



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

AUTOMATIQUE ET SYSTEME

THEME

Algorithme de chauve-souris pour l'identification d'un Panneau Solaire

Présenté par le binôme :

- BOUGUETOF Imene
- DJELLAB Aziza

Devant le jury :

- | | | |
|--------------------|-----|------------------|
| - OUNNAS Djamel | MCA | Président |
| - THLAIDJIA Tawfik | MCA | Encadreur |
| - YOUSFI Laatra | MCA | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element is positioned at the top left of the calligraphic text, featuring a central flower with several petals and a stem with leaves.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A la mémoire de mon père disparu : Seghaier, jamais je ne t'oublierai ; tu resteras toujours
dans mon cœur (repose en paix mon papa)

A ma chère mère : Cherifa merci à d'être toujours à mes cotés

A mes deux frères : Mahdi, Mansour et Raid avec tous mes sentiments de respects merci
pour tous les sacrifices qui vous avez faits pour moi

A ma sœur : Ouafa merci pour d'être toujours un bon exemple pour moi

A mon bébé d'amour Alyne

A ma belle-sœur Khawla

A tous mes proche amis ma binôme Imene

.

AZIZA

Je dédie ce modeste travail à :

A ma chère mère : Zaara merci d'être toujours mon soutien et ma force

A mes deux frères : Zaid et Ilyes

A ma sœur : Wissal merci pour d'être toujours à mes cotes

IMENE

Remerciements

On remercie tout d'abord « Allah » qui nous a donné la force et la Patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

On remercie aussi, mon Encadreur Mr. THLAIDJIA TAWFIK pour tous ses précieux conseils, pour son écoute active et sa disponibilité.

Nous tenons à remercier aussi Dr. MOHCEN BECHOUAT pour son aide.

Notre remerciement s'adresse à tous les membres de jury Dr. OUNNAS DJAMEL et Dr. YOUSFI LAATRA.

On Remercie également tous les enseignants du département de génie électrique.

Notre collègue et tous les étudiants de promotion.

En fin on remercie tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à Réaliser ce travail.

Résumé

Dans ce mémoire nous avons présenté une approche basée sur l'algorithme d'optimisation chauve-souris (BAT) pour l'identification et l'optimisation des cinq paramètres d'un modèle basé sur une diode d'une cellule photovoltaïque. La fonction objective de ce problème représente la somme des erreurs quadratiques moyennes fournies par la distance entre les mesures réelles du courant et les valeurs des courants prédits par le modèle souhaité.

Les résultats obtenus sont comparés avec celles obtenus en utilisant les deux algorithmes PSO et DE. Pour étudier l'influence des paramètres de chaque algorithme sur les performances de modélisation plusieurs tests ont été effectués. Les résultats obtenus montrent que les performances de modélisation sont très dépendues de bon choix des paramètres de chaque algorithme.

Les résultats obtenus montrent que l'approche proposée basée sur l'optimisation des cinq paramètres par l'algorithme chauve-souris (BAT) offre des bonnes performances.

Mots clés : Systèmes photovoltaïques PV, Circuit électrique d'une seule diode, Algorithmes chauve-souris ; Algorithme d'évolution différentielle (DE), L'algorithme l'Essaim Particulaire (PSO), Méthode de Newton Raphson.

Abstract

In this work we have presented an approach based on the bat optimization algorithm (BAT) for the identification and optimization of the five parameters of a diode-based model of a photovoltaic cell. The objective function of this problem is based on the mean square errors provided by the distance between the real and estimated current.

The results obtained are compared with those obtained using the two algorithms viz : PSO and DE. To study the influence of the choice of each algorithm parameters on the modelling performance, several tests were carried out. The results obtained show that the modelling performances are highly dependent on the correct choice of the parameters of each algorithm.

The obtained results show that the proposed approach based on BAT algorithm for optimization the five parameters offer good performance compared to other methods.

Keywords: Photovoltaic system, Electrical circuit based on a single Diode, BAT algorithm; differential evolution algorithm, Particle swarm optimisation, Newton Raphson method.

ملخص

في هذا البحث، قدمنا نهجاً لنمذجة الخلايا الكهروضوئية باستخدام خوارزمية الخفافيش. تم تطبيق هذا النهج لتحسين وتحديد الخمسة معاملات المتعلقة بنموذج الخلايا الكهروضوئية التي تعتمد على التشابك الداخلي للخلية.

تعتمد وظيفة الهدف في هذه المشكلة على مجموع المربعات المتوسطة للأخطاء التي تنشأ من الفروق بين القيم الفعلية للتيار والقيم المتوقعة للتيارات بواسطة النموذج المطلوب تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام هذا النهج مع النتائج المحصلة باستخدام خوارزميتان مختلفتان تم إجراء عدة اختبارات لدراسة تأثير المعاملات في كل خوارزمية على أداء النمذجة. أظهرت النتائج المحصلة ان أداء النمذجة يعتمد بشكل كبير على اختيار جيد للمعاملات في كل خوارزمية

توضح النتائج المحصلة أن النهج المقترح الذي يعتمد على تحسين، الخمسة معاملات باستخدام خوارزمية الخفافيش يقدم أداء جيداً. الكلمات المفتاحية: الضوئية، الدائرة الكهربائية القائمة على احادي او ثنائي الصمام الثنائي الخوارزمية الجينية خوارزمية سرب الجسيمات

Table des Matières

Dédicaces	ii
Remerciements	iv
Résumé	v
ABSTRACT	v
ملخص.....	v
Table des Matières	vi
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xii
Introduction Générale	1
Chapitre 1 Généralité sur le système photovoltaïque	3
I.Introduction :.....	3
I.1.L'énergie solaire :.....	3
I.2.Le pouvoir énergétique du soleil :.....	4
I.3.Le pouvoir énergétique du soleil :.....	5
I.3.1.Rayonnement direct :.....	5
I.3.2.Rayonnement diffus :	5
I.3.3.Rayonnement réfléchi ou albédo du sol :	6
I.3.4.Rayonnement global :	6
I.4.L'énergie solaire photovoltaïque :	6
I.4.1.L'effet photovoltaïque :.....	7
I.4.2.Cellule photovoltaïque :	8

I.4.2.1.Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :	8
I.4.2.2.Les différents types de panneaux photovoltaïques :	9
I.4.2.2.1.Les panneaux PV avec des cellules monocristallines :	9
I.4.2.2.2.Les panneaux PV avec des cellules polycristallines :	10
I.4.2.2.3.Les panneaux PV avec des Cellules amorphes :	11
I.4.2.3.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :	12
I.4.2.3.1.Circuit électrique idéal :	12
I.4.2.3.2.Circuit électrique réel :	13
I.4.2.4.Paramètres des cellules photovoltaïques :	14
I.4.2.4.1.Le courant de court-circuit I_{cc} :	14
I.4.2.4.2.La tension de circuit ouvert V_{co} :	14
I.4.2.4.3.La puissance :	14
I.4.2.4.4.Le facteur de forme :	15
I.4.2.4.5.Rendement des cellules :	15
I.5.Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :	16
I.5.1.Association des cellules photovoltaïques en série :	16
I.5.2.Association des cellules photovoltaïques en parallèle:	17
I.5.3.Association des cellules photovoltaïques mixte (série et parallèle) :	18
I.6.Classification des systèmes photovoltaïques :	18
I.6.1.Système isolé ou autonome :	19
I.6.2.Système raccordé au réseau :	19
I.7.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	20
I.7.1.Avantages du photovoltaïque :	20
I.7.2.Inconvénients du photovoltaïque :	20
I.8.Conclusion :	21

Chapitre 2	Modèle PV à une seule diode et double diode.....	22
II.	Introduction :	22
II.1.	Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque avec modèle à une diode :	23
II.1.1.	Présentation de ce modelé :	23
II.1.2.	Différents modèle PV modélisant la cellule PV :	26
II.1.2.1.	Modèle mathématique à quatre paramètres inconnus :	26
II.1.2.2.	Modèle mathématique à trois paramètres inconnus :	26
II.1.3.	Comment calculer le courant I_{pv} prédit :	27
II.1.3.2.	La méthode de <i>fsolve</i> :	27
II.1.3.2.	Méthode de Newton-Raphson :	28
II.1.3.3.	Fonction de Lambert-W :	29
II.2.	Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque avec modèle à double diode :	
	31	
II.2.1.	Présentation du modèle à double diode :	31
II.2.2.	Différents modèle PV modélisant la cellule PV :	33
II.2.2.1.	Modèle mathématique comportant cinq paramètres inconnus :	33
II.2.2.2.	Modèle mathématique comportant quatre paramètres inconnus :	33
II.2.3.	Comment Calculer le courant I_{pv} prédit par le modèle PV à double diode :	34
II.2.3.1.	La méthode basée sur la fonction <i>fsolve</i> :	34
II.2.3.2.	La Méthode de Newton-Raphson :	34
II.2.3.3.	La méthode de <i>Lambert-W</i> :	35
II.3.	Conclusion :	38
Chapitre 3	Identification des paramètres du modèle PV	39
III.	Introduction :	39
III.1.	L'identification :	39

III.2.Les Méta-heuristiques :	40
III.4.L’algorithme de chauve-souris :	41
III.4.1.Echolocation des chauves-souris :	42
III.4.2.Algorithme de chauve-souris :	43
III.4.2.1.Initialisation de l'Algorithme :	43
III.4.2.2.Solution, fréquence et vitesse :	43
III.4.2.3.Génération de la population initiale :	44
III.4.2.4.Fonction d’évaluation :	44
III.4.2.5.L’algorithme standard de chauve-souris :	45
III.4.3.Résultat de La simulation en utilisant l’algorithme BAT :	45
III.5.L’algorithme d’Essaim de Particulaire (PSO) :	50
III.5.1.Définition :	50
III.5.2.Mode de fonctionnement :	51
III.5.3.L’algorithme standard de l’Essaim Particulaire (PSO) :	52
III.5.4.Résultat de La simulation en utilisant l’algorithme PSO :	52
III.6.L’algorithme de L’évolution différentielle (DE) :	56
III.6.1.Définition :	56
III.6.2.Mutation :	57
III.6.3.Croisement :	57
III.6.4.Sélection :	57
III.6.5.L’algorithme standard de L’évolution différentielle :	58
III.6.6.Résultat de La simulation en utilisant l’algorithme DE :	58
III.7.La deuxième application :	62
III.7.1.Résultat de La simulation en utilisant l’algorithme BAT :	63
III.7.2.Résultat de La simulation en utilisant l’algorithme PSO :	65

III.7.3.Résultat de La simulation en utilisant l’algorithme DE :.....	68
III.8.Conclusion :	72
Conclusion Générale	73
References Bibliographies	74

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil.....	3
Tableau (I.2). Différents types des cellules avec leur rendement.....	15
Tableau 2-1 : Les données pour la modélisation de la cellule PV.....	25
Tableau (III.1). Caractéristiques électriques typiques du panneau PV	41
Tableau (III.2). Les paramètres d’algorithme BAT pour le premier.....	46
Tableau (III.3). Les paramètres d’algorithme BAT pour le deuxième cas.	47
Tableau (III.4). Les paramètres d’algorithme BAT pour le troisième cas.	48
Tableau (III.5). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres pour les trois cas.	49
Tableau (III.6). Les paramètres d’algorithme de PSO pour le premier cas.	52
Tableau (III.7). Les paramètres d’algorithme PSO pour le deuxième cas.	53
Tableau (III.8). Les paramètres d’algorithme PSO pour le troisième cas.....	54
Tableau (III.9). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres pour les trois cas.	55
Tableau (III.10). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres pour les trois cas.	62
Tableau (III.11). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres des trois algorithmes	62
Tableau (III.12). Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.	62
Tableau (III.13). Les meilleurs paramètres d’algorithme de chauves-souris.....	63
Tableau (III.14). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres obtenus et MSE obtenu s par l’algorithme BAT.....	65
Tableau (III.15). Les paramètres d’algorithme de PSO.	65
Tableau (III.16). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres de l’algorithme PSO.....	68
Tableau (III.17). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres de l’algorithme DE.....	71

Liste des figures

Figure (I.1) : Coupe schématique du soleil.....	4
Figure (I.2) : Composants du rayonnement solaire.	6
Figure (I.3) : Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N).	7
Figure (I.4) . Schéma explicatif d'une cellule solaire	8
Figure (I.5) . Cellule photovoltaïque monocristalline.....	9
Figure (I.6) . Cellule photovoltaïque polycristalline.....	10
Figure (I.7) . Cellule photovoltaïque amorphe.	11
Figure (I.8) : schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque.....	12
Figure (I.9) : Modèle de la cellule photovoltaïque réel.	13
Figure (I.11) : caractéristique $I=f(v)$. Figure (I.12) : caractéristique $P=f(v)$	15
Figure (I.13) . Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série.....	17
Figure (I.14) . Caractéristique résultant d'un regroupement de N_p cellules en parallèle.....	18
Figure (I.15) . Caractéristique regroupement mixte (série et parallèle).....	18
Figure (I.16) . Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome.....	19
Figure (I.17) . Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.....	20
Figure (II.1) . Circuit électrique équivalent du modélisant une cellule photovoltaïque avec une diode.	23
Figure (II.2) . Circuit électrique équivalent du modélisant une cellule photovoltaïque avec double diode.....	31
Figure (III.1) . Principe de 'identification par les algorithmes méta-heuristique.....	43
Figure (III.2) . Exemple d'écholocation	46
Figure.III.3 . Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (cas1).	47

Figure III.4. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).....47

Figure III.5. Caractéristiques I-V du system PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).48

Figure III.6. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).....48

Figure III.7. Caractéristiques I-V du system PV réel et celle du modèle mathématique à un diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**)49

Figure III.8. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à un diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).50

Figure III.9. Structure de PSO.....53

Figure III.10. Caractéristiques I-V du system PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).53

Figure III.11. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).....54

Figure III.12. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).....54

Figure III.13. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).....55

Figure III.14. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).....55

Figure III.15. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).....59

Figure III.16. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).....59

Figure III.17. Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).60
.....60

Figure III.18. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à un diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).....61

Figure III.19. Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus (**cas 2**).
.....61

Figure III.20. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (cas 3).....	62
Figure III.21. Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus cas3	62
Figure (III.22). Banc d'essai.....	63
Figure (III.23). Erreur d'estimation.....	63
Figure (III.24). Courant réel et courant estimé par le modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus basée sur l'algorithme BAT.	64
Figure (III.25). Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus.....	64
Figure (III.26). Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus.....	65
Figure (III.27). Erreur d'estimation obtenue par PSO.....	66
Figure (III.28). Courant réel et courant estimé par le modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus en se basant sur l'algorithme PSO.	67
Figure (III.29). Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à un diode comportant cinq paramètres inconnus.....	67
Figure (III.30). Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à double diode comportant cinq paramètres inconnus.....	68
Figure (III.31). Erreur d'estimation obtenue par DE.....	69
Figure (III.32). Courant réel et courant estimé par le modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus en se basant sur l'algorithme DE.	69
Figure (III.33). Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus.....	70
Figure (III.34). Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus.	70

Introduction Générale

Dans le monde, la production d'énergie électrique est faite principalement à base d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, trouver une solution économique et peu polluante pour la production d'énergie est devenu primordial, à ce sujet, les énergies renouvelables qui sont des énergies illimitées contrairement aux énergies fossiles. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Parmi les énergies, il existe une source importante d'énergie renouvelable, c'est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire dans une centrale solaire photovoltaïque, qui alimente un réseau de distribution électrique. La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un semi- comportement fortement non-linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. On présentera deux modèles de la cellule PV utilisés dans la pratique : le modèle à une diode unique et le modèle à deux diodes.

Ces paramètres sont : le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série et parallèle et le facteur d'idéalité de la diode. Des méthodes et des techniques d'étude et d'extraction de ses différents paramètres ont été développées auparavant [1].

Ce travail sera porté sur l'application d'une méthode basée sur le modèle à une seule diode, capable d'extraire les cinq paramètres électriques. La méthode d'optimisation proposée est basée sur un algorithme d'optimisation méta heuristiques nommé l'algorithme chauve-souris. Cet algorithme sera utilisé pour identifier et d'optimiser les cinq paramètres de modèle à une diode.

Ce mémoire sera organisé en trois chapitres :

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 abordés, tout en focalisant sur leur modélisation.

Dans le deuxième chapitre nous nous concentrerons sur la présentation des Modèles basée sur une seule diode et double diode.

Le troisième chapitre consiste à la description de les méthode trois méthode d'intelligence artificielles à savoir : BAT (chauve-souris), PSO (particule swarm optimisation) et DE (évolution différentielle). Ensuite, ces méthodes seront appliquées pour l'estimation des cinq paramètres du modèle utilisé. Les résultats de simulation seront finalement analysés et discutés.

Chapitre 1

Généralité sur le système photovoltaïque

I. Introduction :

Le processus de production d'électricité en convertissant le rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque est connu sous le nom d'énergie solaire photovoltaïque. Un panneau solaire photovoltaïque est créé en connectant plusieurs cellules ensemble. Un champ photovoltaïque est composé de plusieurs modules qui sont combinés dans une centrale solaire photovoltaïque. Le terme "photovoltaïque" peut désigner à la fois un phénomène physique et une technologie associée qui produit l'effet photovoltaïque.[2]

I.1. L'énergie solaire :

Lorsque l'on considère les origines de l'univers, le soleil peut être classé comme n'importe quelle étoile qui partage des propriétés physiques ou un emplacement avec les innombrables autres étoiles qui composent la galaxie de la Voie lactée. Cependant, à un niveau plus personnel, cette étoile particulière revêt une grande importance car elle est essentielle à l'existence de la vie sur Terre. Vous trouverez ci-dessous un tableau affichant certains des principaux attributs du soleil.[3]

Caractéristique	Valeur
Mass	$1,989 \times 10^{30}$ Kg
Diamètre	$1,392 \times 10^9$ m
Masse volumique moyenne	$1410 \text{ Kg}/m^3$
Puissance rayonnée	$3,83 \times 10^{26}$ W
Température superficielle	5770 K

Tableau (I.1) : Caractéristiques principales du soleil.

La structure du soleil est illustrée sur la figure (I.1), qui met en évidence quatre zones distinctes le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [3].

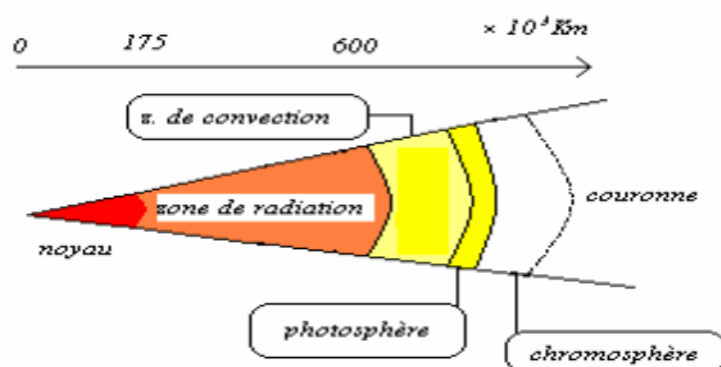


Figure (I.1) : Coupe schématique du soleil.

- Le noyau du soleil, qui est sa région centrale, est la source de son énergie. Le noyau bénéficie d'une température incroyablement élevée, atteignant ($15 \times 10^6 K$) ainsi que d'une haute pression, mesurant ($2 \times 10^{11} bars$), et d'une densité de ($\sim 10^5 Kg.m^{-3}$). Fait intéressant, la densité diminue à mesure que l'on s'éloigne du noyau vers les régions extérieures du soleil.
- La couche de photosphère du soleil a une épaisseur d'environ 300 km et une température de 5770 K. Sa fonction principale est d'offrir une image visible du soleil.
- La chromosphère est la couche la plus externe de l'atmosphère solaire. Son épaisseur mesure environ 8 000 kilomètres et il maintient une température d'environ 20 000 K.
- La couronne est une expansion de la photosphère et est constituée de gaz ionisé dispersé de manière lâche. Sa frontière n'est pas bien définie et son éclat se confond avec l'éclat du ciel bleu, le rendant invisible de la surface de la terre. Ce n'est que lors d'une éclipse solaire qu'il est possible d'observer la Couronne. Comme il fait plus d'un million de degrés, il fait extrêmement chaud [3].

I.2. Le pouvoir énergétique du soleil :

La source de toute vie sur Terre est sans aucun doute le soleil, qui fournit en permanence de l'énergie pour maintenir la vie en plein essor (comme le montre le tableau I.1). Cette énergie est impressionnante et voyage à travers l'espace sous forme de rayonnement électromagnétique, nous fournissant de la lumière, de la chaleur et les moyens de croissance des plantes...

La production d'énergie solaire résulte de la fusion thermonucléaire de l'hydrogène au cœur du soleil. Ce processus de fusion crée un déficit de masse, représenté par Δm , qui se transforme en énergie, représentée par ΔE . La transformation de la masse en énergie est régie par la relation bien connue établie par Einstein, qui est représentée par l'équation $\Delta E = \Delta m \times C^2$. Ici, la vitesse de la lumière dans le vide est représentée par la lettre C et est égale à $C = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$ [3].

Les experts en énergies renouvelables s'accordent à dire que l'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus abondante et la plus importante. Il convient de noter que la quantité d'énergie solaire reçue par la terre est environ 15 000 fois supérieure à la consommation énergétique mondiale actuelle. L'énergie solaire est utilisée de deux manières principales :

- Premièrement pour produire de la chaleur (énergie solaire thermique).
- Deuxièmement pour produire de l'électricité (solaire photovoltaïque).

I.3. Le pouvoir énergétique du soleil :

La propagation des ondes de longueurs variables allant de 0.2 à $4 \times 10^{-6} \text{ m}$ comprend le rayonnement solaire. La majorité de son intensité est perdue avant qu'elle n'atteigne le sol. Le rayonnement solaire est classé en différents types, notamment [4] :

I.3.1. Rayonnement direct :

Le rayonnement qui n'est pas diffusé par l'atmosphère est appelé rayonnement direct. Ce type de rayonnement est directement reçu du soleil et se compose généralement de rayons parallèles. Un pyromètre est un outil de mesure utilisé pour quantifier la quantité de rayonnement direct [5].

I.3.2. Rayonnement diffus :

Le terme "rayonnement diffus" définit la lumière diffusée par l'atmosphère, y compris l'air, les nuages et les aérosols. Ce processus de diffusion amène la lumière à se disperser et à rayonner dans plusieurs directions, ce qui entraîne la division d'un seul faisceau en plusieurs faisceaux qui se déplacent dans différentes directions.

La production d'un coup de soleil dans le ciel est généralement causée par des molécules d'air, des gouttelettes d'eau (également appelées nuages) et de la poussière. Cet événement dépend fortement de diverses conditions météorologiques.

I.3.3. Rayonnement réfléchi ou albédo du sol :

L'albédo du sol fait référence au rayonnement réfléchi par le sol ou tout objet présent à sa surface. Ce rayonnement peut être important lorsque la surface est fortement réfléchissante, comme dans le cas de la neige ou de l'eau.

I.3.4. Rayonnement global :

La mesure du rayonnement global inclut tous les rayonnements reçus, tels que ceux qui sont réfléchis par la surface de la Terre et les objets situés au-dessus. La mesure du rayonnement global peut être effectuée à l'aide d'un pyromètre ou d'un "compteur Solari" sans écran. Cette mesure est définie par l'expression suivante :

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

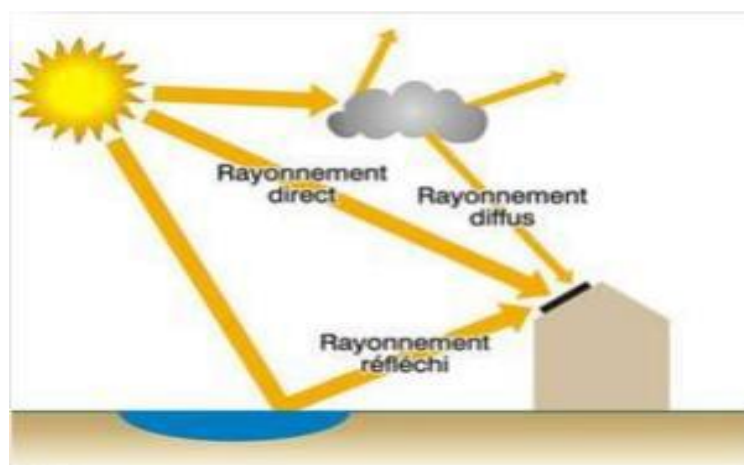


Figure (I.2) : Composants du rayonnement solaire [4].

I.4. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque repose sur l'effet photoélectrique pour générer un flux continu d'électricité à partir du rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement peut provenir soit d'une source naturelle, comme le soleil, soit d'une source artificielle, comme une ampoule. Les cellules photovoltaïques, qui sont des appareils électroniques, sont chargées de capter et de convertir cette énergie en électricité lorsqu'elles sont exposées à la lumière. Ces cellules peuvent être interconnectées pour former soit un module solaire photovoltaïque, soit un panneau photovoltaïque. Dans le cas d'un système photovoltaïque connecté à un réseau électrique, il comprend typiquement

plusieurs panneaux photovoltaïques, le nombre exact allant d'un minimum de dix à éventuellement des milliers [5].

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque, plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire. Cette installation produit de l'électricité qui peut être consommée sur place ou alimenter un réseau de distribution [6] :

I.4.1.L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque se produit lorsque des photons sont absorbés dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), appelé jonction (p-n) ou (n-p). Du fait de ce dopage, un champ électrique devient permanent dans le matériau (Parce qu'un aimant a un champ magnétique permanent). Lorsqu'un photon incident (particule lumineuse) interagit avec un électron d'un matériau, il donne de l'énergie ($h\nu$) à l'électron, qui se retrouve libéré de la bande de valence et subit ainsi un champ électrique intrinsèque. Sous l'action de ce champ, les électrons migrent vers le haut vers la surface, laissant place à des trous qui migrent en sens inverse. Les électrodes placées sur les surfaces supérieure et inférieure peuvent collecter des électrons, obligeant les électrons à effectuer un travail pour atteindre le trou avant, générant ainsi un courant électrique.[7]

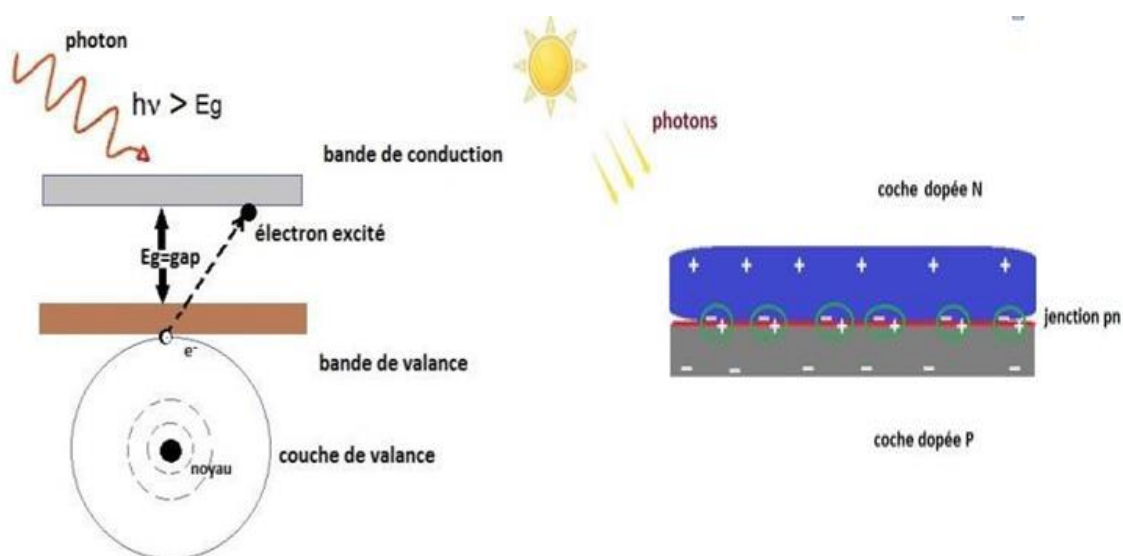


Figure (I.3) : Excitation des électrons de valence par les photons et la jonction (P-N) [8].

I.4.2. Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque, également connue sous le nom de cellule PV, est le composant fondamental d'un système photovoltaïque. Il est construit à partir de matériaux semi-conducteurs et est responsable de la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Dans cette section, nous donnerons un bref aperçu du fonctionnement du phénomène photovoltaïque [5].

I.4.2.1. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires fonctionnent grâce à l'utilisation des propriétés électroniques du silicium, qui changent lorsque des atomes étrangers, ou des impuretés, sont substitués dans son réseau cristallin. Ce comportement est communément appelé "dopage". Essentiellement, il existe deux types de matériaux impliqués dans ce processus : lorsque les atomes d'impuretés contiennent plus d'électrons que le silicium, le matériau résultant contiendra un excès d'électrons libres, appelé type *N*. Lorsque le phosphore est incorporé dans le silicium, le matériau résultant est classé comme matériau de type *N*. En revanche, lorsque les atomes d'impuretés possèdent moins d'électrons que le silicium, le matériau manquera d'électrons et est donc appelé matériau de type *P*. Un excellent exemple de matériau de type *P* est le silicium dopé au bore [9, 10]. Les batteries sont produites grâce à l'utilisation de lingots de silicium. Ces lingots subissent le processus de découpage en couches minces de type *P* ou *N* par la pratique de la diffusion de bore ou de phosphore en eux. Ensuite, afin d'obtenir une cellule solaire, une jonction de deux zones de type opposé (jonction *P – N*) est formée. Au voisinage de la jonction, un champ électrique émerge, servant à maintenir la séparation des charges positives et négatives. Enfin, des contacts métalliques en forme de grille sont déposés, ainsi que des contacts avant et arrière. De plus amples informations sont disponibles dans la figure (I.4) ci-dessous [9, 11].

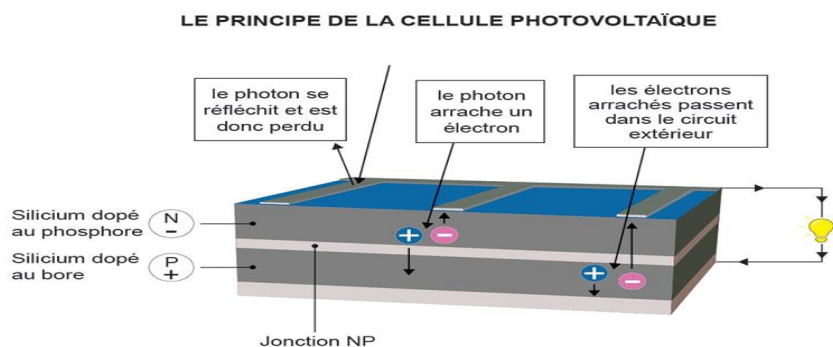


Figure (I.4). Schéma explicatif d'une cellule solaire.

I.4.2.2. Les différents types de panneaux photovoltaïques :

Il existe des nombreux types de cellules solaires, chacune ayant ses propres performances et son propre coût. Quel que soit leur type, cependant, leur rendement reste faible : de 8 à 23 % de l'énergie qu'ils reçoivent. En fait, il existe actuellement trois principaux types de cellules. Qui peut être mentionné [12] :

I.4.2.2.1. Les panneaux PV avec des cellules monocristallines :

Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont des photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant Plus efficace que le silicium polycristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau.

Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium.

Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction (P-N) dépôt de Couche anti reflet, pose des collecteurs), le wafer devient une cellule.

Les cellules sont rondes ou presque carrées et vues de près, elles ont une couleur uniforme.

Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.[13]

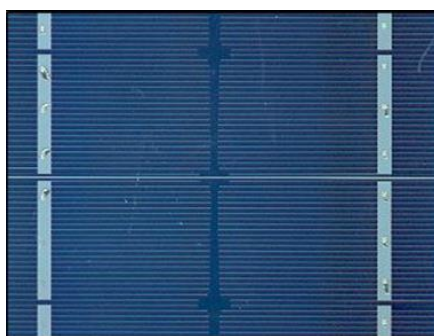


Figure (I.5). Cellule photovoltaïque monocristalline.

Les avantages ainsi que les inconvénients de ce type des cellules sont les suivants [14] :

➤ **Les avantages :**

- Très bon rendement (environ 150 Wc/m²).
- Durée de vie importante (+/- 30 ans).

➤ **Les inconvénients :**

- Coût élevé.
- Rendement faible sous un faible éclairement.

I.4.2.2.2. Les panneaux PV avec des cellules polycristallines :

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines.

Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure Polycristalline [13].

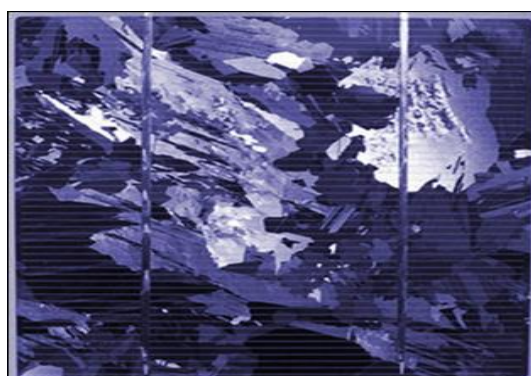


Figure (I.6). Cellule photovoltaïque polycristalline.

➤ **Les avantages :**

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²) .
- Durée de vie importante (+/- 30 ans) .
- Meilleur marché que le monocristallin

➤ **Les inconvénients :**

- Rendement faible sous un faible éclairement.

I.4.2.2.3. Les panneaux PV avec des Cellules amorphes :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, Mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly-cristallines ou monocristallines.

Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première [13].

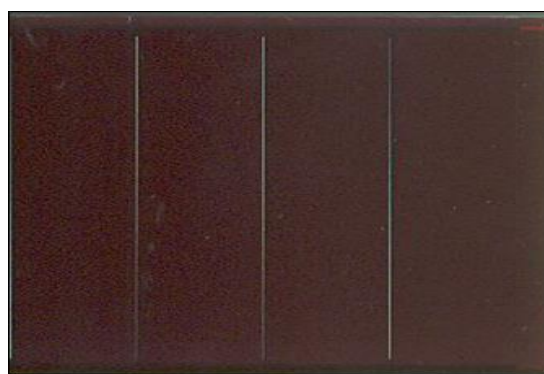


Figure (I.7). Cellule photovoltaïque amorphe.

Les avantages ainsi que les inconvénients liés aux cellules photovoltaïques amorphes sont les suivants [14] :

➤ **Les avantages :**

- Fonctionnent avec un éclairage faible .
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules .
- Moins sensible aux températures élevées.

➤ **Les inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

I.4.2.3. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

I.4.2.3.1. Circuit électrique idéal :

En termes simples, une cellule photovoltaïque peut être définie comme une source de courant qui génère un courant I_{ph} qui est proportionnel à la puissance de la lumière incidente, tout en fonctionnant également en parallèle avec une figure de diode figure (I.8) qui représente la région de transition p-n de la cellule.

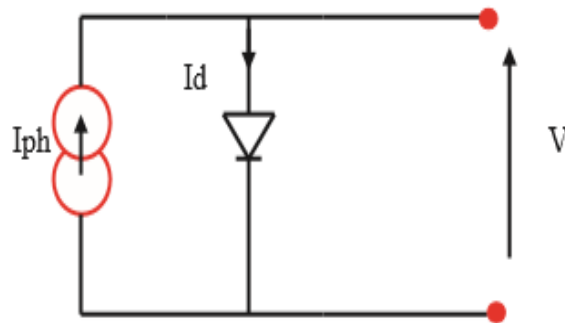


Figure (I.8) : schéma électrique idéal de cellule photovoltaïque.

Après la loi de noeuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{I.1})$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode:

$$V = V_d \quad (\text{I.2})$$

En tant que composante non linéaire, la caractéristique I-V de la diode est déterminée par la corrélation suivante :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{I.3})$$

Avec :

I_{ph} : Le courant de saturation inverse de la diode.

V_d : la tension au borne de diode

$V_t = \frac{K.T}{q}$:Potentielle thermique

Donc la relation (I.1) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (\text{I.4})$$

I.4.2.3.2. Circuit électrique réel :

Dans le modèle antérieur du photovoltaïque, tous les phénomènes qui se produisent lors de la transformation de l'énergie lumineuse n'étaient pas pris en compte. En réalité, il y a une baisse de tension en sortie et aussi une présence de courants de fuite. Pour tenir compte de cette réduction de tension, une résistance série R_s est utilisée dans le modèle. De même, pour tenir compte des courants de fuite, une résistance parallèle R_p est incluse dans le modèle.

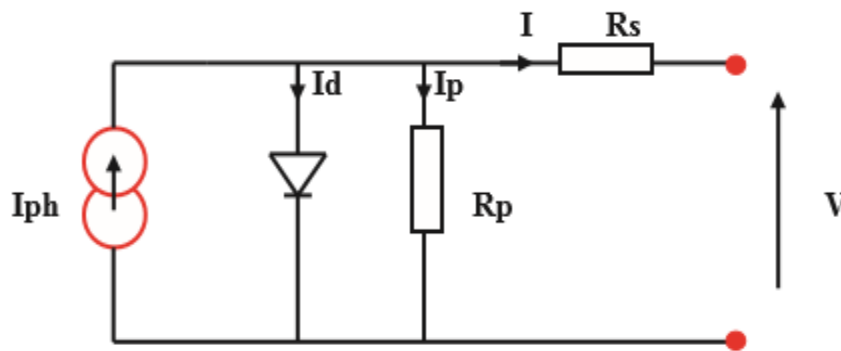


Figure (I.9) : Modèle de la cellule photovoltaïque réel.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{I.5})$$

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (\text{I.6})$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + (R_s \cdot I_{pv})}{A \cdot V_t} \right)} - 1 \right) \quad (\text{I.7})$$

I_d : Le courant fourni par la cellule

$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right)$: Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_0 : Le courant de saturation de la diode.

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} Joule / Kelvin). $e^x = n.K.q.T.I$

q : charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C .

n : Le facteur de qualité de diode.

T : La température de cellule en kelvin.

Donc (1.5) sera :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + (R_s \times I_{pv})}{A \times V_t} \right)} - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \right) \quad (I.8)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{pv} + (R_s \times I_{pv})}{A \times V_t} \right)} - 1 \right)$$

I.4.2.4. Paramètres des cellules photovoltaïques :

I.4.2.4.1. Le courant de court-circuit I_{cc} :

Soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche de la photo courant I_{ph} .

I.4.2.4.2. La tension de circuit ouvert V_{co} :

Soit la tension qui apparait aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.

I.4.2.4.3. La puissance :

La partie intéressante de la caractéristique courant-tension pour l'utilisateur c'est celle que génère de l'énergie, donc ce ne sera ni au point de tension de circuit ouvert, ni au point de court - circuit, qui ne génère aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension, donc la puissance maximale génère par la cellule. [5]

$$P_m = I_m \times V_m \quad (I.9)$$

➤ La puissance du panneau constitué des cellules parallèles :

$$P_p = N_p \times I_m \times V_m \quad (I.10)$$

➤ La puissance du panneau constitué des cellules série :

$$P_s = N_s \times I_m \times V_m \quad (I.11)$$

➤ La puissance du panneau constitué des cellules série et parallèle :

$$P_p = N_p \times I_m \times V_m \times N_s \quad (\text{I.12})$$

P_m : la puissance maximale.

I_m : le courant maximum.

V_m : la tension maximale.

N_s : le nombre des cellules associé en série.

N_p : le nombre des cellules associé en parallèle.

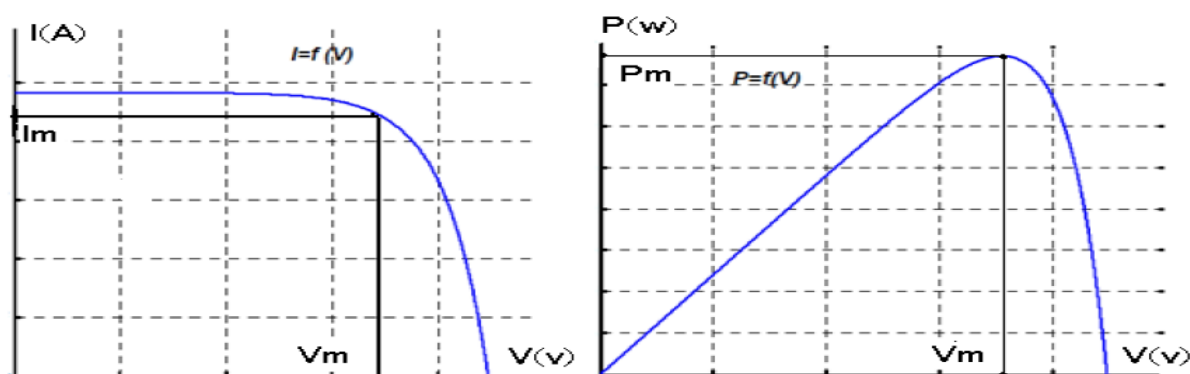


Figure (I.11) : caractéristique $I=f(v)$. Figure (I.12) : caractéristique $P=f(v)$.

I.4.2.4.4. Le facteur de forme :

Qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique, soit le rapport :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (\text{I.13})$$

I.4.2.4.5. Rendement des cellules :

Le tableau (I.2) suivant présente les différents types de cellules avec leur rendement [12] :

Technologie de cellules	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe ($a - Si$)	13%	5% à 9%
Silicium polycristalline ($p - Si$)	19.8%	11% à 15 %
Silicium monocristallin ($m - Si$)	24.7%	13% à 17%

Tableau (I.2). Différents types des cellules avec leur rendement.

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

$$\eta_{STC} = \frac{P_m}{E_{STC} \times S_{cellule}} \quad (\text{I.14})$$

Avec :

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

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

- Réflexion superficielle.
- Température de jonction photopile.
- Types de matériaux et techniques de fabrication utilisés.
- Résistances série et parallèle provoquant des pertes par effet Joule.
- Absorption incomplète et excès d'énergie des photons absorbés.

I.5. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

La combinaison de plusieurs cellules photovoltaïques en série et/ou en parallèle produit différents types de générateurs photovoltaïques. Pour ce faire, si les photopiles sont connectées en série, la tension de chaque photopile est ajoutée, ce qui augmente la tension totale du générateur. En revanche, il augmente si les photopiles sont connectées en parallèle. La combinaison de ces deux types de cellules photovoltaïques peut être décrite en détail comme suit :

I.5.1. Association des cellules photovoltaïques en série :

Connecter des batteries N_s en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque, augmentant ainsi la puissance électrique du panneau. Ainsi, les cellules sont traversées par le même courant. Dans ce cas, les caractéristiques résultant du groupement en série sont obtenues en sommant les tensions de base de chaque cellule. L'équation (I.15) a permis de définir les caractéristiques électriques associées à N_s Connectez les batteries en série [15]. On obtient donc :

$$V'_{co} = N_s \times V_{co} \quad (\text{I.15})$$

Avec :

- V_{co} : la tension du circuit ouvert.
- N_s L'association de N_s cellules en série peut être illustrée par la figure suivante :

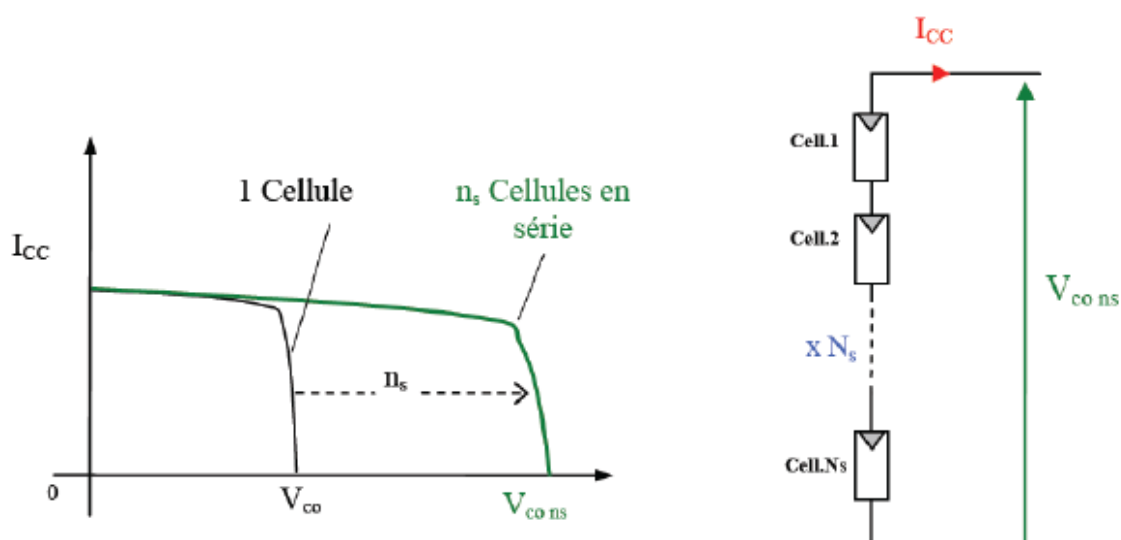


Figure (I.13). Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série.

I.5.2. Association des cellules photovoltaïques en parallèle:

Par contre, une combinaison en parallèle de N_p cellules photovoltaïques est possible et peut augmenter le courant de sortie produit par le générateur photovoltaïque. Dans un groupe de cellules identiques connectées en parallèle. Les photopiles sont soumises à la même tension. De plus, les caractéristiques résultant du regroupement sont généralement obtenues en sommant tous les courants des cellules composant le générateur photovoltaïque.

L'équation (I.16) a permis de définir les caractéristiques électriques d'une association de N_p cellules en parallèles [15]. On obtient donc :

$$I'_{cc} = N_p \times I_{cc} \quad (\text{I.16})$$

- I_{cc} : le courant de court-circuit.

Utilisez I_{cc} pour représenter le courant de court-circuit de chaque cellule. Les caractéristiques électriques de la combinaison de batteries N_p connectées en parallèle peuvent être illustrées par la figure suivante :

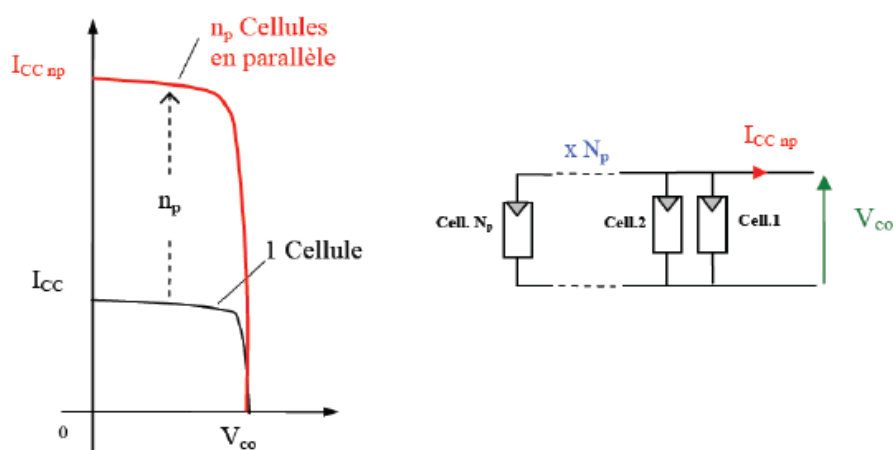


Figure (I.14). Caractéristique résultant d'un regroupement de N_p cellules en parallèle.

I.5.3. Association des cellules photovoltaïques mixte (série et parallèle) :

Typiquement, ce type d'association est utilisé pour en tirer des hautes tensions, car une association en série de cellules solaires fournit une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. Les caractéristiques de deux réseaux de modules solaires sont présentées dans la figure ci-dessous (I.15), qui peut être résumée comme une série de N_s modules solaires connectés en série. Ce type de groupe augmente fortement le courant de sortie du générateur photovoltaïque [16].

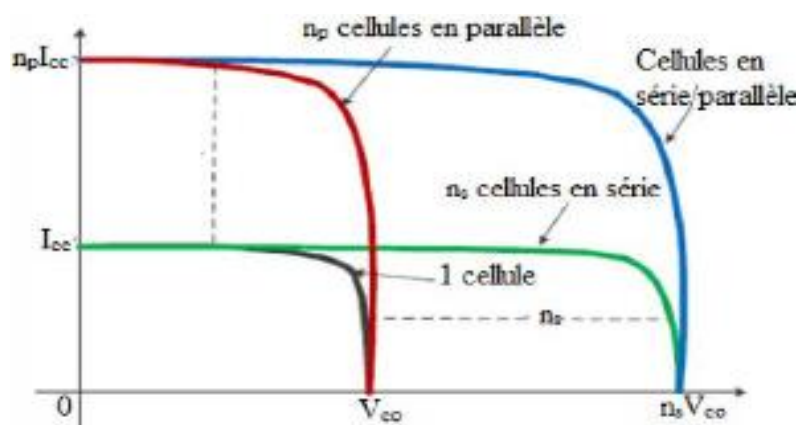


Figure (I.15). Caractéristique regroupement mixte (série et parallèle).

I.6. Classification des systèmes photovoltaïques :

Les systèmes d'énergie solaire photovoltaïque peuvent être divisés en deux catégories selon leur autonomie :

I.6.1. Système isolé ou autonome :

Ce sont des systèmes qui fonctionnent 24 heures sur 24 pour convertir l'énergie solaire en électricité sans avoir besoin d'aucune autre source d'alimentation, ce qui nécessite l'aide de plusieurs composants mais surtout d'une batterie qui permet de stocker l'énergie.

Il convient de mentionner que les batteries les plus utilisées sur le marché aujourd'hui sont : les batteries au plomb et les batteries au nickel-cadmium [7]. La figure (I.16). Représente un système photovoltaïque travaillant en mode autonome.

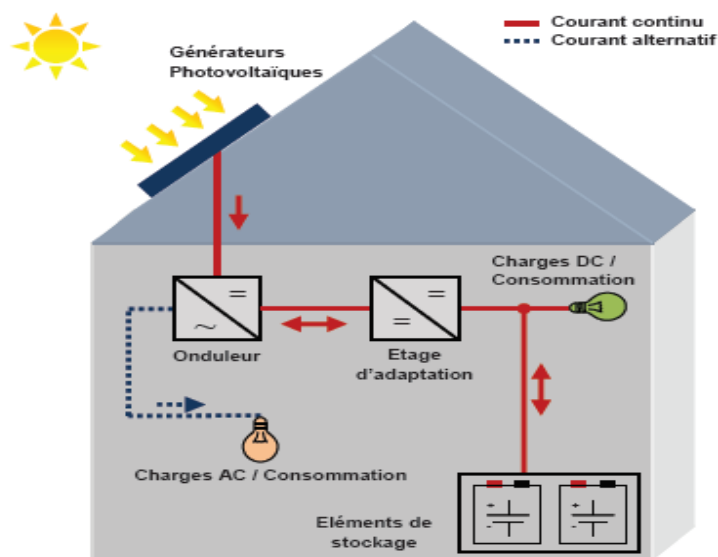


Figure (I.16). Schéma d'un système photovoltaïque en mode autonome.

I.6.2. Système raccordé au réseau :

Un système photovoltaïque connecté au réseau, qui est un système directement couplé au réseau à l'aide d'un onduleur. Ce type de système offre beaucoup de commodité pour le producteur/consommateur car c'est le réseau responsable de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité [7]. La figure (I.17). Représente un mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau public.

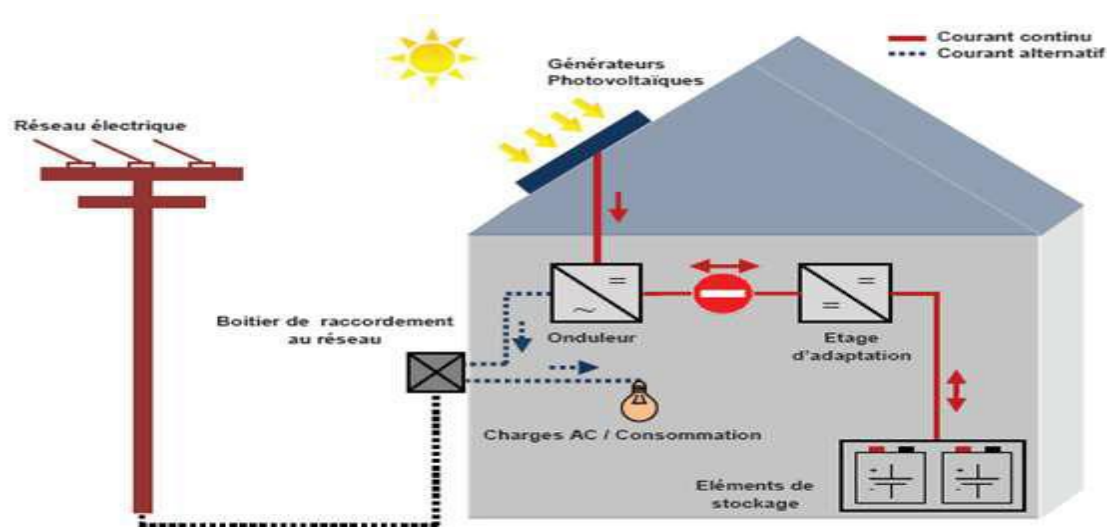


Figure (I.17). Mode d'exploitation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

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

I.7.1. Avantages du photovoltaïque :

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

I.7.2. Inconvénients du photovoltaïque :

- Le coût initial des systèmes photovoltaïques est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée. Ils sont donc parfois hors de portée des personnes à faibles revenus.
- Les systèmes photovoltaïques de faible puissance requièrent souvent des équipements à courant continu dont l'efficacité énergétique est supérieure à celle des équipements à courant alternatif, mais dont le coût est souvent plus élevé.

- Les systèmes photovoltaïques doivent être conçus et installés par des techniciens car toute erreur de conception ou de réalisation conduirait à créer une installation d'un rendement inférieur à celui des solutions alternatives.
- Les systèmes photovoltaïques de forte puissance nécessitent souvent un système de secours (éolien ou au fuel) pour les périodes de forte demande ou de fort ennuagèrent.

L'électricité solaire photovoltaïque n'est pas économiquement viable pour les charges thermiques de type cuisson chauffage, ou repassage.

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé les concepts fondamentaux du développement de l'énergie solaire. Nous avons examiné en détail le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les paramètres qui limitent leur rendement. Nous avons également présenté les composants d'un système de cellules solaires, ainsi que l'architecture typique d'un générateur photovoltaïque. Enfin, nous avons discuté des avantages et des inconvénients de ce système. Dans le prochain chapitre, nous allons nous plonger dans la modélisation des cellules et des modules solaires photovoltaïques (PV).

Chapitre 2

Modèle PV à une seule diode et double diode

II. Introduction :

Aujourd'hui, l'intérêt croissant pour les applications de génération photovoltaïque a conduit à une accélération des recherches dans ce domaine, en raison des problèmes liés à l'exploitation optimale, à l'impact environnemental et à la stabilité du réseau. Cela a soulevé plusieurs questions de recherche, telles que la prévision de la production d'énergie photovoltaïque, la conception optimale des convertisseurs de puissance pour relier les générateurs PV au réseau ou à la charge, ainsi que l'étude des problèmes liés au contrôle électronique de puissance.

La modélisation des modules photovoltaïques requiert une sélection minutieuse des circuits électriques équivalents afin d'obtenir une représentation précise. Pour élaborer un circuit équivalent adéquat pour une cellule PV, il est essentiel de comprendre à la fois la configuration physique des composants de la cellule et les caractéristiques électriques de chaque élément.

Dans ce chapitre, nous explorerons plus en détail la modélisation à une seule diode et à double diode, en examinant leurs principes fondamentaux, leurs équations et leurs applications. Nous analyserons également les avantages et les limitations de chaque modèle, en mettant en évidence les cas où l'un pourrait être préférable à l'autre. En combinant une compréhension approfondie de ces modèles avec des données expérimentales, nous pourrions améliorer notre compréhension du comportement des cellules PV et optimiser l'efficacité des systèmes solaires.

La détermination des grandeurs prédites par un tel modèle repose souvent sur la résolution d'une équation non linéaire avec des variables inconnues, telles que le courant et la tension fournis par le modèle. Cette résolution est généralement réalisée à l'aide de méthodes itératives telles que la méthode de Newton-Raphson, la méthode de Lambert W.

II.1. Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque avec modèle à une diode :

II.1.1. Présentation de ce modelé :

La cellule solaire en question se compose en fait d'une résistance série (R_s) et d'une résistance shunt (R_p). Ces résistances auront un effet sur la courbe $I = f(V)$:

- Résistance série : Ce composant dépend principalement de la résistance du semi-conducteur, de la résistance de contact de la grille du collecteur et de la résistivité de la grille.
- Résistance de shunt : elle est causée par le courant de fuite à la jonction et elle dépend de la méthode utilisée.[17]

Les modèles PV à une ou deux diodes sont couramment utilisés pour modéliser les caractéristiques de sortie d'un module. Le modèle à une seule diode est le plus simple car il possède une seule source de courant parallèle à une diode. Ce modèle est complété par l'ajout d'une résistance en série R_s . Malgré sa simplicité, il présente une carence sévère lorsque la température est désynchronisée. L'ajout d'un modèle qui augmente la résistance du shunt R_p démontré à la figure (II.1). Malgré le développement d'un capital, cette approche est gourmande en ressources. De plus, sa précision diminue près de la tension en circuit ouvert (V_{co}), en particulier à faible éclairement. Le modèle à deux diodes.[17]

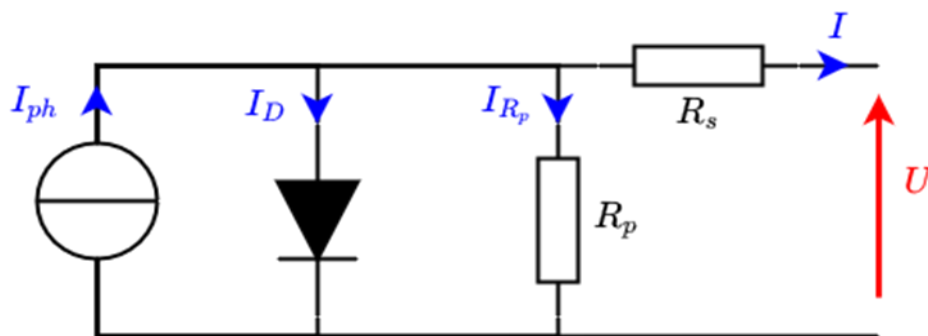


Figure (II.1). Circuit électrique équivalent du modélisant une cellule photovoltaïque avec une diode.

La représentation mathématique typique du courant de sortie d'une cellule photovoltaïque est la suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (\text{II.1})$$

Sachant que :

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

$$I_D = I_0 \left[-1 + \exp \left(\frac{V_{pv} + (R_s \times I_{pv})}{A \times V_t} \right) \right] \quad (\text{II.2})$$

- V_t : représente la potentielle thermodynamique est donnée par $V_t = N_s \left(\frac{K \times T}{q} \right)$.
- I_0 : représente le courant de saturation inverse de la diode qui peut être exprime par :

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

- I_{rs} : représente le courant de court- circuit de la cellule à la température de référence est donné par l'expression ci-dessous :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left(\exp \left(\frac{V_{co}}{A \times V_t} \right) - 1 \right)} \quad (\text{II.4})$$

- De plus le photo-courant est généralement défini par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} \left[I_{sc} + K_i (T - T_n) \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- V_{pv} : représente la tension de sortie du modèle.
- V_t : représente la potentielle thermodynamique.
- T : représente la température de la jonction des cellules PV donnée en kelvin [$^{\circ}K$].

- T_n : représente la température nominale obtenue dans les conditions standards *STC* (température de jonction référence) à savoir $T_n = 25^\circ C$.
- A : représente le facteur d'idéalité de la jonction.
- G : représente l'éclairement solaire (rayonnement incident) donné en W / m^2 .
- G_n : représente l'éclairement solaire nominale obtenu dans les conditions standards *STC* (rayonnement de référence) à savoir $G_n = 1000W / m^2$.

Le modèle de comportement des cellules photovoltaïques de notre travail est étayé par des données comme indiqué dans le tableau résumé [2.1] ci-dessous :

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

Tableau 2-1 : Les données pour la modélisation de la cellule PV.

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + (R_s \times I_{pv})}{A \times V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + (R_s \times I_{pv})}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

Typiquement, un générateur photovoltaïque se compose de plusieurs cellules photovoltaïques qui sont interconnectées à la fois en série et en parallèle. De plus, l'équation « courant-tension » des panneaux photovoltaïques, organisés en parallèle N_{pp} et en série N_{ss} , peut être établie à travers les deux équations suivantes :

$$I^P = N_{pp} \times I_{pv} \quad (\text{II.7})$$

$$V^P = N_{ss} \times V_{pv} \quad (\text{II.8})$$

Alors l'équation du courant devient comme suit :

$$I^P = N_{pp} \times I_{ph} - N_{ss} \times I_0 \left(\exp \left(\frac{\frac{V^P}{N_{ss}} + \frac{R_s}{N_{pp}} \times I^P}{A \times V_t} \right) \right) - \left(\frac{\left(\frac{N_{pp}}{N_{ss}} \times V^P \right) + (R_s \times I^P)}{R_p} \right) \quad (\text{II.9})$$

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

II.1.2. Différents modèle PV modélisant la cellule PV :

II.1.2.1. Modèle mathématique à quatre paramètres inconnus :

Dans ce modèle, nous traitons la cellule solaire comme une source de courant dépendante de l'irradiance solaire, connectant une diode en parallèle avec deux résistances en série et en parallèle R_s . En fait, les quatre paramètres apparaissant dans l'équation caractéristique $I(V)$ sont le photocourant I_{ph} , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_p et le facteur de qualité de diode A . Ces paramètres sont

Quantité mesurable qui n'est généralement pas incluse dans les données du fabricant. Par conséquent, il doit être déterminé selon le système d'équations $I(V)$ ou divers algorithmes d'optimisation du point de fonctionnement (dans ce cas, l'algorithme DE ou l'optimisation par essaim de particules l'algorithme de chauve-souris).[18]

II.1.2.2. Modèle mathématique à trois paramètres inconnus :

Pour réduire la complexité qui survient lors de la modélisation des cellules photovoltaïques, le circuit à quatre paramètres susmentionnés peut être simplifié en un circuit à trois paramètres. Ceci est assuré en remplaçant le photo-courant par l'équation correspondante (l'équation 2.5). En fait, les trois paramètres inconnus sont les suivants [18] :

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

II.1.3. Comment calculer le courant I_{pv} prédit :

L'équation particularité $I-V$ est une formule non linéaire dont la résolution besoin l'application d'une méthode de détermination pour maintenir un vecteur de solutions exactes ou des vecteurs de solutions approchées. A cette conséquence, quelques méthodes ont été développées ces dernières années pour résoudre cette équation non linéaire. Parmi eux on peut citer :

- La méthode basée sur la fonction *fsolve*.
- LA méthode de Newton-Raphson.
- LA méthode de *LambertW*.

❖ Nous présentons chaque méthode précédente a utilisée pour calculer le courant prédit à partir de la solution de l'équation non linéaire du courant fourni par une cellule PV.

II.1.3.1. La méthode de *fsolve* :

fsolve est une fonction disponible dans la bibliothèque de logiciels *Matlab*. Elle permet de résoudre de manière approchée des systèmes d'équations non linéaires impliquant quelques variables réelles.

La fonction *fsolve* est généralement donnée sous forme vectorielle $F(X)=0$, où F et X peut être un vecteur ou une matrice réelle.

La forme standard de cette fonction est donnée par :

$$X = \text{fsolve}(FUN, X_0) \quad \text{(II.10)}$$

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

Ceci permet d'accepter ou rejeter la mise à jour de solution obtenue et d'arrêter l'algorithme de résolution. Sachant que cette fonction du *Matlab* utilisant deux algorithmes de résolution : local et global. En effet, pour l'algorithme local, *fsolve* nécessite une première estimation pour commencer ses itérations. Par conséquent, la solution obtenue est fortement dépendant de cette estimation initiale.

En revanche, l'algorithme global commence par des vecteurs aléatoires et continue de les mettre à jour jusqu'à atteindre le vecteur de la solution souhaitée assurant le plus petit coût [19].

***fsolve* existant dans le logiciel *Matlab* sont les suivantes :**

$X = fsolve (FUN, X0, options)$

$X = fsolve (problem)$

$[X, fval] = fsolve (*)$

$[X, fval, existflag, output] = fsolve (*)$

$[X, fval, existflag, output, jacobian] = fsolve (*)$

Ce paragraphe vise à offrir des informations cruciales pour exposer efficacement chaque variation de la fonction *Matlab*. A ce titre, nous fournirons [20] :

- $X = fsolve (FUN, X_0, options)$: La résolution est assurée avec des options d'optimisation spécifiques qui sont disponibles dans le fichier *optimoptions*.
- $X = fsolve (problem)$: Le système d'équations non linéaires doit être décrit préalablement sous forme d'un problème dans lequel l'utilisateur doit spécifier l'initialisation de la solution, l'option adoptée durant le processus d'optimisation.
- $[X, fval] = fsolve (*)$: Quelle que soit la syntaxe imposée par l'utilisateur, ce formalisme résout le système d'équations non linéaires et renvoie les valeurs de *FUN* à la solution *X*.
- $[X, fval, existflag, output, jacobian] = fsolve (*)$: dans ce cas, le critère d'arrêt assurant la solution souhaitée est conditionné par le signe de la condition suffisante décrite par la matrice jacobéenne.

II.1.3.2. Méthode de Newton-Raphson :

La méthode de *Newton – Raphson* est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires [21]. Donc cette méthode est la plus efficace et la plus utilisée, elle repose sur le développement de Taylor. Si $f(x)$ est continue et continuellement dérivable dans le voisinage de \bar{x} solution de $f(x) = 0$,

Alors le développement en série de Taylor autour d'un estimé x_n proche de \bar{x} s'écrit :

$$f(\bar{x}_n) = f(x_n) - \frac{(\bar{x} - x_n)}{1!} f'(x_n) + \frac{(\bar{x} - x_n)^2}{2!} f''(x_n) \dots \quad (\text{II.11})$$

Si x_n est un estimé proche de \bar{x} , alors le carré de l'erreur $\varepsilon_n = \bar{x} - x_n$ et les termes de degrés supérieurs sont négligeable. Sachant que $f(\bar{x}) = 0$ on obtient la relation approximative :

$$f(x_n) + (\bar{x} - x_n) f'(x_n) \approx 0 \quad (\text{II.12})$$

Donc :

$$\bar{x} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.13})$$

On peut écrire la $(n+1)^{eme}$ itération approximant \bar{x} est :

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{II.14})$$

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

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

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{ph} - I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t} - 1\right) \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p}}{-1 - \left(\frac{R_s \times I_0}{A \times V_t}\right) \times \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}\right) - \left(\frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (\text{II.15})$$

II.1.3.3. Fonction de Lambert-W :

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

$$Z = W(X) e^{W(X)} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- Z : représente l'argument de la fonction W .

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

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

$$I_{pv}(R_p + R_s) = R_p \cdot I_k - R_p \cdot I_0 \times \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}\right) - V_{pv} \quad (\text{II.17})$$

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

❖ Ensuite, en multipliant les deux membres de l'Eq (II.4) par le terme $\frac{R_s}{R_s + R_p}$ nous obtenons :

$$R_s \times I_{pv} = \frac{R_s}{R_s + R_p} \left(R_p \cdot I_k - R_p \cdot I_0 \times \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}\right) - V_{pv} \right) \quad (\text{II.18})$$

❖ Ensuite, le terme V_{pv} est ajouté dans les deux membres de l'Eq (II.18). Puis, en divisant l'équation obtenue par le terme $A \times V_t$, nous obtenons :

$$\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t} = \frac{R_s}{A \times V_t (R_s + R_p)} \left(R_p \times I_k - R_p \times I_0 \times \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}\right) + \frac{R_p \times V_{pv}}{R_s} \right) \quad (\text{II.19})$$

❖ Maintenant, l'Eq (II.19) est à nouveau simplifié, donnant ainsi l'équation suivante :

$$\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t} + \frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)} \times \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}\right) = \frac{R_s}{A \times V_t (R_s + R_p)} \left(R_p \times I_k + \frac{R_p \times V_{pv}}{R_s} \right) \quad (\text{II.20})$$

❖ Ensuite, la fonction exponentielle des deux membres de l'Eq (II.20) est calculée, puis multipliée par le terme $\frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)}$. D'où, l'équation résultante est donc donnée par :

$$\left(\frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)} e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}} \right) e^{\left(\frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)} e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}} \right)} = \frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)} e^{\left(\frac{R_s}{A \times V_t (R_s + R_p)} \times \left(R_p \times I_k + \frac{R_p \times V_{pv}}{R_s} \right) \right)} \quad (\text{II.21})$$

❖ En prenant la fonction de Lambert-W des deux membres de l'Eq (II.21), on obtient :

$$\frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)} e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}} = LambertW \left(\frac{R_s \times R_p \times I_0}{A \times V_t (R_s + R_p)} e^{\frac{R_s}{A \times V_t (R_s + R_p)} \left(R_p \times I_k + \frac{R_p \times V_{pv}}{R_s} \right)} \right) \quad (\text{II.22})$$

Selon l'Eq (II.17), le terme $\left(R_p \times I_0 \times e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}} \right)$ est réécrit comme suit :

$$\left(R_p \times I_0 \right) e^{\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A \times V_t}} = R_p \times I_k - (R_s + R_p) I_{pv} - V_{pv} \quad (\text{II.23})$$

Ainsi, le courant de sortie prédit exact est donné en comparant l'Eq (II.22) avec l'Eq (II.23).

Cela donne :

$$\hat{I}_{pv} = \frac{R_p (I_{ph} + I_0) - V_{pv}}{R_s + R_p} - \left(\frac{A \cdot V_t}{R_s} LambertW \left(\frac{R_s R_p I_0}{A \cdot V_t (R_s + R_p)} e^{\frac{R_s}{A \cdot V_t (R_s + R_p)} \left(R_p (I_{ph} + I_0) + \frac{R_p \cdot V_{pv}}{R_s} \right)} \right) \right) \quad (\text{II.24})$$

L'Eq (II.24) représente alors la solution exacte de l'équation non linéaire du courant de la cellule PV.

II.2. Modélisation d'un générateur solaire photovoltaïque avec modèle à double diode :

II.2.1. Présentation du modèle à double diode :

Le modèle à double diode est le même que le du modèle à une diode, mais la différence en ajoutant une résistance en série avec la diode 1 donc en a ($D1$ et $D2$), tel que ceci est représenté dans le schéma de la figure (II.2) ci-dessous :

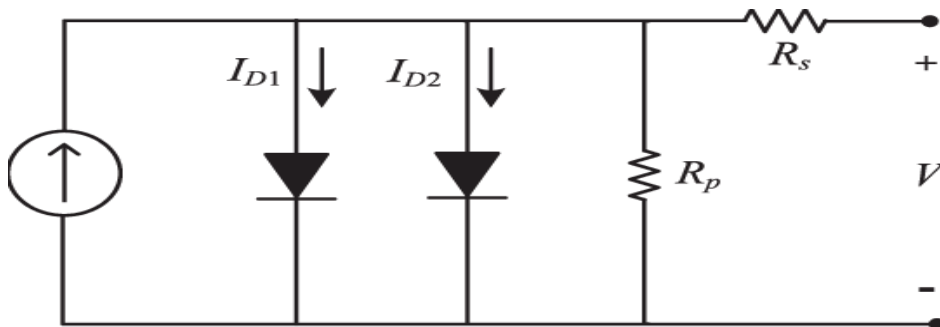


Figure (II.2). Circuit électrique équivalent du modélisant une cellule photovoltaïque avec double diode.

Donc, le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque s'exprime sous la forme mathématique suivante à partir de la figure (II.2) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D_1} - I_{D_2} - I_P \quad (\text{II.25})$$

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

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{0_1} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A_1 \times V_{t_1}}\right) - 1 \right] - I_{0_2} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{A_2 \times V_{t_2}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.26})$$

Avec :

- I_{0_1} : représente le courant de saturation de la première diode $D1$.
- I_{0_2} : représente le courant de saturation de la deuxième diode $D2$.
- A_1, A_2 : représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes $D1$ et $D2$.

En règle générale, le facteur d'idéalité de la diode, $D2$, fluctue considérablement d'une cellule à l'autre, reflétant divers degrés de fréquence de recombinaison en fonction du matériau et de sa qualité. Le modèle à diode unique est incapable de faire la distinction entre la diffusion et la recombinaison, et englobe donc les deux phénomènes au sein d'une seule diode [22].

- Les résistances R_s et R_p jouent un rôle crucial dans la prise en compte des événements dissipatifs dans les cellules photovoltaïques. Plus précisément, R_s inclut des facteurs tels que les résistances de base, l'avant de la jonction et les contacts avant et arrière. D'autre part, R_p traite des effets des courants de fuite déclenchés par des impuretés métalliques dans la jonction. Comprendre les valeurs des résistances parasites au sein d'un réseau cristallin est crucial pour évaluer la qualité des matériaux et améliorer l'efficacité d'une cellule photovoltaïque. Ces résistances influencent directement le facteur de forme, R_p déterminant le degré des courants de fuite et le rapport cyclique. Des valeurs R_p plus élevées entraînent des courants de fuite réduits et des cycles de service améliorés. À l'inverse, l'augmentation des valeurs de R_s peut entraîner certaines imperfections. Un facteur de forme plus petit est préférable en raison de pertes résistives réduites, que ce soit à l'interface entre le métal et le semi-conducteur ou à la surface du semi-conducteur. [22]

- Les tensions thermiques des diodes $D1$ et $D2$ sont représentées par V_{t1} et V_{t2} respectivement. Ces tensions peuvent être exprimées par :

$$V_t = V_{t1} = V_{t2} = N_s \times \frac{K \times T}{q} \quad (\text{II.27})$$

Pour déterminer le courant de saturation inverse d'une diode avec des valeurs égales pour I_0 , I_{01} et I_{02} , l'équation suivante peut être utilisée :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T}{T_n} \right)^{\frac{3}{A}} \times \exp \left(\left\{ \frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right) \quad (\text{II.28})$$

La définition du courant I_{rs} est $I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{A \times V_t} \right) - 1 \right)}$. Bien que le modèle à double diode présente

une plus grande précision que le modèle à une seule diode, il nécessite malheureusement des efforts de calcul considérables.

II.2.2. Différents modèle PV modélisant la cellule PV :

II.2.2.1. Modèle mathématique comportant cinq paramètres inconnus :

Selon l'Eq (II.26), le fonctionnement optimal du modèle à deux diodes nécessite l'optimisation de cinq paramètres. La détermination précise de ces paramètres est nécessaire pour des prédictions précises de la tension ou du courant de sortie du module PV. Ces paramètres inconnus sont combinés dans un vecteur de décision, indiqué par DV_{2d} avec

$$DV_{2d} = [I_{ph}, R_s, R_p, A_1, A_2]^T \quad [23].$$

II.2.2.2. Modèle mathématique comportant quatre paramètres inconnus :

Quatre paramètres inconnus qui sont combinés dans un vecteur de décision, appelé DV_{2d-4} avec $DV_{2d-4} = [R_s, R_p, A_1, A_2]^T$, peuvent être utilisés pour créer le modèle PV souhaité de manière comparable. L'équation suivante peut être utilisée comme substitut du courant de photons, représenté par I_{ph} dans ce cas particulier [23] :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + K_t (T - T_n)] \quad (\text{II.29})$$

II.2.3. Comment Calculer le courant I_{pv} prédit par le modèle PV à double diode :

Le calcul du courant dans une cellule photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une fonction non linéaire se référant à l'Eq. (II.26) Par conséquent, il est essentiel d'utiliser une méthode de résolution efficace pour déterminer le courant anticipé. Les méthodes disponibles incluent la méthode basée sur la fonction *fsolve*, l'approche de la méthode de Newton-Raphson et la méthode de *LambertW*.

II.2.3.1. La méthode basée sur la fonction *fsolve* :

Le but de cette fonction particulière est de résoudre un ensemble d'équations non linéaires qui définissent le modèle à double diode d'une cellule photovoltaïque. Ce système est dérivé de l'équation (II.30) comme indiqué ci-dessous :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{a_1}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{a_2}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} = 0 \quad (\text{II.30})$$

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

II.2.3.2. La Méthode de Newton-Raphson :

Comme indiqué précédemment, la technique est souvent utilisée pour résoudre des équations non linéaires. La méthode de Newton-Raphson implique la formule $\bar{x} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$ et repose sur une compréhension de $f(I)$, qui peut être exprimée comme :

$$f(I_{pv}) = I_{ph} - I_{pv} - I_{0_1} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{a_1}\right) - 1 \right] - I_{0_2} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{a_2}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} = 0$$

(II.31)

En utilisant la nouvelle méthode de Newton-Raphson, il devient possible de déterminer de manière itérative la valeur actuelle anticipée, I , en utilisant la formule suivante :

$$I_{pv_{n+1}} = I_{pv_n} - \frac{I_{ph} - I_{pv_n} - I_{0_1} \left[1 - e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_1 \cdot V_t}\right)} \right] - I_{0_2} \left[1 - e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_2 \cdot V_t}\right)} \right] - \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{R_p} \right)}{-1 - \left(\frac{R_s \cdot I_{0_1}}{A_1 \cdot V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_1 \cdot V_t}\right) - \left(\frac{R_s \cdot I_{0_2}}{A_2 \cdot V_t} \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv_n}}{A_2 \cdot V_t}\right) - \left(\frac{R_s}{R_p} \right)}$$

(II.32)

II.2.3.3. La méthode de Lambert-W :

L'équation ci-dessous exprime le courant de sortie pour les cellules solaires qui adhèrent au modèle à double diode [26] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{pv} - I_{0_1} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{a_1}\right) - 1 \right] - I_{0_2} \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{a_2}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p}$$

(II.33)

On peut observer que l'Eq (II.33) comprend une paire de fonctions exponentielles. Pour exprimer chacune de ces fonctions en fonction de *Lambert*, nous devons scinder l'équation de caractéristique entière $I - V$ en deux équations. Les équations doivent être structurées sous la forme ci-dessous :

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

(II.34)

Les valeurs : a , b , c et d restent inconnues. Pour résoudre ces paramètres, nous devons multiplier les

deux côtés de l'équation (II.34) par un terme spécifique $\left(-\frac{c}{a} e^{\left(-cx - \frac{cb}{a}\right)} \right)$, On obtient donc :

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

(II.35)

Pour dériver l'équation suivante, nous substituons $x = -\frac{c}{a} e^{\left(\frac{ad-cb}{a}\right)}$ et $W(x) = \left(-cx - \frac{cb}{a} \right)$ dans

l'équation (II.35). Cela donne une forme équivalente de $W(x)e^{W(x)} = x$, qui est l'équation de définition de la fonction $W(\text{Lambert})$. Ainsi, nous pouvons exprimer l'Eq (II.33) Comme :

$$-\frac{R_s + R_p}{R_p} I_{pv} + \left(I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p} \right) = I_{0_1} \cdot \exp\left(\frac{R_s}{a_1} I_{pv} + \frac{V_{pv}}{a_1} \right) + I_{0_2} \cdot \exp\left(\frac{R_s}{a_2} I_{pv} + \frac{V_{pv}}{a_2} \right) \quad (\text{II.36})$$

Soient C_1 , C_2 , D_1 et D_2 données par :

$$C_1 = \frac{R_s}{a_1} ; D_1 = \frac{V_{pv}}{a_1} ; C_2 = \frac{R_s}{a_2} ; D_2 = \frac{V_{pv}}{a_2} .$$

Afin d'utiliser la fonctionnalité de W dans *Lambert*, nous supposons que l'Eq (II.37) et (II.38) sont tous deux vrais comme représenté par les deux expressions ci-dessous :

$$I_{0_1} \cdot \exp(C_1 I + D_1) = I_{0_1} \cdot (A_1 I_{pv} + B_1) \quad (\text{II.37})$$

$$I_{0_2} \cdot \exp(C_2 I + D_2) = I_{0_2} \cdot (A_2 I_{pv} + B_2) \quad (\text{II.38})$$

Pour déterminer les paramètres A_1 , A_2 , B_1 et B_2 , la méthode des coefficients indéterminés est utilisée. En utilisant les équations (II.37) et (II.38), l'équation (II.36) peut être exprimée comme suit :

$$I_{0_1} \cdot (A_1 I_{pv} + B_1) + I_{0_2} \cdot (A_2 I_{pv} + B_2) = -\frac{R_s + R_p}{R_p} I_{pv} + \left(I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p} \right) \quad (\text{II.39})$$

L'équation (II.39) peut être simplifiée en regroupant des termes comparables pour donner :

$$(A_1 I_{0_1} + A_2 I_{0_2}) I_{pv} + (B_1 I_{0_1} + B_2 I_{0_2}) = -\frac{R_s + R_p}{R_p} I_{pv} + \left(I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p} \right) \quad (\text{II.40})$$

La méthode des coefficients indéterminés dicte que les coefficients des termes comparables dans l'équation (II.40) doivent être équivalents pour tout I_{pv} . En suivant ce principe, nous pouvons dériver les deux expressions suivantes :

$$A_1 I_{0_1} + A_2 I_{0_2} = -\frac{R_s + R_p}{R_p} \quad (\text{II.41})$$

$$B_1 I_{0_1} + B_2 I_{0_2} = I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph} - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.42})$$

Il est évident que les équations (II.41) et (II.42) se composent de quatre variables, à savoir : A_1, A_2, B_1 et B_2 . Par conséquent, l'association entre A_1, A_2, B_1 et B_2 est de nature linéaire.

Pour faciliter le calcul, supposons que A_1, A_2 et B_1, B_2 sont tous égaux à \bar{A} et \bar{B} , respectivement. En branchant \bar{A} dans l'équation (II.41) et \bar{B} dans l'équation (II.42), nous pouvons dériver les valeurs de \bar{A} et \bar{B} comme présenté ci-dessous :

$$\bar{A} = -\frac{R_s + R_p}{R_p \cdot (I_{0_1} + I_{0_2})} \quad (\text{II.43})$$

$$\bar{B} = \frac{R_p (I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph}) - V_{pv}}{R_p \cdot (I_{0_1} + I_{0_2})} \quad (\text{II.44})$$

Dans la même veine que la dérivation des équations (II.33) et (II.34), les équations (II.38) et (II.39) peuvent utiliser la fonction W de *Lambert* pour créer une expression claire du courant I_{pv} .

En remplaçant \bar{A}, A_2, C_1 et D_1 par leurs valeurs correspondantes dans l'Équation (II.36), nous pouvons dériver une expression claire et explicite du courant sous la forme I_{pv_1} , qui est représentée par l'Équation (II.44) :

$$I_{pv_1} = \frac{R_p \cdot (I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph}) - V_{pv}}{(R_s + R_p)} - \left(\frac{a_1}{R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_p (I_{0_1} + I_{0_2})}{a_1 (R_s + R_p)} \cdot \exp \left(\frac{R_p \cdot (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{0_1} + R_s \cdot I_{0_2} + V_{pv})}{a_1 \cdot (R_p + R_s)} \right) \right) \right) \quad (\text{II.45})$$

L'équation (II.37) peut être modifiée en insérant \bar{A}, \bar{B}, C_2 et D_2 pour dériver une expression distincte du courant, connue sous le nom de I_{pv_2} et représentée dans l'équation (II.45)

$$I_{pv_2} = \frac{R_p \cdot (I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph}) - V_{pv}}{(R_s + R_p)} - \left(\frac{a_2}{R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_p (I_{0_1} + I_{0_2})}{a_2 (R_s + R_p)} \cdot \exp \left(\frac{R_p \cdot (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{0_1} + R_s \cdot I_{0_2} + V_{pv})}{a_2 \cdot (R_p + R_s)} \right) \right) \right) \quad (\text{II.46})$$

Ainsi, le courant I_{pv} par rapport à la tension V_{pv} peut être désigné par l'équation (II.46), qui est

$I_{pv} = \frac{1}{2} \cdot I_{pv_1} + \frac{1}{2} \cdot I_{pv_2}$. En conséquence, nous pouvons conclure que :

$$I_{pv} = \left(\frac{R_p \cdot (I_{0_1} + I_{0_2} + I_{ph}) - V_{pv}}{(R_s + R_p)} \right) - \left(\frac{a_2}{2 \cdot R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_p (I_{0_1} + I_{0_2})}{a_2 (R_s + R_p)} \exp \left(\frac{R_p (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{0_1} + R_s \cdot I_{0_2} + V_{pv})}{a_2 (R_s + R_p)} \right) \right) \right) - \left(\frac{a_1}{2 \cdot R_s} \cdot \text{LambertW} \left(\frac{R_s \cdot R_p (I_{0_1} + I_{0_2})}{a_1 (R_s + R_p)} \exp \left(\frac{R_p (R_s \cdot I_{ph} + R_s \cdot I_{0_1} + R_s \cdot I_{0_2} + V_{pv})}{a_1 (R_s + R_p)} \right) \right) \right)$$

(II.47)

II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque par les deux modèles basés sur une diode et double diode.

L'utilisation de modèles de circuit équivalent, tels que le modèle à une seule diode et le modèle à double diode, permet de représenter de manière précise le comportement non linéaire des cellules photovoltaïques. Ces modèles prennent en compte les différentes caractéristiques électriques et physiques des cellules, ainsi que leur dépendance à la température. Le calcul du courant prédit par ces modèles est réalisé en résolvant des équations non linéaires, soit par l'utilisation de méthodes itératives telles que la méthode de Lambert ou la méthode de Newton-Raphson, soit par d'autres approches mathématiques appropriées. Ces calculs permettent d'obtenir des estimations précises du courant produit par la cellule photovoltaïque dans différentes conditions de fonctionnement.

Les avancées réalisées dans la modélisation des cellules photovoltaïques avec des circuits équivalents d'une seule diode et de double diode, ainsi que le calcul du courant prédit, contribuent à l'essor des technologies solaires et à l'exploitation plus efficace de l'énergie solaire en tant que source d'énergie renouvelable.

Chapitre 3

Identification des paramètres du modèle PV

III.Introduction :

La détermination des paramètres fondamentaux de la cellule solaire ; à savoir le facteur d'idéalité, la résistance sérié, parallèle (shunt) et le courant de saturation joue un rôle primordial pour comprendre et prédire l'effet de ces conditions changeantes sur la puissance électrique photovoltaïque.

L'étude de l'optimisation est une discipline mathématique qui vise à créer des modèles et à résoudre des problèmes impliquant la maximisation ou la minimisation d'une fonction dans un ensemble donné de paramètres, soit par des moyens analytiques, soit par des moyens numériques. Dans le domaine de la recherche opérationnelle, l'optimisation joue un rôle crucial. L'identification d'un système dynamique qui existe dans le monde réel (appelé "l'objet") implique de comprendre son comportement à travers la création d'un système séparé (appelé le "modèle"). Ce modèle peut prendre la forme d'un système physique, tel qu'un simulateur analogique ou numérique, ou d'un système abstrait, tel qu'un modèle mathématique. Grâce à l'expérimentation d'entrées et de sorties, il est possible de déduire le comportement du système en question.[24]

Dans ce chapitre nous allons appliquer trois technique d'intelligence artificiels basées sur l'algorithme BAT, PSO et DE pour l'identification des paramètres des cellules solaire.

Deux applications ont été pris en considération. Les résultats obtenus seront analysés et discutées.

III.1.L'identification :

La définition de l'identification du système, dans son sens technique, est le processus de détermination d'un modèle mathématique d'un système ou d'un processus par l'analyse de données expérimentales et des tests d'entrée et de sortie du système. L'acte d'établir un modèle mathématique d'un système physique comprend plusieurs étapes, notamment : L'étape initiale dans la détermination de la structure d'un système est de nature qualitative et implique généralement la collecte d'informations sur l'ordre du système, les conditions initiales et l'amplitude maximale de ses entrées et sorties. Une autre approche consiste à utiliser les équations physiques qui régissent le système pour acquérir ces connaissances essentielles. Dans les situations où le système est

extrêmement complexe, une simplification en ramenant son étude à un point de fonctionnement peut être nécessaire. Deux types distincts de modèles peuvent également être identifiés.

- Des exemples de modèles paramétriques incluent les fonctions de transfert et les équations différentielles.
- Des modèles non paramétriques, comme ceux basés sur des réponses impulsionnelles ou en fréquence, sont disponibles en option.

L'étape quantitative consiste à déterminer les valeurs numériques des paramètres. En utilisant des méthodes de programmation mathématique sur un ordinateur numérique, il devient possible de déterminer les valeurs numériques des différents paramètres impliqués dans le processus étudié. De plus, des données expérimentales peuvent être utilisées pour établir un modèle paramétrique. [25]

III.2. Les Méta-heuristiques :

Les métaheuristiques sont une famille d'algorithmes d'optimisation utilisés pour résoudre des problèmes difficiles pour lesquels les méthodes classiques ne sont pas efficaces. Elles sont considérées comme des approches génériques capables de traiter une variété de problèmes différents, d'où leur qualificatif "méta". Bien qu'elles puissent trouver des solutions optimales avec peu d'informations, elles ne garantissent pas l'optimalité de la meilleure solution trouvée. Cependant, dans le domaine de la recherche opérationnelle, cela n'est pas nécessairement un inconvénient, car il est préférable d'obtenir rapidement une approximation de l'optimum global plutôt qu'une solution exacte qui prendrait trop de temps à trouver. Il existe de nombreuses métaheuristiques différentes, allant de simples méthodes de recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. La plupart de ces approches utilisent des processus aléatoires pour collecter des informations et résoudre des problèmes liés à la combinaison de différentes possibilités. Les métaheuristiques peuvent être considérées comme des algorithmes itératifs stochastiques, manipulant une ou plusieurs solutions dans le but de trouver l'optimum. Les itérations successives permettent de passer d'une solution de qualité médiocre à la solution optimale. L'algorithme s'arrête lorsque des critères d'arrêt sont atteints, tels que le temps d'exécution maximal ou la précision souhaitée. Ces méthodes sont appréciées pour leur capacité à éviter les optima locaux, que ce soit en acceptant des dégradations de la fonction objectif pendant le processus ou en utilisant une population de points pour la recherche. [26]

Parmi les quels et les plus utilisés dans l'optimisation, on peut citer les trois algorithmes Ci-dessous

- Algorithme Chauve-souris : BAT.

- Algorithme Différentiel Evolution : DE.
- Algorithme Essaim Particulaire : PSO.

Le principe de l'identification par les algorithmes méta-heuristique est illustré par la figure III.1

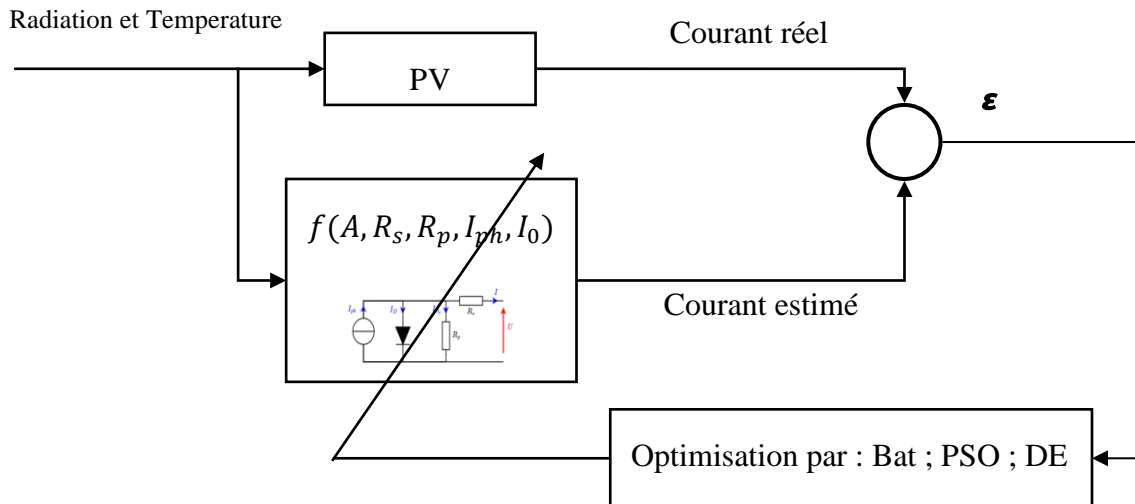


Figure III.1. Principe de 'identification par les algorithmes méta-heuristique.

Dans ce mémoire nous avons faire la modélisation de deux panneaux solaires.

III.3.La première application :

Dans cette application nous allons faire la modélisation des paramètres de panneau dont les paramètres sont donnés dans le tableau (III.1) [27] :

Puissance maximale	200 W
Radiation	978 W / m ²
Température	328.56 K
Nombre de cellule	34
Courant de court-circuit (A)	6.62 A
Tension de court-circuit (V)	29.9 V

Tableau (III.1). Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.

III.4.L'algorithme de chauve-souris :

L'algorithme de chauve-souris (Bat Algorithm), proposé par Xin She Yang [28], est l'une des méta-heuristiques biologiquement inspirées qui a suscité l'intérêt des chercheurs travaillant dans le domaine des algorithmes d'optimisation basés sur la nature. Il tire son inspiration du comportement d'écholocation des microchiroptères. Ces chauves-souris utilisent l'écholocation, un système de sonar

biologique, pour détecter la distance et distinguer entre la nourriture ou la proie et les obstacles. L'algorithme utilise une technique de régulation de fréquence pour favoriser la diversité des solutions au sein de la population, cherchant ainsi à équilibrer l'exploration et l'exploitation tout au long du processus de recherche, en simulant les variations des taux d'émission d'impulsions et de la vitesse des chauves-souris lors de leur recherche de proies [29].

L'algorithme standard de chauve-souris présente plusieurs avantages, notamment sa capacité à converger rapidement au début du processus, en passant de l'exploration à l'exploitation. Cela en fait une méthode efficace lorsque des solutions rapides sont nécessaires. Pour améliorer ses performances, de nombreuses modifications ont été apportées afin d'accroître la diversité des solutions et d'améliorer les performances de l'algorithme de chauve-souris standard [29,30].

III.4.1.Echolocation des chauves-souris :

L'écholocation est un système remarquable utilisé par les chauves-souris, qui en font l'un des mammifères les plus fascinants et méconnus. Grâce à cette capacité, elles peuvent voler activement la nuit et éviter les obstacles, même à grande vitesse. Les chauves-souris comptent parmi les animaux les plus diversifiés, avec environ 996 espèces différentes. Leur taille varie considérablement, allant des petites chauves-souris bourdons, également appelées microchiroptères ou "Micro-bats" en anglais, pesant environ 1,5g à 2g, jusqu'aux chauves-souris géantes, connues sous le nom de mégachiroptères ou "Mega-bats" en anglais, avec une envergure d'environ 2 mètres et un poids pouvant atteindre 1 kg. La plupart des chauves-souris utilisent l'écholocation à divers degrés, mais les microchiroptères possèdent une capacité d'écholocation particulièrement avancée.

Les microchiroptères, en majorité insectivores, émettent des ultrasons puissants par la bouche ou le nez. Lorsque ces ultrasons rencontrent un obstacle, qu'il s'agisse d'une proie ou d'une végétation, ils rebondissent vers la chauve-souris. Celle-ci capte l'écho avec ses oreilles, et son cerveau analyse ensuite les informations pour calculer la distance, la vitesse, la position et la forme de l'objet détecté. Les types et les modes d'émission des ultrasons varient considérablement d'un genre à l'autre, voire d'une espèce à l'autre [28].

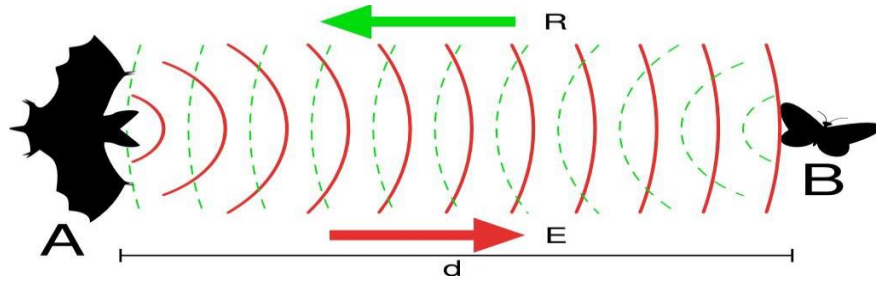


Figure.III.2. Exemple d'écholocation

III.4.2. Algorithme de chauve-souris :

III.4.2.1. Initialisation de l'Algorithme :

Au départ, une population aléatoire de chauves-souris est générée pour un nombre spécifié, N . Pour créer la population initiale, un vecteur à valeurs réelles de dimension D est attribué pour décrire chaque individu, selon l'équation suivante [28] :

$$X_{ij} = X_{\min j} + rand * (X_{\max j} - X_{\min j}) \quad (\text{III.1})$$

Où $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, d$; et sont les limites supérieures et inférieures pour la dimension j de X

III.4.2.2. Solution, fréquence et vitesse :

Dans les simulations, nous utilisons des chauves-souris virtuelles. Nous devons définir les règles de mise à jour de leurs positions X_i et les vitesses V_i , dans un espace de recherche bidimensionnel, à chaque itération t . Parmi toutes les solutions, il existe une meilleure courante X^* . Les règles précédentes peuvent être traduites pour obtenir les nouvelles solutions X_i^t et vitesses V_i^t à l'étape t , par application des équations de mise à jour suivantes [28] :

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \beta \quad (\text{III.2})$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + (X_i^t - X^*) f_i \quad (\text{III.3})$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad (\text{III.4})$$

Où f_i est la fréquence d'émission de la chauve-souris X_i , et qui appartient à la gamme $[f_{\min}, f_{\max}]$ correspondant à la gamme de longueurs d'ondes $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. $\beta \in [0, 1]$ Est un vecteur aléatoire issu d'une distribution uniforme. X^* Est la meilleure solution globale courante qui est

déterminée en comparant toutes les solutions parmi tous les n chauves-souris. La plage de valeurs de la fréquence diffère d'un problème à un autre en fonction du domaine, de la taille du problème, etc. Initialement, chaque chauve-souris reçoit de manière aléatoire une fréquence qui est dérivée uniformément de $[f_{\min}, f_{\max}]$.

Lorsqu'une solution est sélectionnée parmi les meilleures solutions courantes, une nouvelle solution pour chaque chauve-souris est générée localement à l'aide d'une transformation intégrant un facteur aléatoire.

$$X_{new} = X_{old} + \varepsilon A^t \quad \text{(III.5)}$$

Où $\varepsilon \in [-1, 1]$ est un nombre aléatoire, alors que A^t est le volume moyen de toutes les chauves-souris à cette étape de traitement. La mise à jour des vitesses et des positions des chauves-souris est similaire à la procédure d'optimisation standard des essaims de particules [31][32]. Étant donné que le contrôle de la portée du mouvement des particules envahissantes, l'algorithme de chauve-souris peut être considéré comme étant une combinaison équilibrée de l'optimisation standard des essaims de particules et de la recherche locale intensive, contrôlée par le volume et le taux de pulsation.

III.4.2.3. Génération de la population initiale :

Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de convergence de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si des informations a priori sur le problème sont disponibles, il est naturel de générer les individus dans un sous domaine particulier afin d'accélérer la convergence [28].

III.4.2.4. Fonction d'évaluation :

La fonction d'évaluation (*coût*) est généralement l'étape dans laquelle on mesure la performance de chaque individu. Pour pouvoir juger la qualité d'un individu et ainsi le comparer aux autres, il faut établir une mesure commune d'évaluation. Aucune règle n'existe pour définir cette fonction, son calcul peut ainsi être quelconque, que ce soit une simple équation ou une fonction affine. La manière la plus simple est de poser la fonction d'adaptation comme la formalisation du critère d'optimisation [28].

III.4.2.5. L'algorithme standard de chauve-souris :

En se basant sur ces règles et ces explications, les étapes basiques de l'algorithme De BAT [28] :

Algorithme : Optimisation par l'algorithme de chauve-souris (Bat)

1 : Définir la Fonction objective : $f(x)$, $X = (x_1, \dots, x_d)$;

2 : Initialiser la position de chauve-souris x_i et la vitesse $v_i, i = 1, 2, \dots, n$;

3 : Définir la fréquence f_i de chaque position x_i ;

4 : Initialiser le taux de pulsation r_i et l'intensité A_i ;

5 : **Tant que** ($t < \text{nombre maximum d'itérations}$) ;

➤ Générer de nouvelles solutions en ajustant la fréquence et en actualisant les vitesses et les positions / solutions. (Équations II.2, II.3 et II. 4).

➤ **Si** ($\text{rand} > r_i$)

Sélectionnez une solution parmi les meilleures solutions

Générer une solution locale autour de la meilleure solution sélectionnée x_i (l'éq II.5)

Fin Si

➤ Générer une nouvelle solution en volant aléatoirement

➤ **Si** ($(\text{rand} < A_i) \text{ et } f(x_i) < f(x^*)$)

Incrémenter r_i et réduire A_i

Fin Si

➤ Classer les chauves-souris et trouver la meilleure solution x^*

6 : **Fin Tant que**

7 : Afficher les résultats donnés par la meilleure solution x^*

III.4.3. Résultat de La simulation en utilisant l'algorithme BAT :

Pour étudier de l'influence de choix des paramètres de l'algorithme BAT sur le résultat d'optimisation, plusieurs tests ont été effectués.

Le premier cas : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.2) :

<i>Max_iter</i>	<i>N</i>	<i>Dim</i>	<i>alpha</i>	<i>gamma</i>	r_0
90	30	5	0.7	078	0.2

Tableau (III.2). les paramètres d'algorithme BAT pour le premier cas .

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.3) et(III.4).

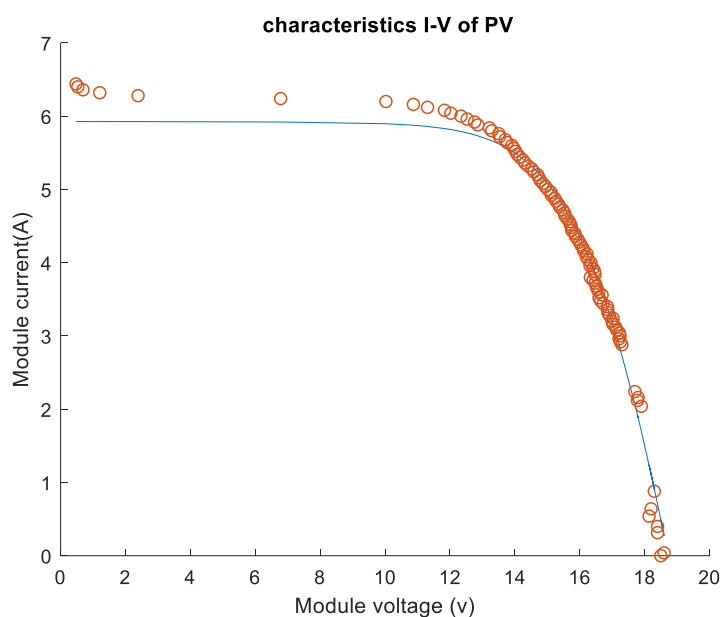


Figure.III.3. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).

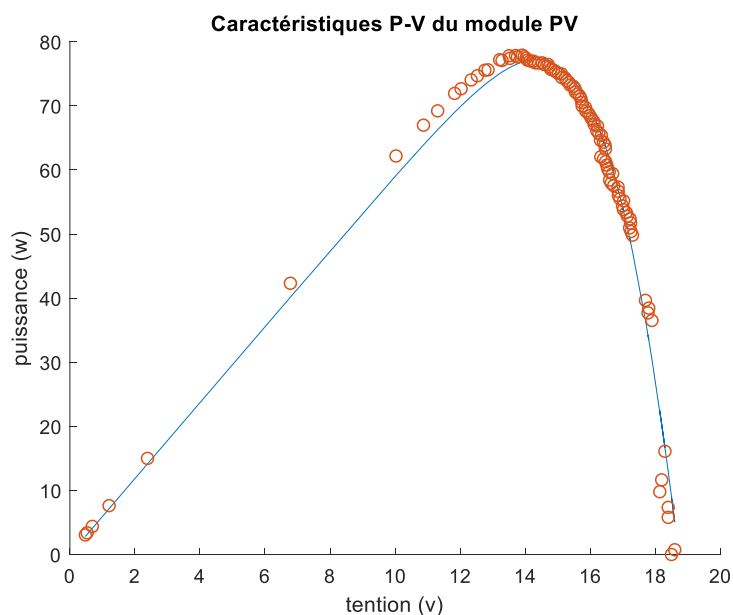


Figure III.4. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).

Le deuxième cas : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.3) :

Max_iter	N	Dim	$alpha$	$gamma$	r_0
-------------	-----	-------	---------	---------	-------

1000	25	5	0.8	0.8	0.01
------	----	---	-----	-----	------

Tableau (III.3). les paramètres d’algorithm BAT pour le deuxième cas.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.5) et (III.6).

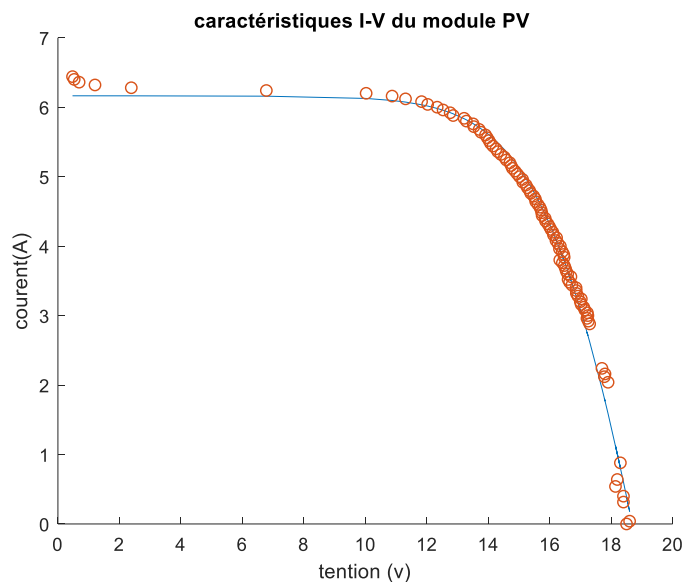


Figure III.5. Caractéristiques I-V du system PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).

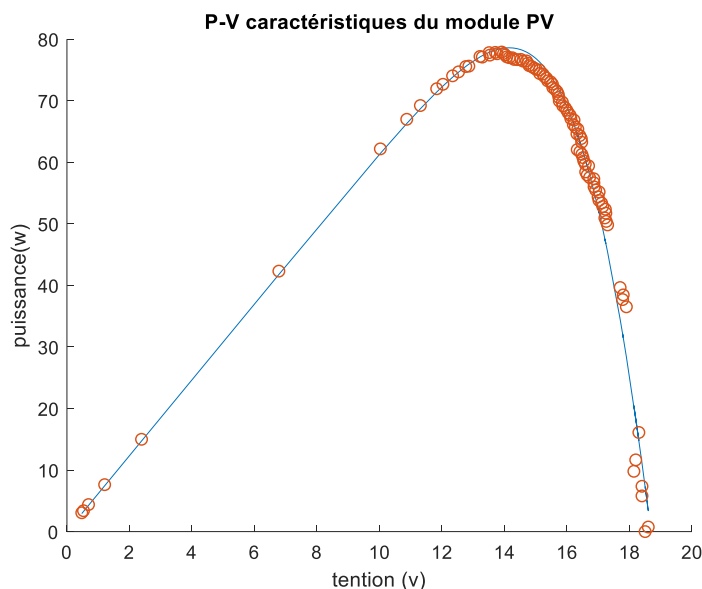


Figure III.6. Caractéristique P – V du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).

Le troisième cas : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.4) :

<i>Max_iter</i>	<i>N</i>	<i>Dim</i>	<i>alpha</i>	<i>gamma</i>	<i>r₀</i>
50	20	5	0.8	0.8	0.1

Tableau (III.4). les paramètres d’algorithmem BAT pour le troisième cas.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.7) et (III.8).

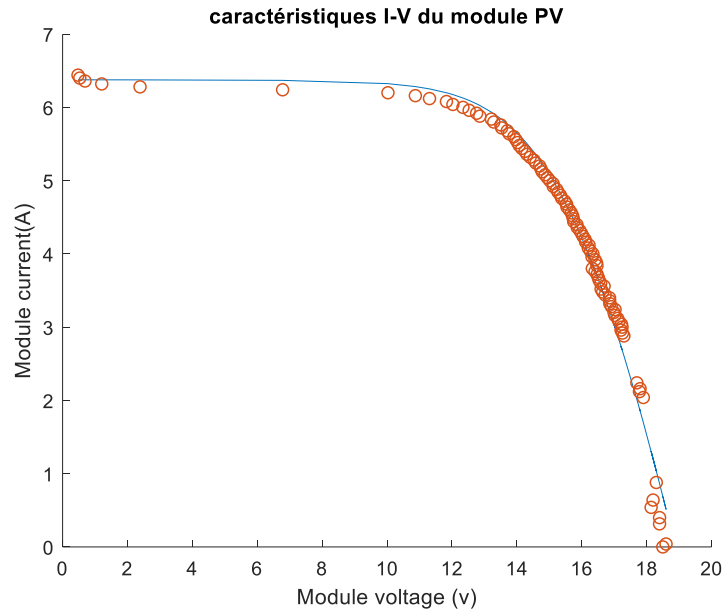


Figure III.7. Caractéristiques I-V du system PV réel et celle du modèle mathématique à un diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).

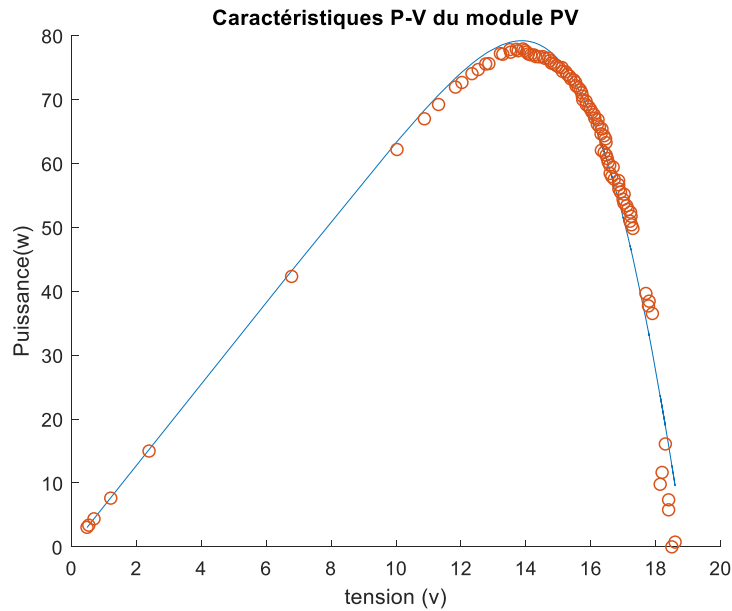


Figure III.8. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).

Les performances de modélisation basées sur l’erreur quadratique moyenne sont données dans le tableau (III.5) :

Cas	I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
Cas 1	5.9282	4.7119e-06	0.2180	1.3348e+03	1.3081	0.0369
Cas 2	6.1647	1.0000e-05	0.2310	3.0907e+03	1.3751	0.0244
Cas 3	6.3775	8.4721e-06	0.3244	2.3993e+03	1.3693	0.0378

Tableau (III.5). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres pour les trois cas.

Les résultats obtenus montrent que les performances de modélisation par l'algorithme BAT sont largement dépendantes de la bonne choix des paramètres initiaux.

Le meilleur résultat est obtenu dans le deuxième cas dont les paramètres de modèle sont $I_{ph} = 6.1647$ et $I_0 = 1.000e - 05$, et $R_s = 0.2310$, et $R_p = 3.0907e + 03$, et $A = 1.3751$, avec une erreur quadratique moyenne de $MSE = 0.0244$.

III.5. L'algorithme d'Essaim de Particulaire (PSO) :

III.5.1. Définition :

Particle Swarm Optimization (PSO) est un algorithme évolutif qui utilise un groupe de solutions potentielles afin de générer une solution optimale à un problème donné. Les créateurs de cet algorithme, Russel Eberhart et James Kennedy, respectivement ingénieur électricien et socio-psychologue, l'ont introduit en 1995. Le concept de PSO était à l'origine dérivé du monde naturel, en particulier du comportement social des animaux en essaims, tels que bancs de poissons et nuées d'oiseaux. La dynamique de mouvement de ces animaux est relativement complexe, bien que chaque individu ait une intelligence limitée et une connaissance locale de sa position dans l'essaim. La décision de déménager est déterminée par la mémoire de l'individu et les informations locales [33].

La population dans l'algorithme PSO est nommée essaim, chaque individu du groupe est dit particule. Le déplacement de toute particule est régi par des règles et conditions bien spécifiques, influencé par le mouvement des autres particules du voisinage. Dans un tel contexte ce déplacement à une signification et doit parallèlement répondre à une logique, fondement même du PSO, il consiste à chercher un optimum dans un voisinage donné, ce déplacement est influé par les trois composantes suivantes :

- Une composante d'inertie : la particule s'efforce de suivre instinctivement son cap de déplacement.
- Une composante cognitive : la particule fait tout pour se diriger vers la meilleure position rencontrée jusqu'à présent.
- Une composante sociale : la particule s'inspire également de l'expérience, du parcours des autres particules, pour se diriger vers la meilleure position rencontrée par ses voisins [34].

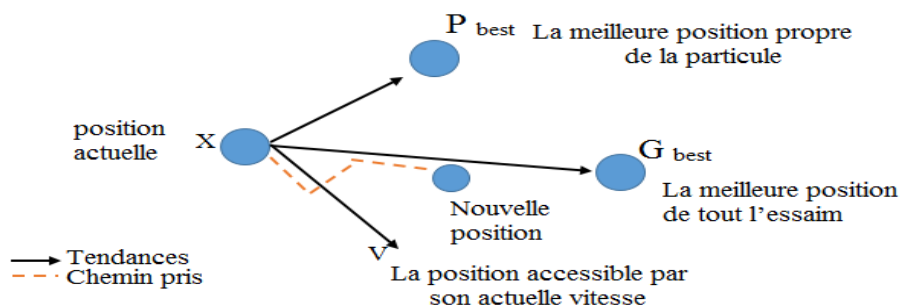


Figure III.9. Structure de PSO.

III.5.2. Mode de fonctionnement :

L'algorithme PSO décrit ci-dessous est celui qui considère le voisinage d'une particule comme étendu à toute la population [35] :

1. Création d'une population P de N particules réparties sur l'espace de recherche ε .
2. Chaque particule $p_i \in P$ est évaluée à l'aide d'une fonction de fitness f mesurant l'adéquation de cette solution potentielle avec le problème, qu'on cherche de $f(x)$.
3. Si la position x_i de la particule i est meilleure au sens de la fonction de fitness que sa meilleure position jamais rencontrée P_{Best} , mettre à jour P_{Best} .
4. Déterminer la meilleure particule G_{Best} parmi la population courante, c'est-à-dire :

$$G_{Best} = (P_{Best})$$

5. Mettre à jour la vitesse $v_i(it+1)$ de chaque particule i selon la règle suivante :

$$v_i(it+1) = \omega v_i(it) + c_1 r_1 (P_{Best,i}(it) - x_i(it)) + c_2 r_2 (G_{Best,i}(it) - x_i(it)) \quad (\text{III.6})$$

L'inertie ω est définie par l'équation :

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \quad (\text{III.7})$$

6. Déplacer les particules à leur position $x_i(it+1)$:

$$x_i(it+1) = x_i(it) + v_i(it+1) \quad (\text{III.8})$$

7. Reboucler sur la seconde étape (pour $t+1$) jusqu'à ce qu'un critère de fin soit vérifié.

Avec :

- v_i : est la vitesse de particule i .
- x_i : est la position de la particule i .
- ω : est le coefficient d'inertie.
- c_1, c_2 : sont deux constantes d'accélération $c_1 = c_2 \in [0; 4]$.
- r_1, r_2 : sont deux variables aléatoires uniformes sur $[0; 1]$
- $P_{Best}(t)$: est la meilleure solution de la particule i .

- $G_{Best}(t)$: est la meilleure solution dans le voisinage (toutes les particules).
- N : est le nombre des particules.
- ω_{max} : l'inertie initial et ω_{min} : l'inertie final.
- $iter_{max}$: le maximum de nombre d'itération. $iter$: le numéro d'itération actuelle

III.5.3. L'algorithme standard de l'Essaim Particulaire (PSO) :

En se basant sur ces règles et ces explications, les étapes basiques de l'algorithme des PSO :

Algorithme : Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) ou (PSO)

- 1 : Initialiser aléatoirement P_s particules : position et vitesse ;
- 2 : Evaluer les positions des particules ;
- 3 : **Tant que** le critère d'arrêt n'est pas atteint faire
- 4 : **Pour** $i = 1, \dots, P_s$ faire
- 5 : Déplacer les particules selon (1.5) et (1.6) ;
- 6 : **Si** $f(x_i) < f(p_i)$
- 7 : $p_i = x_i$;
- 8 : **Si** $f(x_i) < f(p_g)$
- 9 : $p_g = x_i$;
- 10 : **Fin Si**
- 11 : **Fin Si**
- 12 : **Fin Pour**
- 13 : **Fin Tant que**

III.5.4. Résultat de La simulation en utilisant l'algorithme PSO :

Pour étudier de l'influence de choix des paramètres de l'algorithme BAT sur le résultat d'optimisation, plusieurs tests ont été effectués.

Cas 1 : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.2) :

Le premier cas : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.6) :

Max	C_1	C_2
500	0.8	0.8

Tableau (III.6). les paramètres d'algorithme de PSO pour le premier cas.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.10) et (III.11).

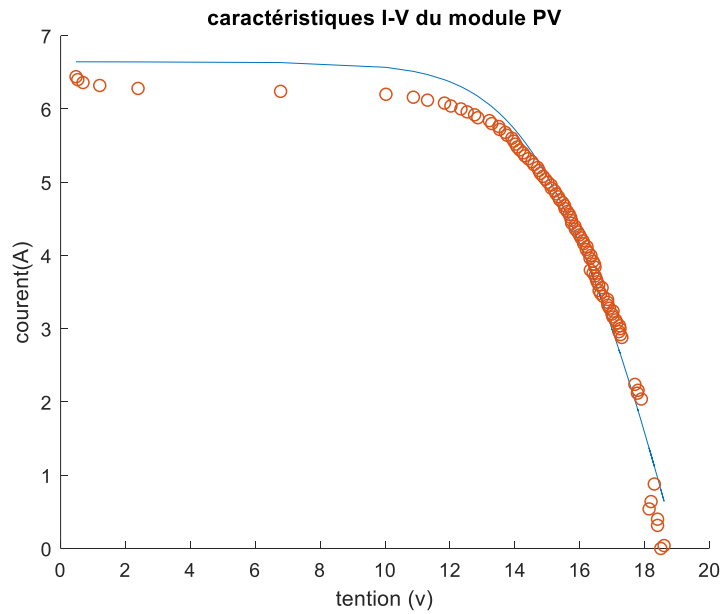


Figure III.10. Caractéristiques I-V du system PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).

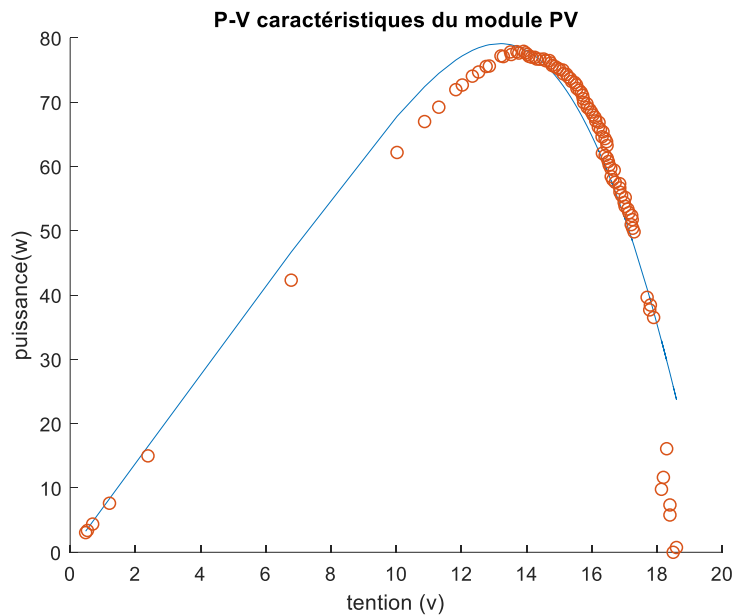


Figure III.11. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).

Deuxième cas : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.7) :

Max	C_1	C_2
1000	0.25	0.25

Tableau (III.7). les paramètres d’algorithmem PSO por le deuxième cas.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.12) et (III.13) :

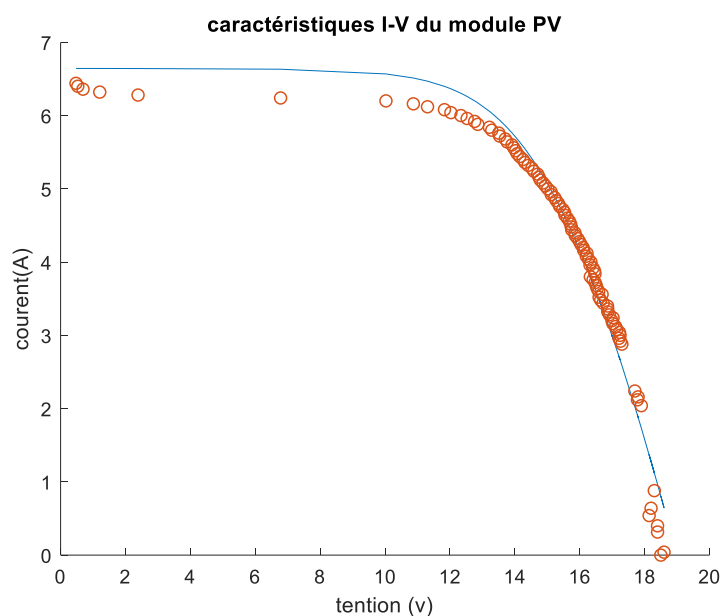


Figure III.12. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).

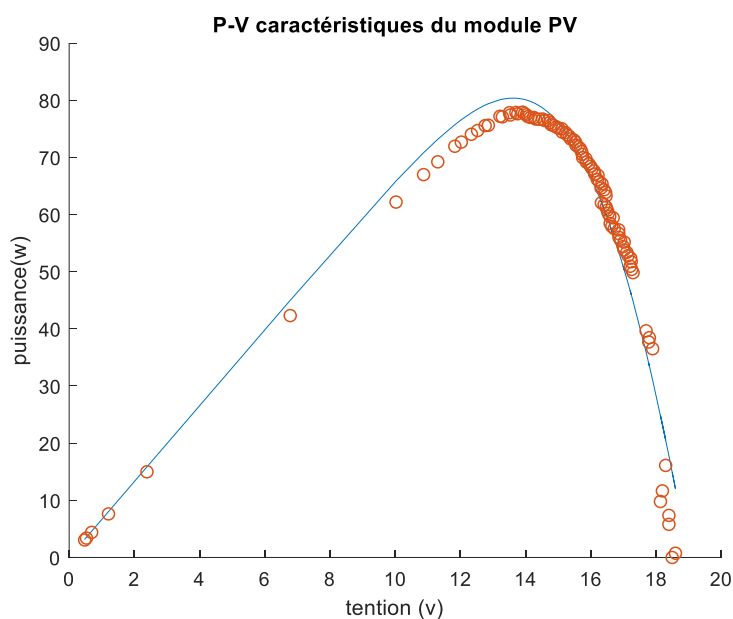


Figure III.13. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).

Le troisième cas : les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau (III.8) :

Max	C_1	C_2
1500	0.5	0.7

Tableau (III.8). les paramètres d'algorithme PSO pour le troisième cas.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.14) et (III.15) :

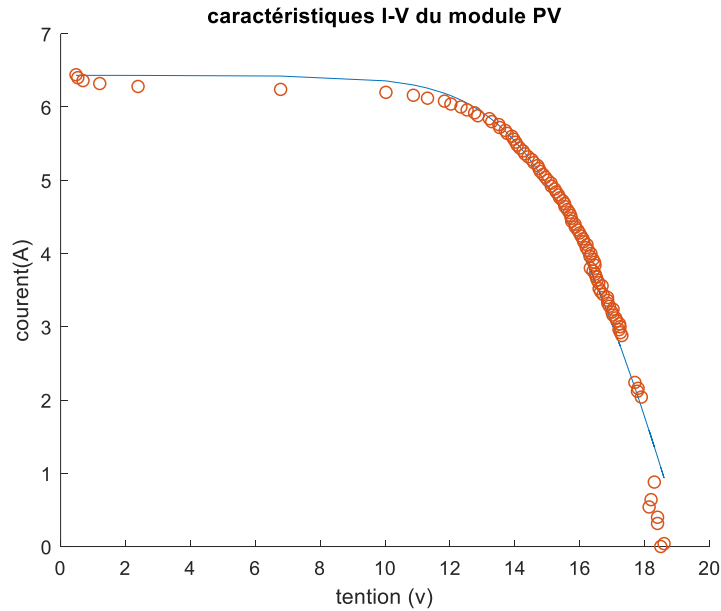


Figure III.14. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).

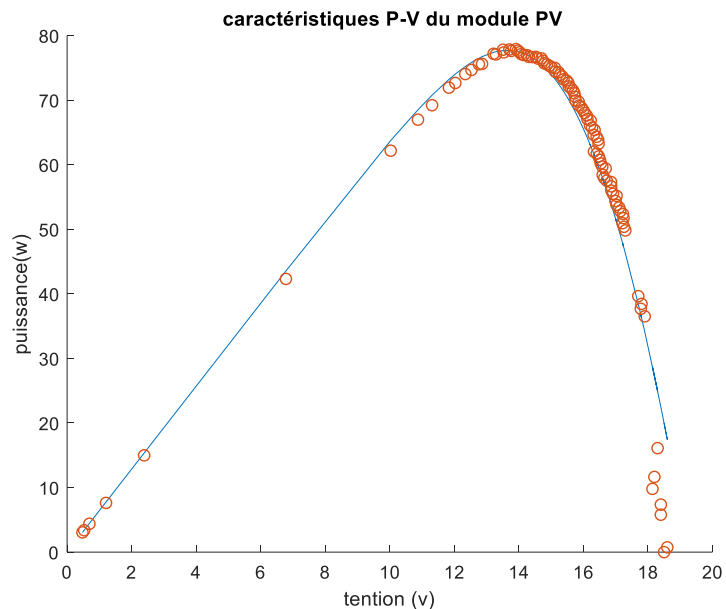


Figure III.15. Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).

Les performances de modélisation basées sur l'erreur quadratique moyenne sont données dans le tableau (III.9) :

Cas	I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
Cas 1	6.9040	4.7119e-06	0.5799	2.9692e+03	1.4333	0.1466
Cas 2	6.6449	1.0000e-05	0.3826	1.8083e+03	1.3900	0.0661
Cas 3	6.4330	1.0000e-05	0.4330	3.0555e+03	1.4109	0.0723

Tableau (III.9). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres pour les trois cas.

Les résultats obtenus montrent que les performances de modélisation par l'algorithme PSO sont largement dépendantes du bon choix des paramètres initiaux.

Le meilleur résultat est obtenu dans le deuxième cas dont les paramètres de modèle sont $I_{ph} = 6.6449$ et $I_0 = 1.000e-05$, et, $R_s = 0.3826$ et $R_p = 1.8083e+03$, et $A = 1.3900$ avec une erreur quadratique moyenne de $MSE = 0.0661$.

III.6. L'algorithme de L'évolution différentielle (DE) :

III.6.1. Définition :

Une nouvelle approche heuristique pour minimiser les fonctions spatiales continues éventuellement non linéaires et non différentiables est présentée. Au moyen d'un banc d'essai étendu, il est démontré que la nouvelle méthode converge plus rapidement et avec plus de certitude que de nombreuses autres méthodes d'optimisation globales acclamées. La nouvelle méthode nécessite peu de variables de contrôle, est robuste, facile à utiliser et se prête très bien au calcul parallèle [36].

L'évolution différentielle est un algorithme à population, constituée de NP individus.

Un individu $x_{i,G}$ est un vecteur de dimension D , ou D est la dimension du problème et G représente la génération. Une population initiale $x_{i,0}$; $i \in \{1, 2, \dots, NP\}$ est créée par tirage aléatoire. L'algorithme effectue alors l'évolution de la population jusqu'à convergence.

L'évolution se traduit itérativement par la création d'une nouvelle génération à partir des individus de la génération en cours, en appliquant les opérations de mutation et de croisement.

La sélection s'exécute alors pour ne garder à la génération suivante que les meilleurs individus. Les différentes opérations impliquées dans la création d'une nouvelle génération sont les suivantes [36] :

III.6.2. Mutation :

Pour chaque individu cible $x_{i,G}$, un vecteur mutant $v_{i,G+1}$ est engendré selon :

$$v_{i,G+1} = x_{r_1,G} + F \cdot (x_{r_2,G} - x_{r_3,G}) \quad (\text{III.9})$$

Où $r_1 = r_2 = r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ sont trois entiers différents entre eux et différents de i . Dans l'équation (1), F une constante appelée facteur d'ampliation qui contrôle l'amplitude de la différence $(x_{r_2,G} - x_{r_3,G})$.

III.6.3. Croisement :

Après la mutation, une opération de croisement entre les individus $v_{i,G+1}$ et $x_{i,G}$ est effectuée afin d'introduire de la diversité. Pour un opérateur de croisement binomial (bin), un vecteur $u_{i,G+1} = \{u_{1i,G+1}, \dots, u_{Di,G+1}\}$ est généré par l'équation suivante :

$$u_{i,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1} & \text{si } (rand_j(0,1) \leq CR) \text{ ou } (j = rnbr(i)) \\ x_{ji,G} & \text{si } (rand_j(0,1) > CR) \text{ ou } (j \neq rnbr(i)) \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

$$\forall j \in \{1, \dots, D\}$$

Ici, $rand_j(0,1)$ est un nombre aléatoire $\in [0;1]$ tiré selon une loi de distribution uniforme pour la dimension j . $CR \in [0;1]$, est une constante appelée taux de croisement et $rnbr(i)$ est un indice de dimension choisi aléatoirement permettant de s'assurer qu'au moins un paramètre de l'individu mutant $v_{i,G+1}$ est transmis à $u_{i,G+1}$.

III.6.4. Sélection :

Afin de déterminer si l'individu généré appartiendra à la génération suivante $G+1$ de la population, un critère de sélection est appliqué. Pour un problème de minimisation, on a :

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1} & \text{si } f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Cet algorithme possède donc un nombre restreint de paramètres : la taille de la population NP ainsi que les coefficients F et CR . La taille de la population NP permet, lorsque sa valeur est élevée,

de davantage explorer l'espace de recherche et augmente la diversité de directions possibles (i.e. les différences entre paires d'individus). Néanmoins, une valeur élevée diminue la capacité de convergence de l'algorithme. Le paramètre CR contrôle l'influence de l'individu cible, F influe sur l'importance de la trajectoire (i.e. la différence calculée en équation (1.1)) [36].

III.6.5. L'algorithme standard de L'évolution différentielle :

Algorithme : Optimisation par L'évolution différentielle

```

1 : Phase d'initialisation de la population, G=0
2 : Initialisation des N individus selon une distribution uniforme
3 : // Phase d'évolution de la population
   while critère de fin non satisfait do
5 : // Création de la (G + 1)ieme génération
   For i = 1 : NP do
       Sélection aléatoire de trois individus distincts de  $x_i$  et distincts en entre eux :
            $x_{r1,G}, x_{r2,G}, x_{r3,G}$ 
6 : // Mutation : Génération de l'individu  $v_{i,G+1}$ , selon (III.9)
7 : // Croisement : Création de l'individu  $u_{i,G+1}$ , selon (III.10)
8 : // Sélection : For i = 1 : NP do
            $x_{i,G+1}$  Devient le meilleur individu entre  $u_{i,G+1}$  et  $x_{i,G}$  selon (III.11)

```

III.6.6. Résultat de La simulation en utilisant l'algorithme DE :

Pour étudier l'influence de l'initialisation de la population sur les performances de modélisation plusieurs cas ont été testés.

Dans cette partie :

$L = [1 \ 0.1 \ 100 \ 1 \ 1e-12]$.

$H = [2 \ 2 \ 5000 \ 8 \ 1e-5]$.

Le premier cas : les positions de la population initiale sont données comme suit :

$$pop(i, j) = L(i) + (H(i) - L(i)) * 1200rand(1, 1);$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.16) et (III.17) :

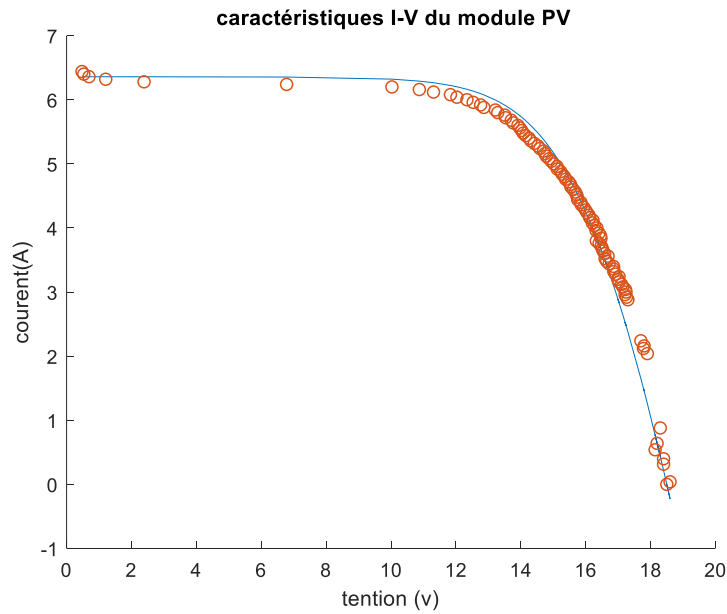


Figure III.16. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).

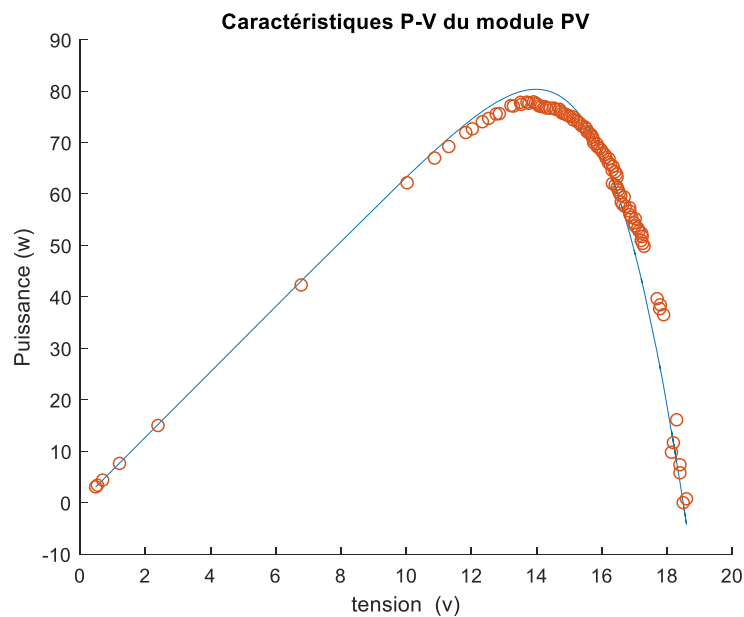


Figure III.17. Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus (**cas1**).

Le deuxième cas : les positions de la population initiale sont données comme suit :

$$pop(i, j) = L(i) + (H(i) - L(i)) * 800 * rand(1, 1);$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.18) et (III.19).

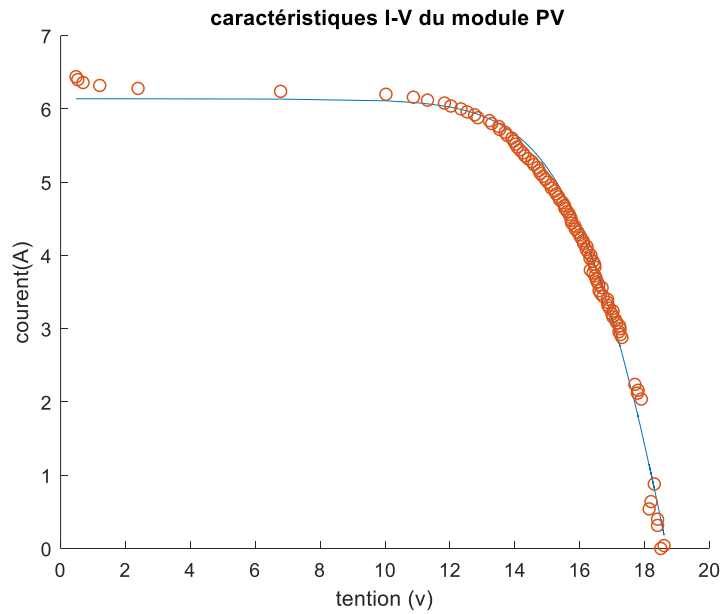


Figure III.18. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas2**).

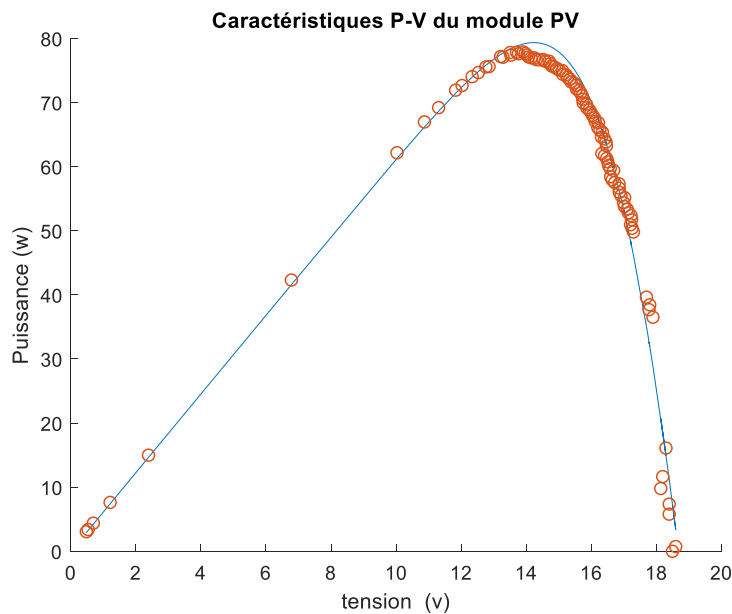


Figure III.19. Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus (**cas 2**).

Le troisième cas : les positions de la population initiale sont données comme suit :

$$pop(i, j) = L(i) + (H(i) - L(i)) * 800rand(1,1);$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figures (III.20) et (III.21).

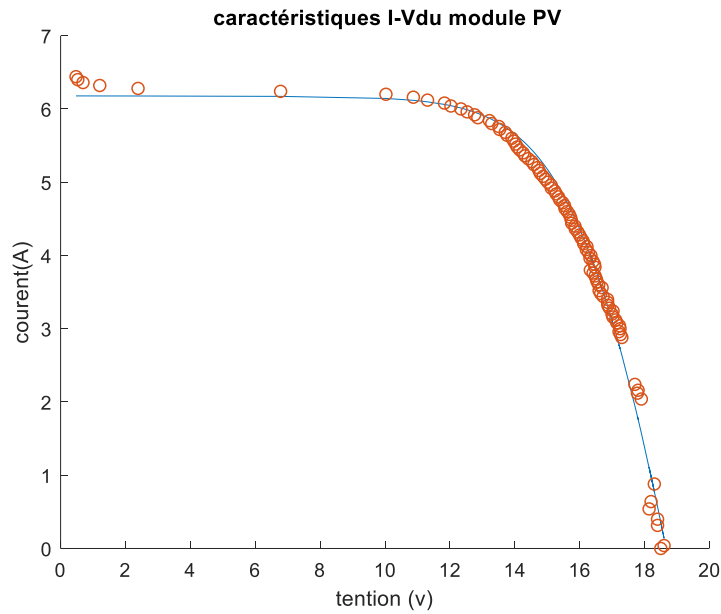


Figure III.20. Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus (**cas 3**).

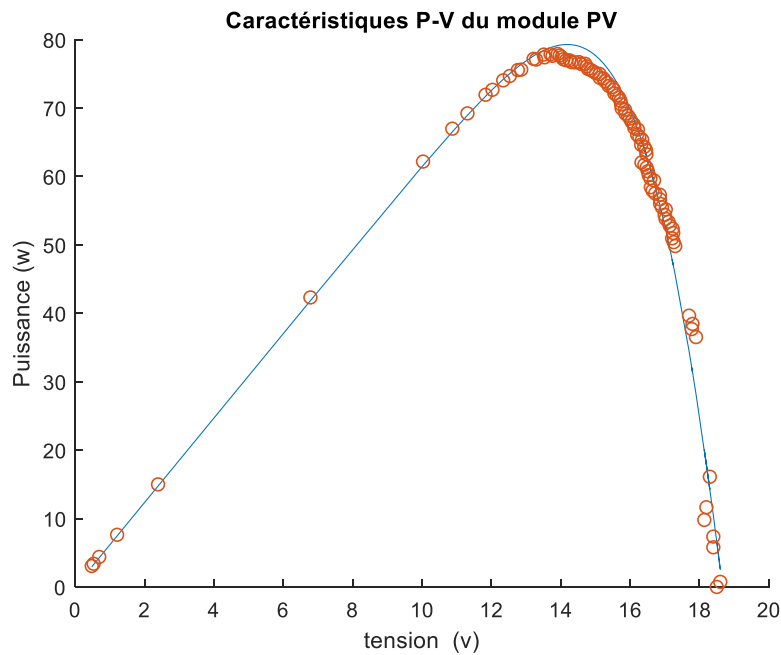


Figure III.21. Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus (**cas3**).

Les performances de modélisation basées sur l'erreur quadratique moyenne sont données dans le tableau (III.10) :

Cas	I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
-----	----------	-------	-------	-------	-----	-------

Cas 1	6.3597	6.3258e-06	0.2402	4.4373e+03	1.3133	0.0586
Cas 2	6.1400	3.3740e-06	0.2406	2.1057e+03	1.2718	0.0298
Cas 3	6.1787	5.8937e-06	0.2319	1.7615e+03	1.3210	0.0273

Tableau (III.10). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres pour les trois cas.

Les résultats obtenus montrent que les performances de modélisation par l'algorithme DE sont largement dépendantes du bon choix des paramètres initiaux.

Le meilleur résultat est obtenu dans le troisième cas dont les paramètres de modèle sont $I_{ph} = 6.1400$ et $I_0 = 1.000e-05$, $R_s = 0.2319$, et $R_p = 1.7615e+03$, et $A = 1.3210$ avec une erreur quadratique moyenne de $MSE = 0.0273$.

Algorithme	I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
BAT	6.1647	1.0000e-05	0.2310	3.0907e+03	1.3751	0.0244
PSO	6.6449	1.0000e-05	0.3826	1.8083e+03	1.3900	0.0661
DE	6.1787	5.8937e-06	0.2319	1.7615e+03	1.3210	0.0273

Tableau (III.11). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres des trois algorithmes.

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme d'optimisation BAT peut être efficacement utilisé pour l'identification des paramètres de la cellule photovoltaïque.

III.7. La deuxième application :

L'étude expérimentale a été réalisée sur un panneau solaire de type *ISOFOTON I – 50 PV* représenté dans la figure II.22 [37]. Ses caractéristiques électriques typiques sont récapitulées dans le Tableau (III.12) ci-dessous :

Paramétré	Valeur correspondante
Puissance maximal	39.10 W
Tension optimale	14.9 V
Courant optimal	2.62 A
Nombre de cellules	36

Tableau (III.12). Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.

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

- La température absolue $T = 305.12$ K.
- L'éclairement solaire $G = 761.28$ W/m².



Figure (III.22). Banc d'essai.

III.7.1. Résultat de La simulation en utilisant l'algorithme BAT :

Pour étudier de l'influence de choix des paramètres de l'algorithme BAT sur le résultat d'optimisation, plusieurs tests ont été effectués. Les meilleurs paramètres obtenus sont donnés dans le tableau (III.13) :

<i>Max_iter</i>	<i>N</i>	<i>Dim</i>	<i>alpha</i>	<i>gamma</i>	r_0
1500	100	5	0.8	0.8	0.2

Tableau (III.13). Les meilleurs paramètres d'algorithme de chauves-souris.

Le deux figures III.23 et III.24 représentent l'erreur d'estimation et les deux courants estimé et réel, respectivement.

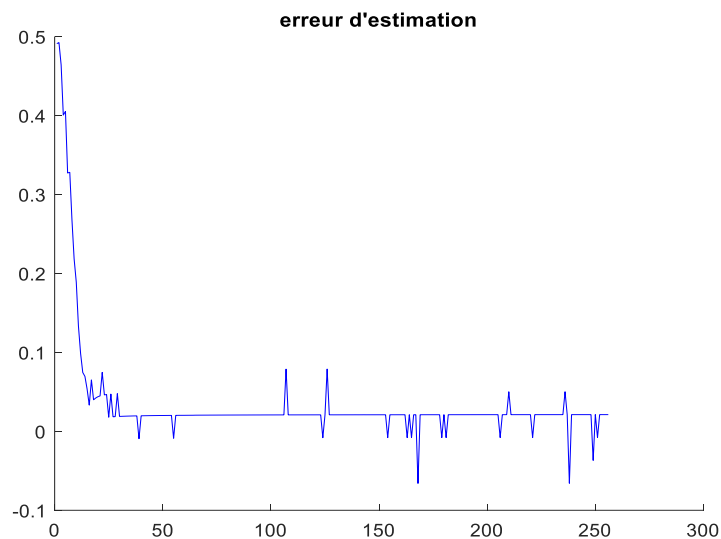


Figure (III.23). Erreur d'estimation

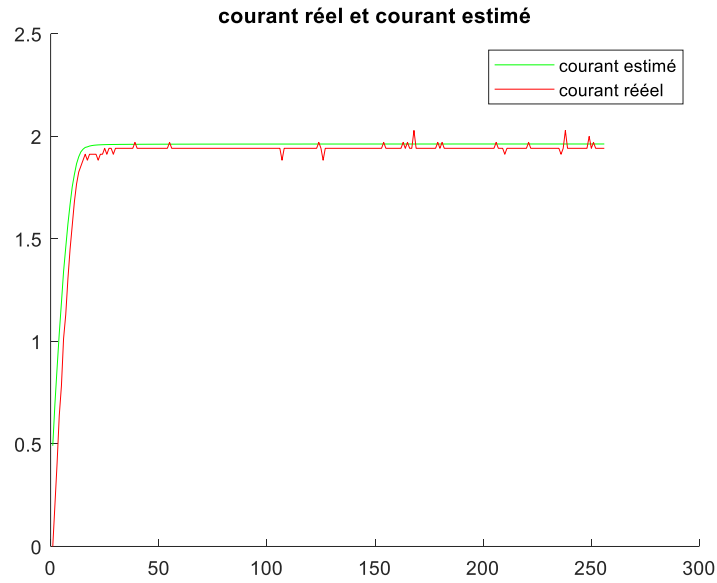


Figure (III.24). Courant réel et courant estimé par le modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus basée sur l’algorithme BAT.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figure (III.25) et (III.26) :

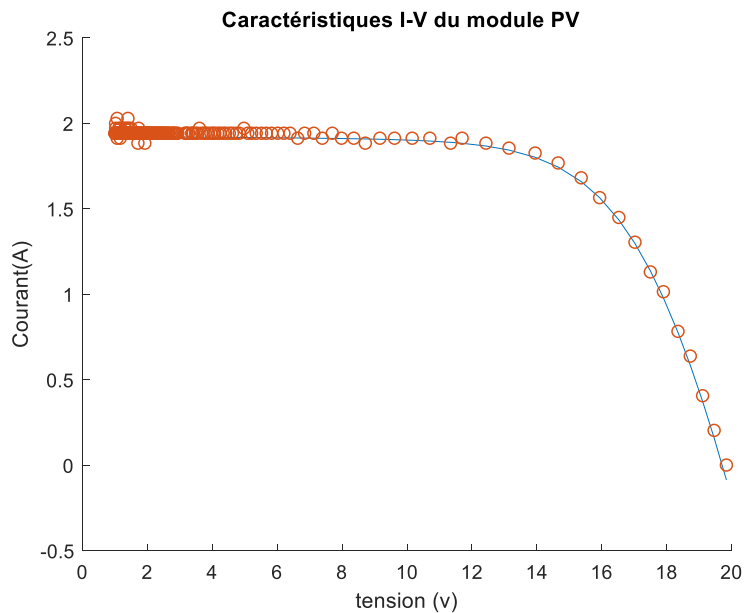


Figure (III.25). Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus.

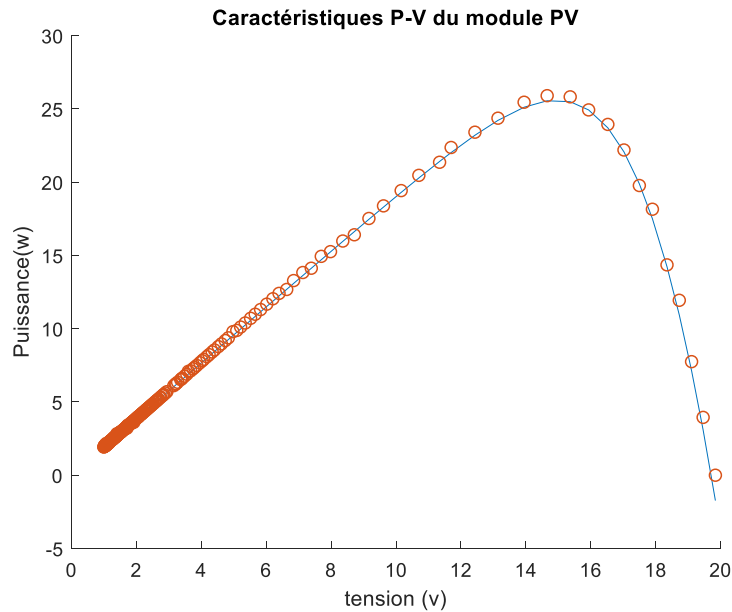


Figure (III.26). Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus.

Les paramètres optimaux du modèle ainsi que l'erreur quadratique moyenne sont données dans le tableau (III.14).

I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
1.9251	5.2817e-06	0.7128	735.2744	1.6830	6.6510e-04

Tableau (III.14). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres obtenus et MSE obtenus par l'algorithme BAT.

Le meilleur résultat est obtenu dans ce cas dont les paramètres de modèle sont $I_{ph} = 1.9251$ et $I_0 = 5.2817e - 06$, et ce avec une erreur quadratique moyenne de $MSE = 6.6510e - 04$.

III.7.2. Résultat de La simulation en utilisant l'algorithme PSO :

Pour étudier l'influence de choix des paramètres de l'algorithme PSO sur le résultat d'optimisation, plusieurs tests ont été effectués. Les meilleurs paramètres obtenus sont donnés dans le tableau (III.15) :

Max	C_1	C_2
500	0.8	0.2

Tableau (III.15). les paramètres d'algorithme de PSO .

Les deux figures III.27 et III.28 représentent l'erreur d'estimation et les deux courants estimé et réel, respectivement.

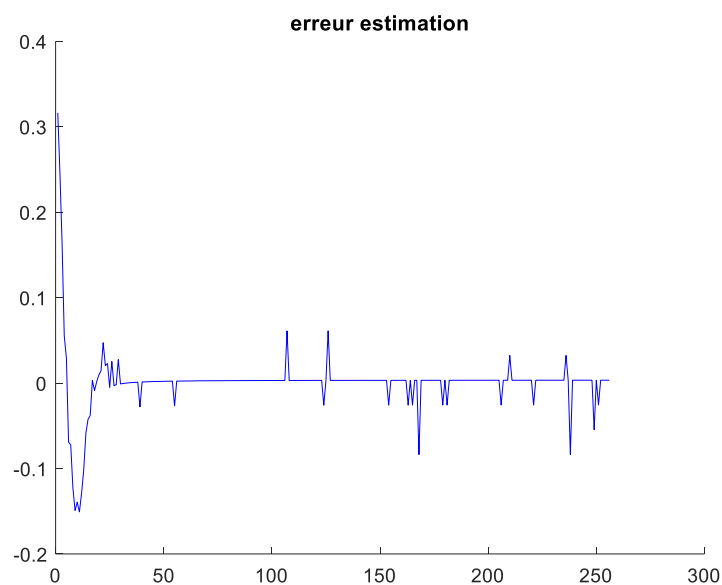


Figure (III.27). Erreur d'estimation obtenue par PSO.

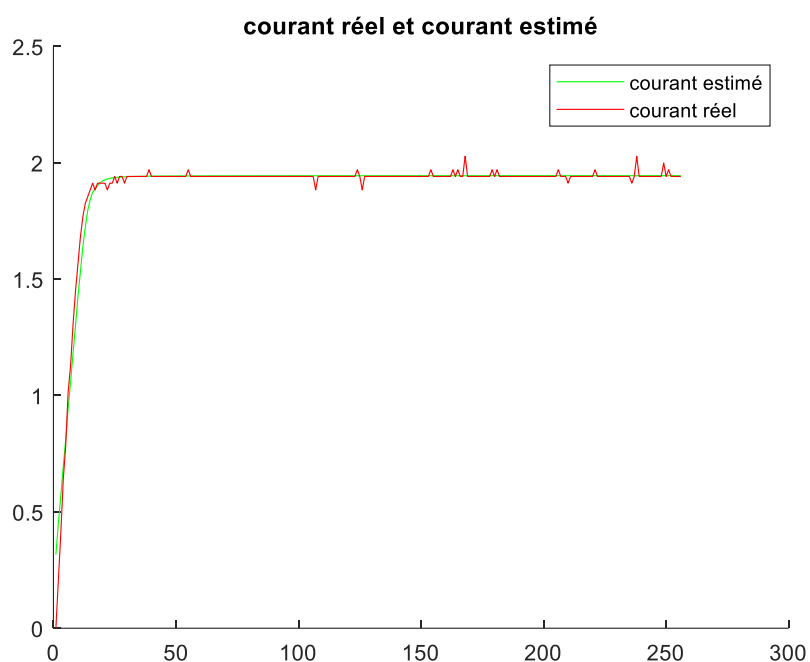


Figure (III.28). Courant réel et courant estimé par le modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus en se basant sur l'algorithme PSO.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figure (III.29) et (III.30) :

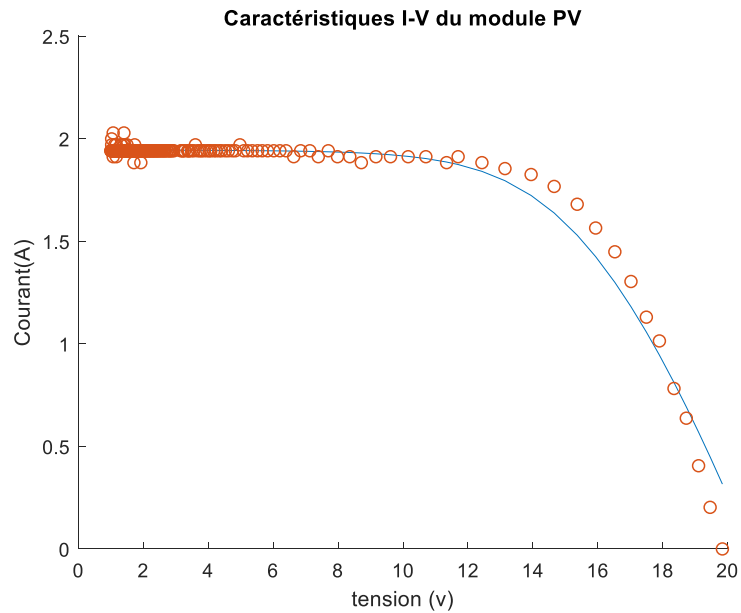


Figure (III.29). Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à un diode comportant cinq paramètres inconnus.

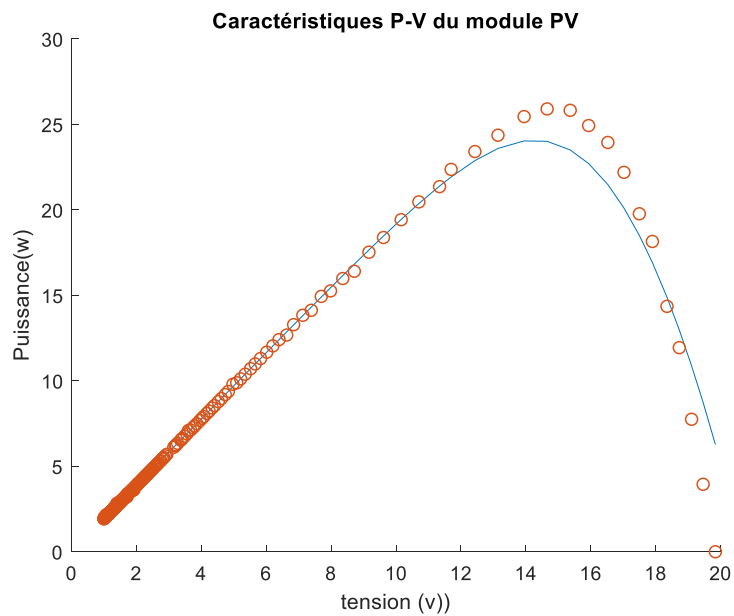


Figure (III.30). Caractéristique $P - V$ du système PV réel et celle du modèle mathématique à une diode comportant cinq paramètres inconnus.

Les paramètres optimaux du modèle ainsi que l'erreur quadratique moyenne sont données dans le tableau (III.16) :

I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
1.9455	1.000e-05	1.7651	4.29455	1.8571	0.0014

Tableau (III.16). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres de l'algorithme PSO.

Le meilleur résultat est obtenu dans le deuxième cas dont les paramètres de modèle sont $I_{ph} = 1.9455$, et $I_0 = 1.000e - 06$, et ce avec une erreur quadratique moyenne de $MSE = 0.0014$

III.7.3. Résultat de La simulation en utilisant l'algorithme DE :

Pour étudier l'influence de l'initialisation de la population sur les performances de modélisation plusieurs cas ont été testés. La meilleure initialisation obtenue est donnée comme suit :

$$pop(i, j) = L(i) + (H(i) - L(i)) * 2000rand(1,1);$$

Avec :

$$L = [1 \ 0.1 \ 100 \ 1e - 12]$$

$$H = [2 \ 2 \ 5000 \ 8 \ 1e - 12]$$

Le deux figures III.31 et III.32 représentent l'erreur d'estimation et les deux courants estimé et réel, respectivement.

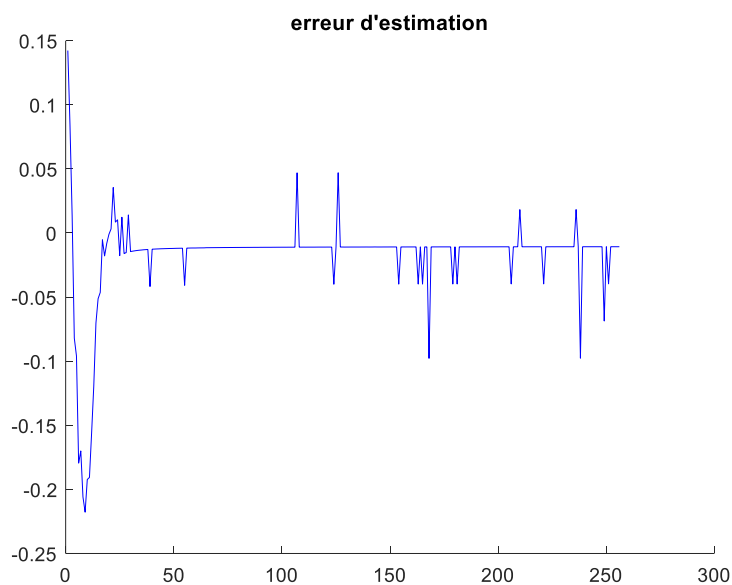


Figure (III.31). Erreur d'estimation obtenue par DE

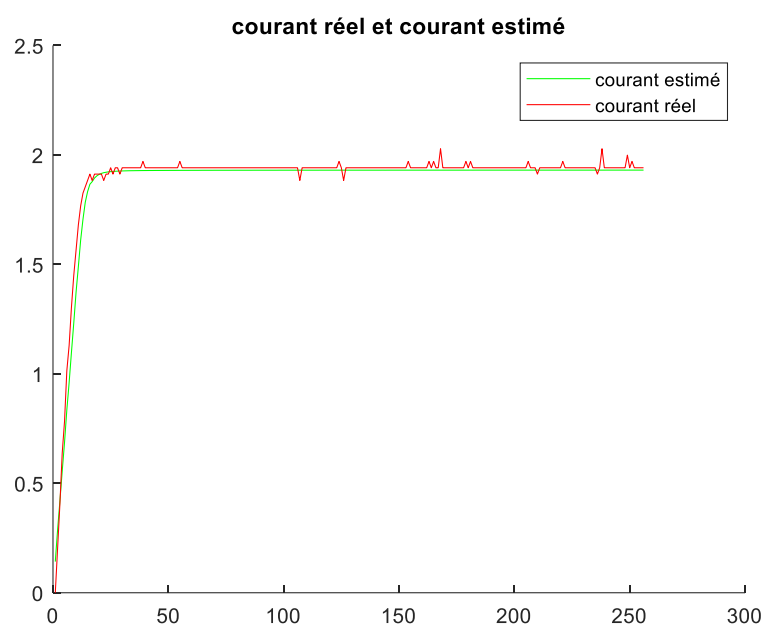


Figure (III.32). Courant réel et courant estimé par le modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus en se basant sur l'algorithme DE.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les deux figure (III.33) et (III.34) :

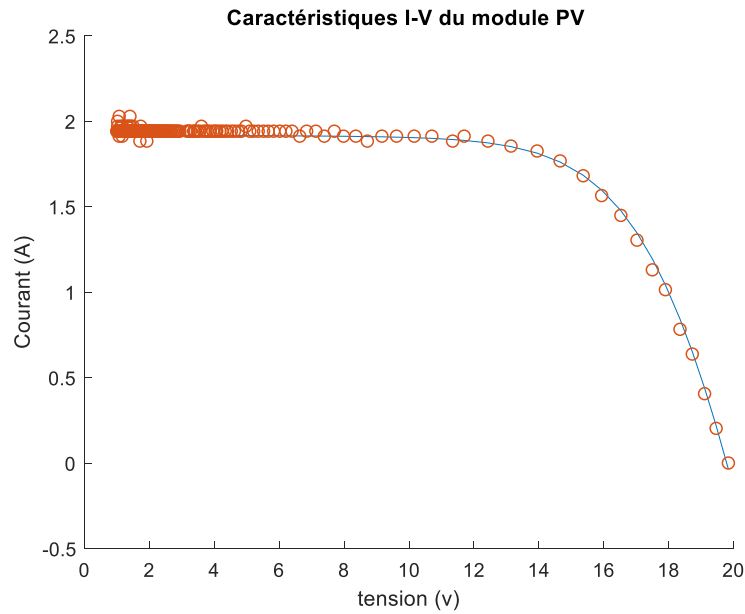


Figure (III.33). Caractéristiques I-V du system PV réel du modèle à une diode comportant cinq paramètres inconnus.

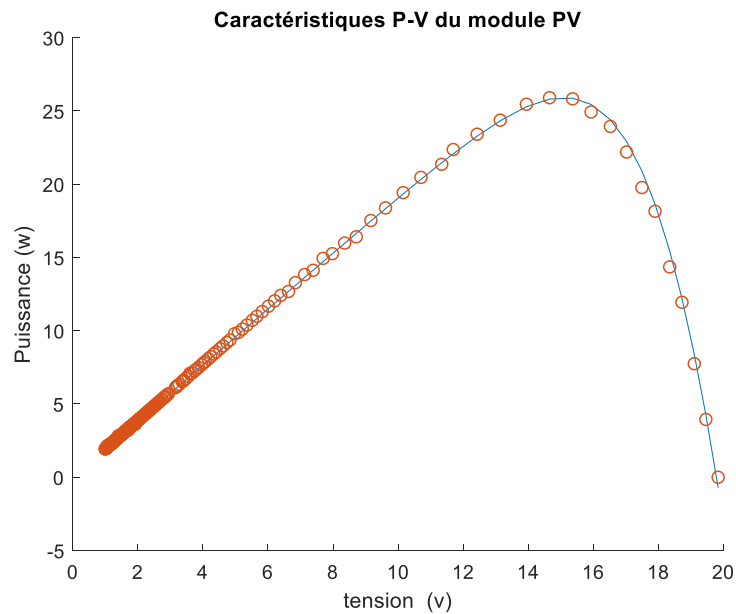


Figure (III.34). Caractéristique $P - V$ du module PV comportant cinq paramètres inconnus.

Les paramètres optimaux du modèle ainsi que l'erreur quadratique moyenne sont données dans le tableau (III.17) :

I_{ph}	I_0	R_s	R_p	A	MSE
1.9186	7.9731e-06	0.6054	1.9341e+03	1.5677	8.0670e-04

Tableau (III.17). Les Paramètres optimaux du modèle PV à cinq paramètres de l'algorithme DE.

Le meilleur résultat est obtenu dont les paramètres de modèle sont $I_{ph} = 1.9186$, et $I_0 = 7.931e - 06$ ce avec une erreur quadratique moyenne de $MSE = 8.0670e - 04$.

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme d'optimisation BAT peut être efficacement utilisé pour l'identification des paramètres de la cellule photovoltaïque

III.8. Conclusion :

Ce chapitre présente l'application de de trois techniques d'optimisation, l'algorithme BAT PSO, et DE, pour estimer les paramètres inconnus d'une cellule et d'un panneau solaire à un diode. Des études comparatives avec d'autres techniques sont également présentées afin d'évaluer l'efficacité de l'approche utilisée. La qualité des paramètres identifiés est évaluée et les résultats démontrent la haute performance de l'approche appliquée, la précision élevée des paramètres estimés, ainsi qu'une bonne concordance entre la courbe I (V) calculée et les données expérimentales I (V).

Les résultats des simulations permettent de conclure que les méthodes d'identification BAT, PSO et DE son très efficaces pour effectuer une recherche globale, et que l'algorithme BAT présente une vitesse de convergence très rapide grâce à l'utilisation de quelques paramètres.

Conclusion Générale

L'optimisation des paramètres pour un modèle photovoltaïque (PV) est une étape cruciale pour améliorer la précision et les performances du modèle. Cette optimisation vise à ajuster les paramètres du modèle afin qu'ils correspondent aux performances réelles du panneau solaire. Ce travail a permis de mettre en évidence une approche mathématique basée sur l'algorithme d'optimisation BAT pour estimer les cinq paramètres d'un modèle basé sur une diode.

Les résultats obtenus par l'application de la méthode proposée ont été comparée par les celles obtenus en utilisant les deux algorithmes PSO et DE.

Dans ce travail nous avons aussi étudié l'influence des paramètres de chaque algorithme d'optimisation sur les performances de modélisation basées sur l'erreur quadratique moyenne. Il s'est avéré que les performances de modélisation sont dépendantes de la bonne chois des paramètres de chaque algorithme ainsi que des positions initiales.

Les résultats obtenus montrent que l'emploi de l'algorithme BAT PV offre une approche puissante et efficace pour l'identification et l'optimisation des paramètres des systèmes PV. Cette méthode permet d'obtenir des solutions plus proches de l'optimum global et de mieux répondre aux exigences spécifiques des applications photovoltaïques.

Références Bibliographies

- [1] Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », thèse doctorat, université de Constantine.
- [2]
- [3] J. Bernard, Energie solaire calcul et optimisation, 1ère édition, ELLIPES, Paris, 2004.
- [4] Ibrahim Tahraoui et Amine Halil. Dimensionnement et Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique. Mémoire de master. Université de Tlemcen, Algérie, 2017.
- [5] Khoudrane Ismail. Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques. Mémoire de master .Université Kasdi Merbah – OUARGLA, algérie,2014.
- [6] Sekhri Toufik, Mémoire de fin d'étude, « Etude comparatif entre deux concentrateur solaire” Université de Ouargla, 2012.
- [7] Othmane Benseddik, Fathi Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université Kasdi Marbah- Ouargala, 2012
- [8] Sylvain et Brigand, « Installation solaire photovoltaïque », Février 2011.
- [9] Bensaci Wafa. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT. Mémoire de master. Université de Ourgla, Algérie, 2012.
- [10] Daoud Amine « Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire » Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, 17/09/2013.
- [11] Anne Labouret et Michel Viloz . Énergie solaire photovoltaïque. 2émé Edition.2005.page :304.
- [12] Yassine Lasmi. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) D'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Mémoire de magister. Université de Sétif, Algérie, 2013.
- [13] « Energie solaire photovoltaïque ».doc / B. Flèche - D. Delagnes .2007
- [14] https://sti2d.ecolelamache.org/documents/cellules_photo.pdf.
- [15] Mlle Benhaddouche et Nesrine Fatima. «La Commande d'un système photovoltaïque d'un Satellite ». Mémoire de master. Université de Tlemcen, Algérie, 2014.

- [16] Merabet Abd El Hak. « Dimensionnement d'un système d'alimentation en énergie électrique par voie photovoltaïque pour l'alimentation d'une habitation ». Mémoire de master. Université de Biskra, Algérie, 2018.
- [17] Wackerly, Dennis; Mendenhall, William; Scheaffer, Richard L. (2008). *Mathematical Statistics with Applications*.
- [18] Mr Ferouani Abd Elerouani Abd Elmajid. Etude par Simulation et Modélisation Electriques des Cellules Photovoltaïques en Couche Mince à base de Cu (In, Ga) Se₂(CIGS). Thèse de doctorat. Université de Tlemcen, Algérie, 2016.
- [19] NESRINE KEFIF & SOUMEYA BELHAMICI. PV Module Parameters Identification Using Datasheet and Experimental Data. Mémoire de master, université de Boumerdes, Algérie, 2016.
- [20] Mathworks.fsolve. <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fsolve.html> > consulter le 25/04/2019.
- [21] ZAOUI FARES. Utilisation des énergies renouvelables influence de la température sur les performances du module PV. Thèse de doctorat. Université de Biskra, Algérie, 2016.
- [22] THOMAS, MAMBRINI. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de doctorat. Université de Paris-sud, France, 2014.
- [23] Ismail HADDAD, Modélisation Avancée d'un Panneau Solaire, Mémoire de fin d'étude Pour l'obtention du diplôme de Master Académique, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2019.
- [24] BENGHERBIA Idris, Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque par des techniques d'optimisation métaheuristiques, Mémoire de fin d'études de Master Électrotechnique, Spécialité : Commande Electrique, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA ,2020.
- [25] M. Bachani,"Identification paramétrique de la machine asynchrone", Mémoire de magister Département d'automatique Université des sciences et technologie Mohamed Boudiaf, Oran, Algérie 2012-2013.
- [26] Lyes BELHOUL, "Résolution de problèmes d'optimisation combinatoire mono et multi objectifs par énumération ordonnée, pour l'obtention du grade de docteur en informatique : université Paris-Dauphine, Laboratoire d'analyse et Modélisation de systèmes pour l'aide à la Décision, paris, 2014.
- [27] John Wiley & Sons, MODELING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMSUSING MATLAB, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data,2016.

- [28] X.-S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm," Nat. Inspired Coop. Strateg. Optim. (NICSO 2010), pp. 65–74, 2010.
- [29] X.-S. Yang and X. He, "Bat algorithm: literature review and applications," Int. J. Bio-Inspired Comput., vol. 5, no. 3, pp. 141–149, 2013.
- [30] S. Induja, V.P. Eswar Murthy, Bat Algorithm: An Overview and its Applications, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 5, Issue 1, January 2016.
- [31] M. kebabla, "Utilisation des stratégies Métaheuristiques pour l'ordonnancement des ateliers de type Job Shop", Mémoire Magister, Spécialité : Génie Industriel, 2008
- [32] J. Hao, P. Galinier, M. Habib, "Méta heuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes", Revue d'Intelligence Artificielle, 1999.
- [33] V.cooren, "Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire". Thèse de doctorat applications en génie médical et en électronique. Université de paris 12 val de marne, France. 2008.
- [34] A.bestoui , "Gestion de spectre dans un réseau de radio cognitive en utilisant l'algorithme d'optimisation par essaim de particules", Mémoire de master , Département d'informatique, Université abou bakr belkaid– Tlemcen, Algérie, 2014 – 2015.
- [35] M. meddah, A.hadjadj, "Optimisation de la qualité de service (QOS) dans un réseau GSM en utilisant l'algorithme d'optimisation par essaims de particules (PSO) ", Mémoire de master, Département : informatique, Université Dr. tahar moulay Saida, Algérie, 2018.
- [36] SAHRAOUI Selma, Parallélisation de l'Algorithme à Evolution Différentielle d'optimisation Mono-objectif, Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master académique en Informatique, Université de Mohamed Khider -BISKRA,2020.
- [37] Mohcene Bechouat, Abdelaziz Younsi, Moussa Sedraoui, Youcef Soufi, Laatra Yousfi, Ismail Tabet, Khaled Touafek, "Parameters identification of a photovoltaic module in a thermal system using meta-heuristic optimization methods", International Journal of Energy and Environmental, 2017.