
- [2] N. Oleksiy, « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités.Thèse de doctorat en génie électrique,INSA de Lyon,Lyon,2005. »
- [3] H. Yatimi, E. Aroudam, et M. Louzazni, « « Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK ».MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, pages 1-5, 2014. »
- [4] B. Zouak et M. S. Belkaïd, « « Etude et simulation d'un système de refroidissement ».Revue des Energies Renouvelables, Vol. 22 N°2, pages 171 - 178, 2019. »
- [5] Mohamed El Amine Khaled BENALOUACH, « « Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Energétique de Production Photovoltaïque associé à un Accumulateur ». Mémoire de Magister en physique (Energie renouvelable).Université ABOU-BEKR BELKAÏD de Tlemcen, Tlemcen, 2013. » .
- [6] O. Mehdi, T. Anis, D. M. S. Meridjet, et D. D. Djalel, « « Etude et Caractérisation sous Matlab/Simulink d'un Générateur Photovoltaïque ».Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, pages 1-5, Ghardaïa – Algérie, 2012. »
- [7] A. Labouret et M. Viloz, « *Énergie solaire photovoltaïque* » - 2ème édition, Dunod, Paris, 2005. .
- [8] « Badia, Amrouche.« Contribution au developpement d'une nouvelle methode MPPT basee sur les cooncepts de l'intelligence artificielle pour les systemes photovoltaïques ».Thèse de Doctorat en Communication.Université Saad Dahleb de Blida, Blida, 2013. » .
- [9] D. Jana, H. Samanta, K. Bhattacharya, et H. Saha, « « A Four Stage Battery Charge Controller Working on a Novel Maximum Power Point Tracking Based Algorithm for Solar PV System». International Conference on "21st Century Energy Needs Materials, Systems and Applications, India, 2016. », doi: 10.1109/ICTFCEN.2016.8052702.
- [10] Lasnier, France et Ang, Tony Gan, « « Photovoltaic Engineering Handbook » Institute of Physics Publishing, 1990. » .
- [11] Luis Castañer et Santiago Silvestre, « « Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice ».John Wiley & Sons Ltd., 2002. » .
- [12] Y. Mahmoud, W. Xiao, et H. Zeineldin, « «A Simple Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Modules».IEEE Transactions on Sustainable Energy,vol 3, N° 1, pages 185-186, 2012. », doi: 10.1109/TSTE.2011.2170776.
- [13] T.U. Townsend, « « A Method for Predicting the Long-Term Performance of DirectlyCoupled Photovoltaic Systems».Mémoire de Master en Machine Electrique. Université de Wisconsin-Madison, Madison, 1989. » .
- [14] J. A. Duffie et W. A. Beckman, « « Solar Engineering of Thermal Processes ». 2ème edition, Wiley & Sons, Inc., New York, 1991. »
- [15] K. Ishaque, Z. Salam, et H. Taheri, « « Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules ». Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 95, N°2, pages 586-594, 2011. », doi: 10.1016/j.solmat.2010.09.023.
- [16] F. J. Garcia Sanchez, A. Ortiz-Conde, et J. J. Liou, « « Calculating double-exponential diode model parameters from previously extracted single-exponential model parameters ». Electronics Letters, vol 31, N°1, pages 71-72, 1995. », doi: 10.1049/el:19950030.
- [17] R. KHENFER, « « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques ». Thèse de doctorat en automatique, université Ferhat Abbes Sétif-1, Sétif, 2015. »
- [18] D. S. H. Chan et J. C. H. Phang, « « Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics ».IEEE Transactions on Electron Devices, vol 34, N°2, pages 286-293, 1987. »

- [19] J. A. Kratochvil, W. E. Boyson, et D. L. King, « « Photovoltaic array performance model ». SAND2004-3535. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2004. »
- [20] A. Walter, E., Pronzato, L., « *Identification de modèles paramétriques à partir de données expérimentales* », Ed. Masson 1994. .
- [21] « B. Bounekhla, M., Zaim, M.E., and Rezzoug, A. “Comparative study of three minimization methods applied to the induction machine parameters identification using transient stator current”, Electric Power Components and Syst., vol.33, n°8, pp. 913-930, 2005 ».
- [22] K. Ishaque, Z. Salam, et H. Taheri, « «Accurate MATLAB simulink PV system simulator based on a two-diode model». Journal of Power Electronics, vol 11, N°02, pages 79–87, 2011. » .
- [23] « WH. Press, WT. Vettering, SA. Teukolsky, and BP. Flannery. « Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing » , 2nd Ed, Cambridge University Press, New York, 2002. »
- [24] R. Irkettou, A. M. Taj, C. E. Hadi, A. Abouhilal, et A. Malaoui, « « Nouvelle méthode d’extraction des paramètres électriques d’une cellule solaire ». Revue de l’Entrepreneuriat et de l’Innovation, Vol 1, N°3, pages 1-6, 2017. », Art. n° 3.
- [25] H. Yamina, « « Modélisation et Ordonnancement temps réel d’un Job shop à l’aide des métaheuristiques ».Mémoire de Magister en Automatique,Abou Bakr Belkaid Tlemcen, Tlemcen, 2011. »
- [26] « Kirkpatrick, S., Gellat, C.D., et Vecchi, M.P.« Optimisation by Simulated Annealing ». Science, vol 220, N°4598 pages 671-680, 1983. »
- [27] « Glover.,F., Kochenberger, G.A., . « Critical event tabu search for multidimensionel knapsak problems », I.H.OSMAN, J.P.KELLY, Eds.,Metaheuristic : the Theory and Applications, pages 407-427, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1996. »
- [28] « Holland, J.H., « Adaptation in Natural and Artificial Systems », Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975 ».
- [29] « Kennedy, J., et Eberhart, R.C, « Particle swarm optimization », IEEE International conference on neural networks, perth, Australia, 1995 ».
- [30] A. Colorni, M. Dorigo, et V. Maniezzo, « « Distributed optimization by ant colonies». Proceeding of the first European Conference on Artificial Life (ECAL 91), pages 134-142,1992. »
- [31] M. Dorigo, V. Maniezzo, et A. Colorni, « « Ant system: optimization by a colony of cooperating agents ».IEEE Transactions on Systems, Man Cybernetics–Part B, Vol 26, N°1, pages 29-41, 1996. »
- [32] T. Stützle et H. Hoos, « « MAX-MIN Ant System ».Future Gener. Comput. Syst, Vol 16, N°8, 889-914, 2000. »
- [33] M. Dorigo et L. M. Gambardella, « « Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem ».IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol 1, N°1, pages 53-66, 1997. »
- [34] A. Vlachos, « « Rank-Based Ant Colony Algorithm For A Thermal Generator Maintenance Scheduling Problem ».WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS. », vol. 12, n° 9, p. pages 273-285, 2013.
- [35] G. Bilchev et I. C. Parmee, « « The ant colony metaphor for searching continuous design spaces ». In: Fogarty T.C, Evolutionary Computing, AISB Workshop on Evolutionary Computing, Springer, Berlin, Heidelberg, pages 5-39, Germany, 1995. »
- [36] M. Mathur, S. B. Karale, S. Priye, V. K. Jayaraman, et B. D. Kulkarni, « « Ant Colony Approach to Continuous Function Optimization ».Industrial & Engineering Chemistry Research, vol 39, N°10, pages 3814-3822, 2000. »
- [37] S. H. Pourtakdoust et H. Nobahari, « « An Extension of Ant Colony System to Continuous Optimization Problems ».In: Dorigo.M, Birattari.M, Blum.C, Gambardella.L. M, Mondada.F, and Stutzle.T, Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 294-301, Berlin, Heidelberg , 2004. »

- [38] N. Monmarché, G. Venturini, et M. Slimane, « « On how *Pachycondyla apicalis* ants suggest a new search algorithm ». *Future Generation Computer Systems*, vol 16, N°08, 937–946, 2000. »
- [39] J. Drezo et P. Siarry, « « Continuous interacting ant colony algorithm based on dense heterarchy ». *Future Generation Computer System*, Vol 20, N°05, pages 841-856, 2004. » .
- [40] K. Socha et M. Dorigo, « « Ant colony optimization for continuous domains ». *European Journal of Operational Research*, vol 185, N°3, pages 1155-1173, 2006. » .
- [41] T. K. Nguyen, I.-G. Lee, O. Kwon, Y.-J. Kim, et I.-P. Hong, « Metaheuristic Optimization Techniques for an Electromagnetic Multilayer Radome Design », *J Electromagn Eng Sci*, vol. 19, n° 1, p. 31-36, 2019.