

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électronique

Spécialité instrumentation

Présenté par

Djellab Belgacem

Thème

Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque à l'aide d'une métaheuristique PSO

Proposé par :

- ✓ Mme Boudissa E.
- ✓ Mr Bounekhla M.

Année Universitaire 2020-2021

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH de m'avoir donné la santé, le courage, le temps et la volativité afin de pouvoir réussir ce travail. Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel j'ai bénéficié d'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui je tiens à dire profondément et sincèrement merci.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers ma promotrice Mme Boudissa El Ghalia, d'avoir accepté de m'encadrer durant ce travail et pour ses précieux conseils et ses orientations. J'ai eu le privilège de travailler parmi votre équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs, votre sérieux et votre compétence.

Je remercie très chaleureusement Mr Bounekhla Mohamed pour son soutien, ses précieux conseils, sa contribution à l'amélioration du manuscrit.

Je remercie également tous les membres du jury pour m'avoir honoré par leur présence et pour avoir accepté d'évaluer mon travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

Je tiens à exprimer ma sympathie à mes camarades et mes amis qui m'ont aidé pour le bon achèvement de ce travail et à toute personne qui m'a aidé à atteindre ce point-là.

MERCI.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents

Ma chère femme

Mes enfants AYHEM, ALAA, OUSSAMA

et OMER

Tous mes amis

ملخص: الهدف من هذا العمل هو تحديد المعلمات المميزة للوحة الكهروضوئية (PV) تحت إضاءة ثابتة ودرجات حرارة مختلفة. استخدمنا النموذج الآسي الفردي الذي يتضمن: مولد التيار، وصمام ثنائي التوصيل، ومقاوم متسلسل ومقاوم مواز. يتم تحديد نهج التحديد من خلال الطريقة التحليلية وطرق النقاط الخمس باستخدام طريقة نيوتن رافسون، وتحديد معلمات اللوحة الكهروضوئية بواسطة PSO ، تم تطوير الأخير لتقليل الوظيفة الموضوعية المحددة بواسطة الخطأ المربع بين التيار المقاس وهذا المحسوب. تم تأكيد التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام البيانات التجريبية المسجلة في ثلاث درجات حرارة مختلفة (25 درجة مئوية و50 درجة مئوية و75 درجة مئوية) من خلال التراكب الصحيح للتيارات المقاسة وتلك المحسوبة بواسطة النموذج المعتمد من PV.

الكلمات المفتاحية: تحديد؛ لوحة الضوئية؛ المنهج التحليلي؛ طريقة تحسين سرب الجسيمات.

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

Keywords: Identification; solar panel; analytical method; Particulate Swarm Optimization (PSO) method.

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

Mots clés : Identification ; panneau photovoltaïque ; méthode Analytique ; méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (PSO).

Listes des acronymes et abréviations

R_s	Résistance série (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt (Ω)
I_{ph}	Le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (A)
n_s	Nombre de cellules en série
n_p	Nombre de cellule en parallèle
V_{co}	La tension de circuit ouvert (V)
I_{cc}	Le courant de court-circuit (A)
I_{mp}	Le courant au point de puissance maximale
V_{mp}	La tension au point de puissance maximale
P_{max}	La Puissance maximale
P	Puissance électrique [W]
A	Facteur d'idéalité
PV	Panneau photovoltaïque
STC	Standard Test Condition
I_D	Courant de la diode (A)
V_D	Tension de la diode (V)
V_t	Tension thermique
I_c	Courant calculé (A)
I_m	Courant mesuré (A)
AM	Air masse
CPV	Cellule photovoltaïque
K	Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
λ	Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

c	Célérité de la lumière
T	Température ambiante [K]
η	Rendement
PSO	Particle Swarm Optimization
p_k^i	Position de la particule i au temps k
p_k^g	Position globale dans toutes les particules dans l'essaim à temps k .
V	Tension au borne de la cellule [V]
RMSE	L'erreur quadratique moyenne
IAE	L'erreur absolue individuelle
SIAE	Somme de l'erreur absolue individuelle

LISTES DES MATIERES

Introduction générale	1
I - Généralités sur les chaînes de conversion photovoltaïque.....	5
I. 1 Introduction.....	5
I. 2 Energie solaire	5
I. 3 Rayonnement solaire	6
I. 4 Système photovoltaïque	7
I. 4. 1 Historique	8
I. 4. 2 Effet photovoltaïque.....	9
I. 4. 3 Cellule photovoltaïque	9
I. 4. 4 Différentes technologies de la cellule photovoltaïque	12
a. Silicium monocristallin	12
b. Silicium poly-cristallin.....	12
c. Silicium amorphe.....	13
d. Silicium multi-jonction	14
I. 4. 5 Caractéristiques électriques des cellules et des panneau photovoltaïques.	14
I. 5 Modélisation d'un panneau photovoltaïque	16
I. 5. 1 Le modèle idéal.....	16
I. 5. 2 Modèle a une diode.....	17
I. 5. 3 Modèle à deux diodes	18
I. 6 Modèle du panneau photovoltaïque	20
I. 7 Les panneaux photovoltaïques	21
I. 7. 1 Association des cellules photovoltaïques.....	22
a. Association en série.....	22
b. Association en parallèle	23
c. Association mixte	24
I. 7. 2 Les paramètres d'un panneau photovoltaïque	25

LISTES DES MATIERES

a.	La tension en circuit ouvert V_{co}	25
b.	La courant de court-circuit I_{cc}	25
c.	La puissance maximale P_{max}	25
d.	Le rendement	26
e.	Le facteur de forme	26
I. 8	Protection des panneaux photovoltaïques	27
I. 9	Influence de l'éclairement et la température	28
I. 10	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	29
I. 10. 1	Avantages	29
I. 10. 2	Inconvénients	30
I. 11	Conclusion	31
II -	Technique d'identification basé sur la méthode NR	32
II. 1	Introduction.....	32
II. 2	La Modélisation d'un panneau photovoltaïque.....	32
II. 3	Identification des paramètres d'un cellule photovoltaïque	35
II. 4	Méthode de Newton Raphson	35
II. 4. 1	Cas d'une équation	36
II. 4. 2	Cas d'un système d'équations	36
II. 5	Méthode d'identification analytique	37
II. 6	Méthodes basées sur l'analyse de courbe (I-V)	41
II. 6. 1	Première Méthode qui basé sur la courbe (I-V):	41
a.	Premier point ($V= V_{co}$).....	42
b.	Deuxième point ($I= I_{cc}$).....	42
c.	Troisième point (P_{mp}).....	42
d.	Quatrième point ($[dI/dV]_{I=0}$) :	43
e.	Cinquième point ($[dI/dV]_{V=0}$) :	43

LISTES DES MATIERES

II. 6. 2 Deuxième Méthode qui basé sur la courbe (I-V).....	46
II. 7 Conclusion	49
III - Identification d'un panneau photovoltaïque par PSO.....	51
III. 1 Introduction.....	51
III. 2 Métaheuristique.....	51
III. 2. 1 Métaheuristique à solution unique.....	53
a. La méthode de descente.....	53
b. Recuit simulé	53
c. Recherche tabou	54
d. Le GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)	54
III. 2. 2 Métaheuristique à base de population	55
a. Algorithme génétique (AG)	55
b. Optimisation par colonie de fourmi (OCF)	56
c. Algorithme d'essaim particule (PSO)	56
III. 3 Optimisation par Essaim Particulaire	57
III. 3. 1 Principe général	57
III. 3. 2 Algorithme PSO (PSOA)	58
III. 4 Identification des paramètres d'un PV par (PSO)	59
III. 5 Résultats obtenus par l'algorithme PSO	62
a. L'étude expérimentale	62
Caractéristique expérimentale à T = 25° C.	63
Caractéristique expérimentale à T = 50° C.	64
Caractéristique expérimentale à T = 75° C.	65
b. Les paramètres identifiés par PSO pour les différentes températures : .	66
Les résultats à 25°C.....	67

LISTES DES MATIERES

Les résultats à 50°C.....	70
Les résultats à 75°C.....	73
III. 5. 2 Discussion des résultats.....	76
III. 6 Conclusion	77
Conclusion générale.....	78
Bibliographie	79

LISTES DES FIGURES

Listes des figures de chapitre I

Figure 1- 1: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. 6

Figure 1- 2: Spectre d'émission solaire. 7

Figure 1- 3: Schéma de principe de la conversion photoélectrique..... 9

Figure 1- 4: Cellule photovoltaïque..... 10

Figure 1- 5: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 11

Figure 1- 6: Cellule photovoltaïque monocristallin..... 12

Figure 1- 7: Cellule photovoltaïque polycristalline 13

Figure 1- 8: Cellule photovoltaïque polycristalline 13

Figure 1- 9: Cellule photovoltaïque multi-jonction..... 14

Figure 1- 10: Schéma d'une cellule élémentaire 15

Figure 1- 11: courbe courant-tension (I-V) et puissance P(V) d'une cellule photovoltaïque 15

Figure 1- 12: Circuit électrique de modèle idéal 16

Figure 1- 13 : Circuit électrique de modèle à une diode..... 18

Figure 1- 14: Circuit électrique de modèle à une deux diodes 19

Figure 1- 15: panneau photovoltaïque 21

Figure 1- 16: Caractéristique résultante d'un groupement de n-s cellules en série..... 23

Figure 1- 17: Caractéristique résultante d'un groupement de Np cellules en parallèle. 24

Figure 1- 18: Caractéristique I(V) d'une connexion mixte 25

Figure 1- 19: illustration de $I=f(v)$ d'une cellule photoélectrique 26

Figure 1- 20: Diodes de protection d'un panneau 27

Figure 1- 21: Influence de la température..... 28

Figure 1- 22: Influence de l'éclairement 28

Figure 1- 23 : Influence de la température et l'éclairement simultanément..... 29

Listes des figures de chapitre II

Figure 2- 1 Circuit équivalent d'un panneau solaire 33

Figure 2- 2 : Courbe I-V d'un panneau solaire. Les trois points caractéristiques.....	34
Figure 2- 3 : Les trois points sur la courbe I-V.....	42
Figure 2- 4 : Les cinq points sur la courbe I-V.....	47

Listes des figures de chapitre III

Figure 3- 1 : catégories des métaheuristiques.....	52
Figure 3- 2 : Simulation de PSO par essaim d'abeilles à la recherche de fleurs.....	58
Figure 3- 3 : Met à jour la vitesse et la position du PSO dans l'espace bidimensionnel.....	59
Figure 3- 4 : Organigramme de PSO.....	61
Figure 3- 5 : Caractéristique I(V) expérimentale à 25°C.....	63
Figure 3- 6 : Caractéristique P(V) expérimentale à 25°C.....	63
Figure 3- 8 : Caractéristique P(V) expérimentale à 50°C.....	64
Figure 3- 7 : Caractéristique I(V) expérimentale à 50°C.....	64
Figure 3- 10 : Caractéristique P(V) expérimentale à 75°C.....	65
Figure 3- 9 : Caractéristique I(V) expérimentale à 75°C.....	65
Figure 3- 11 : Caractéristique I(V) expérimentale et estimée à 25°C.....	67
Figure 3- 12 : Caractéristique P(V) expérimentale et estimée à 25°C.....	67
Figure 3- 13 : L'erreur quadratique moyenne (RMSE) à 25°C.....	68
Figure 3- 15 : L'optimisation de Id	68
Figure 3- 14 : L'optimisation de I_{ph}	68
Figure 3- 16 : L'optimisation de Rs	69
Figure 3- 17 : L'optimisation de Rsh	69
Figure 3- 18 : L'optimisation de A	69
Figure 3- 19 : Caractéristique I(V) expérimentale et estimée à 50°C.....	70
Figure 3- 20 : Caractéristique P(V) expérimentale et estimée à 50°C.....	70
Figure 3- 21 : L'erreur quadratique moyenne (RMSE) à 50°C.....	71
Figure 3- 22 : L'optimisation de I_{ph}	71
Figure 3- 23 : L'optimisation de I_d	71
Figure 3- 24 : L'optimisation de Rs	72
Figure 3-25 :L'optimisation de Rsh	72
Figure 3- 26 : L'optimisation de A	72
Figure 3- 27 : Caractéristique I(V) expérimentale et estimée à 75°C.....	73

LISTES DES FIGURES

Figure 3- 28 : Caractéristique P(V) expérimentale et estimée à 75°C.....	73
Figure 3- 29 : L'erreur quadratique moyenne (RMSE) à 75°C.	74
Figure 3- 30 : L'optimisation de I_{ph}	74
Figure 3- 31 : L'optimisation de I_d	74
Figure 3- 32 :L'optimisation de R_s	75
Figure 3- 33 : L'optimisation de R_{sh}	75
Figure 3- 34 : L'optimisation de A.....	75

Les tableaux

Tableau 2- 1: Les équations de chaque paramètre (<i>Rs, Rsh, Iph, ID</i>):	40
Tableau 2- 2 : les cinq équations indépendantes nécessaires pour résoudre les cinq paramètres (<i>Rs, Rsh, A, Iph, ID</i>):	45
Tableau 3- 1 : Caractéristiques électriques typiques du panneau PV	62
Tableau 3- 2 : Les paramètres identifiés de panneau PV en utilisant l'algorithme de PSO pour les différentes températures.....	66

Introduction générale

La consommation énergétique mondiale est principalement couverte par les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel et nucléaire) qui ont un effet négatif sur l'environnement, le changement climatique, qui fait partie des graves problèmes auxquels l'humanité est confrontée au cours de ce siècle, est dû aux émissions de gaz à effet de serre, en particulier de la combustion d'énergie fossile. Vue l'évolution du niveau de vie actuelle de l'être humain, la demande croissante de l'énergie a permis un développement remarquable des énergies renouvelables, telles que les énergies photovoltaïque (PV), thermique, hydraulique... etc. Ces énergies propres et durables sont devenues d'une grande importance car elles sont considérées comme une alternative aux énergies fossiles qui connaissent une décroissance, ce qui rejoint les objectifs du protocole de Kyoto [1] .

Au cours de la dernière décennie, l'énergie PV est devenue une source d'énergie fiable avec un taux de production et un coût de maintenance en constante diminution grâce au progrès de la technologie et de l'évolution du marché PV [6,7]. En 2018, le marché du PV a non seulement dépassé le niveau annuel de 100 GW mais il a également atteint plus de 0,5 TW de capacité d'énergie PV [6]. Le développement de la technologie de l'électronique de puissance et l'introduction de la numérisation dans le domaine PV ont permis l'évolution rapide des applications PV et particulièrement, les systèmes PV connectés au réseau électrique qui sont passés de quelques 19 kW à une centaine de MW. A cet effet, ces systèmes PV doivent répondre à une série de standards internationaux afin d'assurer la sécurité du transfert de l'énergie vers le réseau électrique. Parmi ces standards, on peut citer [1].:

- IEC61727 et IEEE 1547 -2003, qui contrôlent la qualité de puissance injectée et le taux de distorsion des harmoniques (Total harmonique distorsion (THD)) et vérifient les interconnexions entre générateurs PV et réseau électrique.

- CEI61000 détermine les valeurs limites des courants harmoniques tolérables à injecter dans le réseau public. Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de chercher de nouvelles solutions pour fournir et développer, et même de rationaliser l'exploitation des énergies

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

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

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

Les cellules solaires photovoltaïques fournissent l'énergie d'alimentation la plus importante et de longue durée pour des satellites et des véhicules spatiaux. Comme elles sont utilisées dans des applications terrestres. Les cellules solaires sont habituellement évaluées en mesurant les caractéristiques courant tension du dispositif dans des conditions standard d'illumination et puis en extrayant un ensemble de paramètres à partir des données obtenues. Ces paramètres sont le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité, le photocourant et la résistance shunt. Ils peuvent être employés pour le contrôle de la qualité pendant la production ou fournir des perspectives dans le fonctionnement des dispositifs, menant de ce fait aux améliorations de ces dispositifs.

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

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur l'énergie photovoltaïque, le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules solaires en donnant un aperçu sur les notions du rayonnement solaire, nous décrivons la structure des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque. Nous donnons un aperçu général sur la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque et les différentes caractéristiques électriques de la cellule. Puis, nous montrons l'influence des paramètres externes sur la caractéristique $I(V)$, tels, la température et l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule solaire, ainsi que les avantages, les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre on aborde une des questions importantes liées aux systèmes photovoltaïques qui consiste à la modélisation et à la détermination de ces paramètres inconnus. En effet, Nous en choisissons les méthodes d'identification des paramètres des cellules et des panneaux photovoltaïques la plus simple et la plus utilisée, l'approche d'identification utilisé est la méthode analytique et la méthode basées sur l'analyse de courbe (I-V) à l'aide d'une méthode de Newton-Raphson.

Le troisième chapitre présente les métaheuristiques les plus utilisées dans la littérature. La méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) pour l'identification des paramètres du PV, les résultats de l'identification des paramètres électriques d'un panneau photovoltaïque pour différentes températures (25°C, 50°C et 75°C)

En fin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les

chaines de conversion

photovoltaïque

I - Généralités sur les chaines de conversion photovoltaïque

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons des généralités sur l'énergie photovoltaïque, le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules solaires en donnant un aperçu sur les notions du rayonnement solaire, nous décrivons la structure des cellules photovoltaïques et l'effet photovoltaïque.

Nous donnons un aperçu général sur la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque et les différentes caractéristiques électriques de la cellule. Puis, nous montrons l'influence des paramètres externes sur la caractéristique $I(V)$, tels, la température et l'éclairement sur le fonctionnement de la cellule solaire, ainsi que les avantages, les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

I.2 Energie solaire

Principalement, le soleil est constitué de gaz, la production de quantité d'énergie se fait par la fusion du rayonnement solaire, pour atteindre une température élevée, les atomes d'hydrogène sont fusionnés en atomes d'hélium, la température peut atteindre 20 millions de degrés Kelvin, et c'est une grande température, cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes comprises entre 0.2 et 3 μm . Le rayonnement solaire est une source d'énergie renouvelable essentielle, une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour la production de chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque [2] .

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés.

I. 3 Rayonnement solaire

Le rayonnement reçu par la Terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d’aborder la couche atmosphérique. En traversant l’atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre. La couche d’ozone, par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l’ultraviolet au visible, et l’oxygène présente deux bandes étroites d’atténuation vers 690 et 760 nm. La vapeur d’eau enfin possède de nombreuses bandes d’absorption dans le visible et encore plus dans l’infrarouge. Le flux énergétique reçu au sol se réduit alors à 1000 W/m² avec un spectre décalé vers le rouge. Pour tenir compte de l’épaisseur d’atmosphère traversée par le rayonnement solaire incident Figure(1.1), on introduit un coefficient appelé nombre de masse (AM) défini par [3]:

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \tag{1.1}$$

L’angle θ représente l’angle d’élévation du soleil sur l’horizon (90 degrés au Zénith). L’intégration de l’irradiance sur la totalité du spectre permet d’obtenir la puissance P(W.m⁻²) fournie par le rayonnement. Pour simplifier, on utilise les notations suivantes :

AM0 : Hors atmosphère (applications spatiales). P ≈ 1.36 kW.m⁻².

AM1 : Le soleil est au zénith du lieu d’observation (à l’équateur).

AM1.5G : Spectre standard, le soleil est à 45°. P ≈ 1 kW.m⁻².

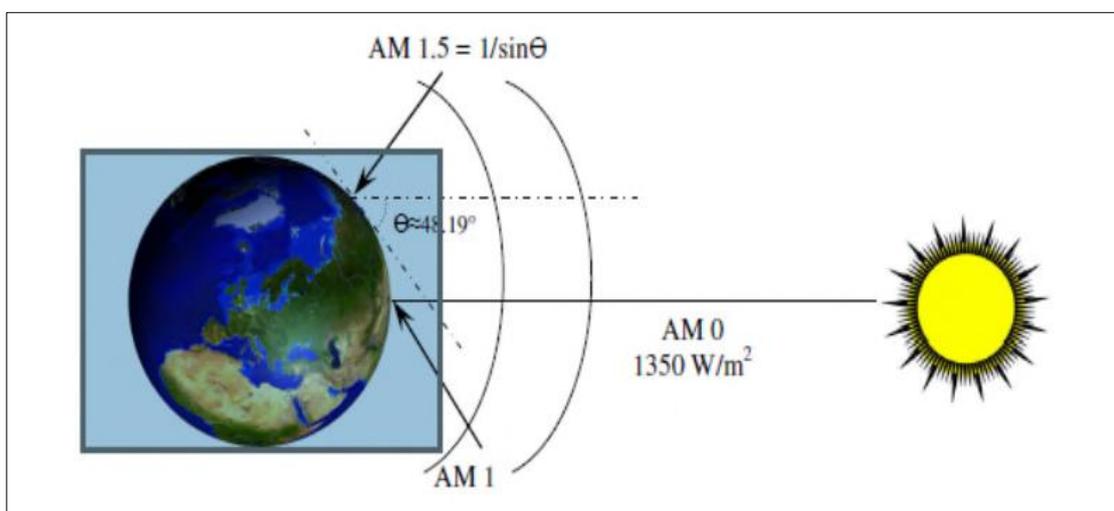


Figure 1- 1: Normes de mesures du spectre d’énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Au sol, le rayonnement solaire à au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffuse (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global [2]. La figure (1.2) montre le spectre d'émission solaire.

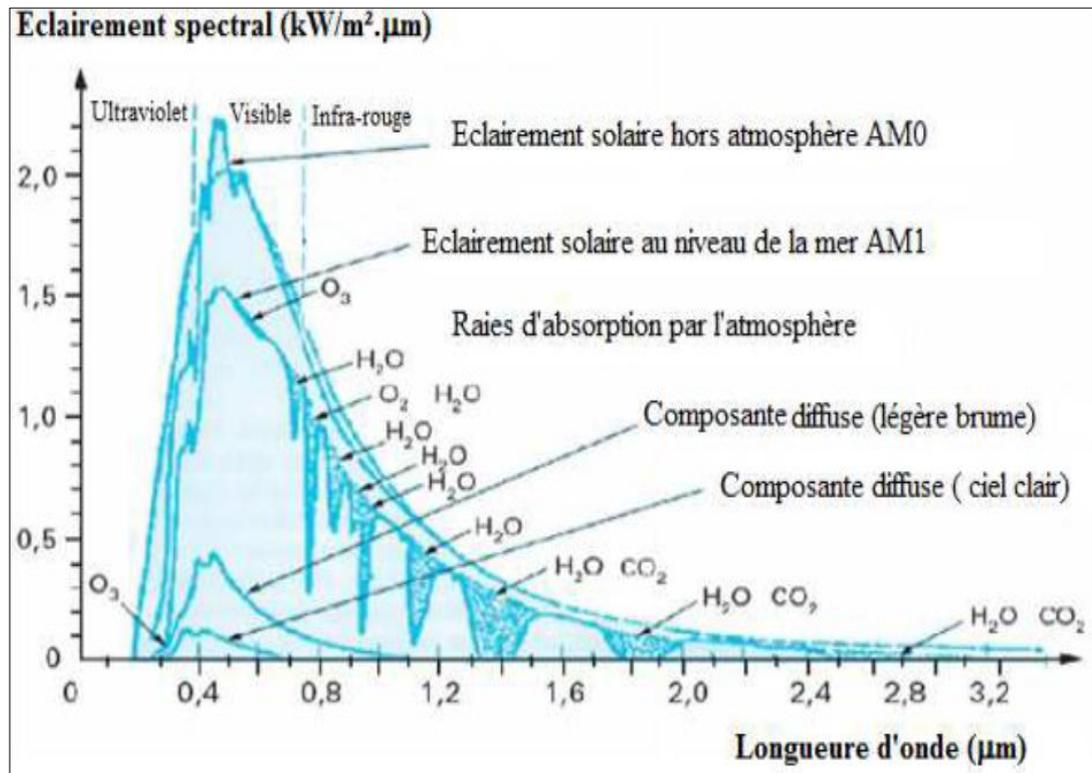


Figure 1- 2: Spectre d'émission solaire.

I. 4 Système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 60 ans, les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites, elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [4].

I. 4. 1 Historique

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires *Bell*, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [4].

Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839: le physicien français *Edmond Becquerel* découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

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

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

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

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

1983: la première voiture alimentée par énergie Photovoltaïque parcourt une distance de 400 Km en Australie.

I. 4. 2 Effet photovoltaïque

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé : effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium , cette dernière est un composant électronique semi-conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement, ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire figure (1-3).

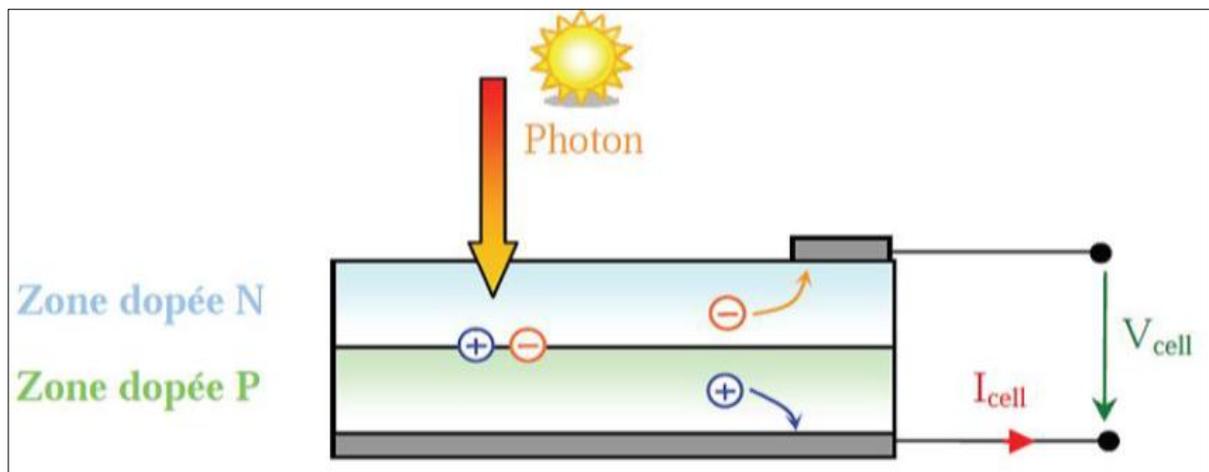


Figure 1- 3: Schéma de principe de la conversion photoélectrique

L'effet PV est un phénomène photoélectrique fut découvert par le physicien Français *EDMOND BECQUEREL* en 1839. Mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs Américains des laboratoires *Bell, Chapin, Pearson* et *Prince*, développent la première cellule PV avec un rendement énergétique ne dépassant pas 4,5% au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites [5].

I. 4. 3 Cellule photovoltaïque

L'élément de base d'un panneau photovoltaïque est la cellule photovoltaïque, elle est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs, elle transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [6].

Les cellules photovoltaïques constituées :

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

L'image ci-dessous montre une cellule solaire typique, avec des dimensions d'environ 15 cm de côté.

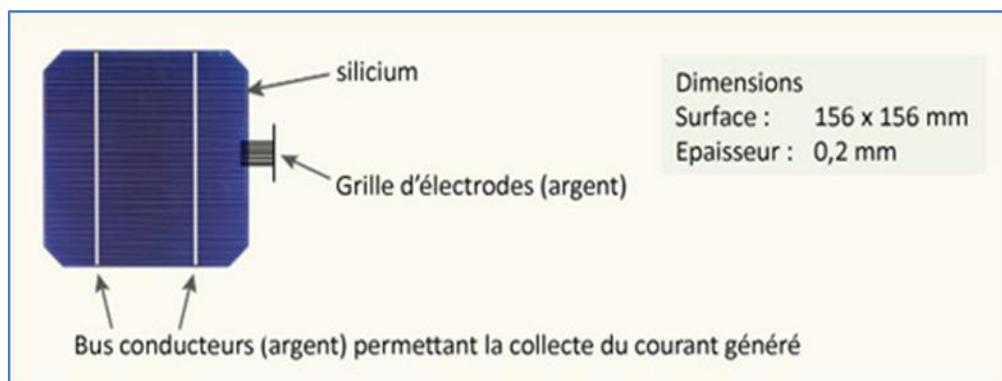


Figure 1- 4: Cellule photovoltaïque

Les matériaux semi-conducteurs ont des propriétés intermédiaires entre les isolants, comme le plastique, et les conducteurs, comme les métaux, on peut modifier les propriétés d'un matériau semi-conducteur en lui ajoutant des impuretés de manière contrôlée, on appelle cela le dopage.

Le matériau semi-conducteur le plus courant pour les panneaux solaires est le silicium le silicium pur n'est pas adapté à la fabrication des panneaux solaires, on utilise du silicium dopé avec les impuretés adéquates. Pour faire une cellule solaire, on a besoin de créer au sein du silicium deux couches dopées de manières différentes, une de ces couches à un dopage dit de type **P**, l'autre dit de type **N**, l'accolement de la couche de type **P** et de la couche de type **N** forme ce que l'on appelle une jonction **PN**. Cet accolement a des propriétés physiques particulières, qui permettent à la cellule solaire de fonctionner comme une source de tension fournissant un courant électrique lorsqu'elle est éclairée par de la lumière.

L'image ci-dessous montre la structure d'une cellule solaire, vue de côté. On reconnaît en particulier les différentes couches de matériau semi-conducteur

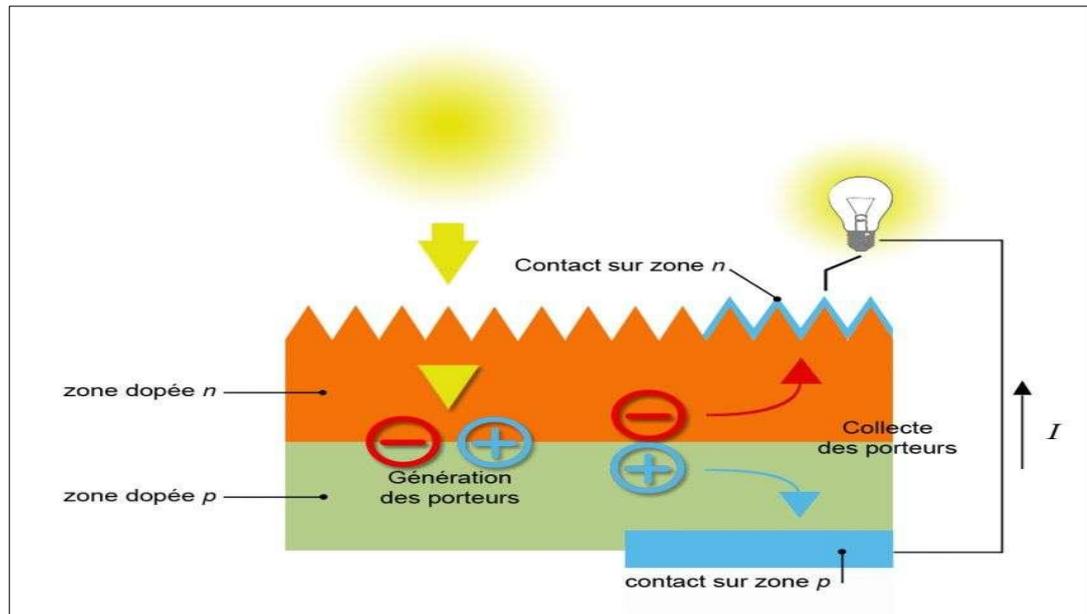


Figure 1- 5: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Pour comprendre comment la jonction **PN** peut transformer la lumière en électricité, il faut d'abord comprendre comment les atomes de silicium récupèrent l'énergie du soleil. Les photons émis par le soleil apportent de l'énergie aux atomes de silicium, qui passent d'un état de basse énergie à un état de plus haute énergie, cette acquisition d'énergie se fait via les électrons des atomes, qui passent à un niveau d'énergie supérieure, en laissant derrière eux l'équivalent d'une charge positive (un trou d'électron). On parle de création de paires électron-trou.

Les électrons et les trous sont des porteurs de charge libres : ils peuvent circuler à l'intérieur du silicium. Au sein de la jonction **PN** règne un champ électrique, qui va séparer les électrons et les trous, qui seront collectés par les contacts de la cellule. On a donc un courant qui peut circuler ! En quelques mots, une cellule solaire convertit l'énergie des photons en électricité grâce à un assemblage de matériaux semi-conducteurs qui restitue l'énergie lumineuse reçue sous forme de courant électrique [6].

I. 4. 4 Différentes technologies de la cellule photovoltaïque

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

a. *Silicium monocristallin*

La cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée. La fabrication de cellules de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifié et solidifié. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99% ce qui permet un rendement énergétique fort. Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupe en fine tranches d'environ 300 μm . Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduite via un processus de diffusion contrôlée : les tranches de silicium sont exposées à des vapeurs de phosphore dans un four ou la température varie de 800 à 1000°C [7].

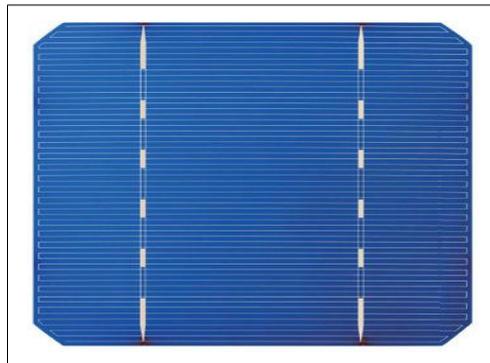


Figure 1- 6: Cellule photovoltaïque monocristallin

b. *Silicium poly-cristallin*

Les cellules en silicium poly-cristallin sont moins coûteuses que celles en silicium monocristallin car les processus de préparation des cellules sont moins stricts. Leur efficacité est cependant plus faible. Le processus de production est semblable à celui présenté précédemment dans le cas de la fabrication de cellule en silicium mais avec un contrôle moins

rigoureux. Il en résulte que les cellules obtenues sont moins coûteuses mais aussi moins efficaces (12,5% de rendement en moyenne) [7].

Leur intérêt réside dans la multiplicité des formes sous laquelle le revêtement peut se présenter : lingots à découper, ruban ou fil à déposer, Chaque technique permet de produire

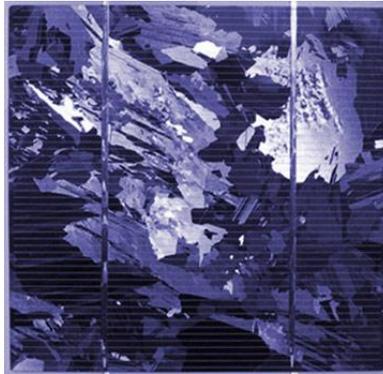


Figure 1- 7: Cellule photovoltaïque polycristalline

des cristaux ayant des caractéristiques spécifiques, y compris la taille, la morphologie et la concentration des impuretés.

c. *Silicium amorphe*

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages à la fois au niveau des propriétés électriques et le processus de fabrication (processus simple, faible consommation d'énergie, peu coûteux, possibilité de produire des cellules avec grands secteurs).

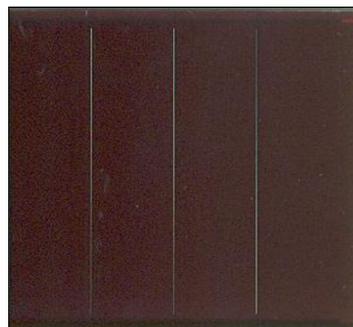


Figure 1- 8: Cellule photovoltaïque polycristalline

Mais, même avec un coût réduit pour la production, l'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients: le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules

de mono et poly cristallin de silicium. Le deuxième est le fait que les cellules sont affectées par un processus de dégradation dans les premiers mois d'opération, réduisant ainsi leur durabilité [7].

d. *Silicium multi-jonction*

Les cellules multi-jonction diffèrent des cellules présentées précédemment, car leur structure possède une meilleure absorption du spectre solaire, grâce à leur constitution de plusieurs couches de nature déférente (utilisant de différents matériaux semi-conducteurs de gaps déférente), elles ayant une grande efficacité, donc présentent des rendements plus élevés. La figure (1.9) montre une cellule multi-jonction.

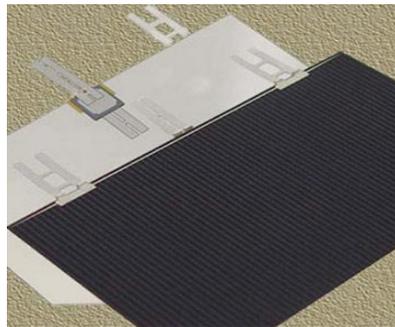


Figure 1- 9: Cellule photovoltaïque multi-jonction.

I. 4. 5 Caractéristiques électriques des cellules et des panneau photovoltaïques.

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [8] :

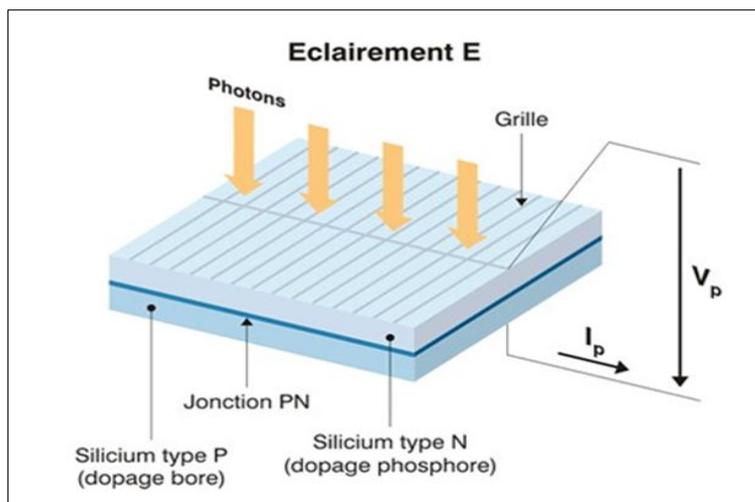


Figure 1- 10: Schéma d'une cellule élémentaire

Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal : MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}) [8].

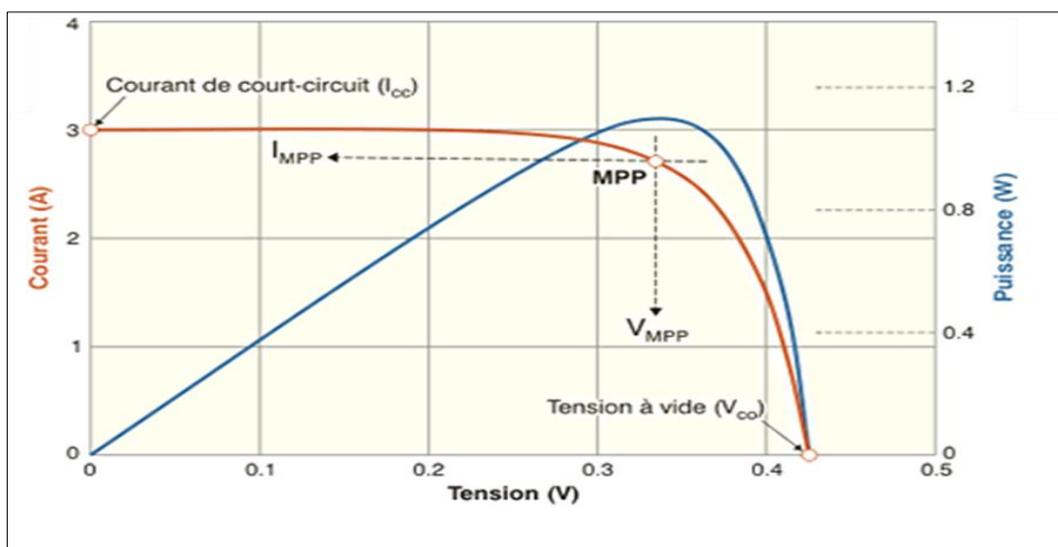


Figure 1- 11: courbe courant-tension (I-V) et puissance P(V) d'une cellule photovoltaïque

I. 5 Modélisation d'un panneau photovoltaïque

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

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

I. 5. 1 Le modèle idéal

Le dispositif PV élémentaire est une cellule PV, qui est essentiellement une diode semi-conductrice, le schéma électrique correspondant au modèle idéal est illustré par la figure(1.12), il génère un courant inverse lorsque sa jonction p-n est exposée à la lumière. Le courant est appelé photo-généré I_{ph} . Dans l'obscurité, la cellule PV se comporte comme une diode, et donc ses caractéristiques I-V sombres sont généralement exprimés mathématiquement par l'équation de la diode Shockley comme suit[8]:

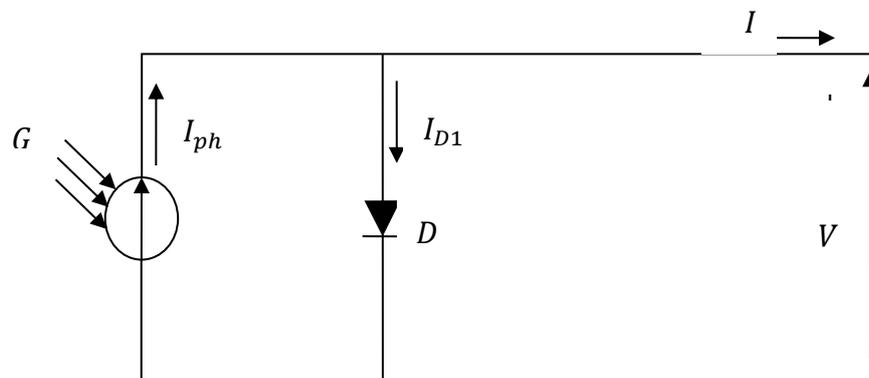


Figure 1- 12: Circuit électrique de modèle idéal

$$I_{D1} = I_{01} \left(e^{\frac{V_D}{A_1 V_t}} - 1 \right) \quad (1.9)$$

Où

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

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

A_1 : Facteur d'idéalité de la diode.

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

$$V_t = \frac{k * T}{q} \quad (1.10)$$

Où

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

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

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_D}{A_1 V_t}} - 1 \right) \quad (1.11)$$

Dans la littérature [8] , l'équation (1.11) est l'expression mathématique du modèle idéal, dans lequel I_{ph} est modélisé comme une source de courant.

I. 5. 2 Modèle a une diode

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

En tenant compte des effets de la résistance en série, Townsend [8] a présenté un modèle de circuit en supposant que la résistance de shunt est infinie. Ce modèle est appelé

modèle simplifié à une diode, le schéma électrique correspondant est illustré par la figure(1.13), sa valeur de courant est donnée par l'expression suivante :

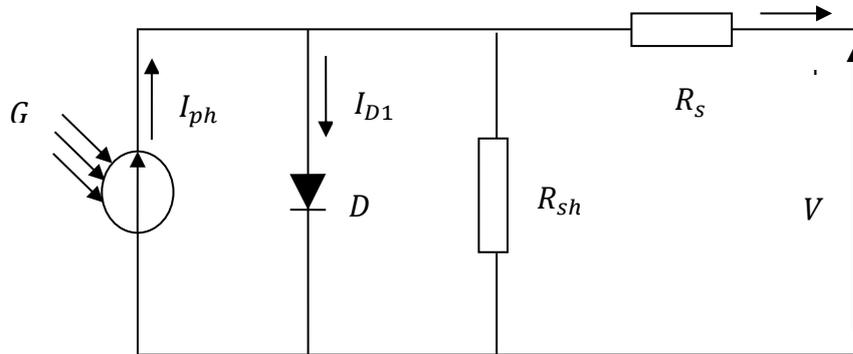


Figure 1- 13 : Circuit électrique de modèle à une diode.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1V_t}} - 1 \right) \quad (1.12)$$

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

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.12)$$

Où

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance shunt.

I. 5. 3 Modèle à deux diodes

Dans le modèle à deux diodes, la deuxième diode, en parallèle avec la première, est utilisée pour modéliser la recombinaison dans la région de charge d'espace, La figure (1.14) montre le schéma électrique du modèle à deux diodes.

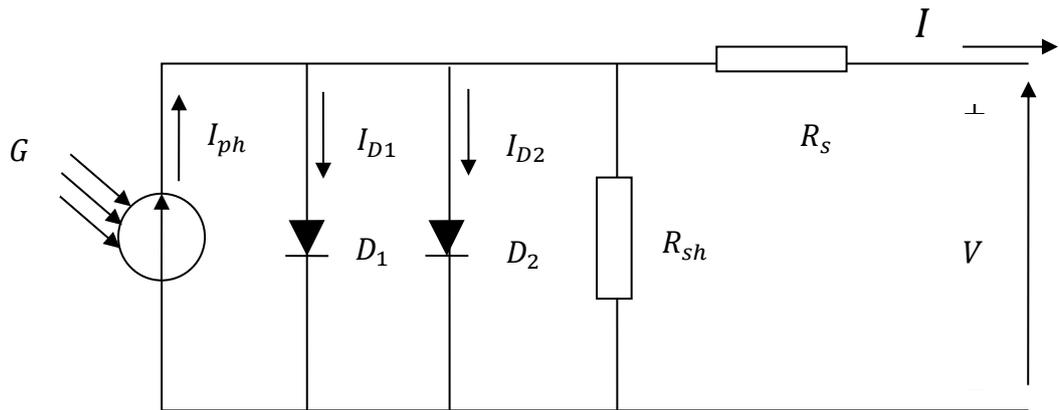


Figure 1- 14: Circuit électrique de modèle à une deux diodes

Son modèle électrique est exprimé par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_S}{A_1V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_S}{A_2V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (1.13)$$

Avec :

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

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

Les propriétés des différents modèles électriques PV sont récapitulées

Modèle idéal $I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V_D}{A_1V_t}} - 1 \right) \quad (1.14)$

Modèle simplifié à une diode $I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_S}{A_1V_t}} - 1 \right) \quad (1.15)$

Modèle à une diode $I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_S}{A_1V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (1.16)$

Modèle à deux diodes $I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_S}{A_1V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_S}{A_2V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (1.17)$

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

I. 6 Modèle du panneau photovoltaïque

Dans un grand système de production photovoltaïque, les panneaux photovoltaïques sont utilisés comme composants de base plutôt que comme cellules photovoltaïques, car la puissance de sortie des cellules photovoltaïques est limitée à des niveaux élevés de tension. Les chercheurs ont développé le modèle de panneau photovoltaïque afin de prédire les caractéristiques I-V avant de modéliser l'ensemble du système, en supposant qu'il y ait n_s cellules connectées en série dans un panneau, la tension de sortie et la résistance du panneau sont exprimées de la manière suivante :

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

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

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

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

Où :

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

Donc :

Modèle idéal
$$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V'}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) \quad (1.18)$$

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

Modèle à une diode
$$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V'+I'R'_S}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V' + I'R'_S}{R'_{sh}} \quad (1.20)$$

Modèle à deux diodes
$$I' = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V'+I'R'_S}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V'+I'R'_S}{A_2 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V' + I'R'_S}{R'_{sh}} \quad (1.21)$$

I. 7 Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque se compose de plusieurs cellules solaires connectées électriquement les unes aux autres en série ou en parallèle. La mise en série et en parallèle des panneaux permet d'obtenir la tension et le courant exigés dont les performances dépendent de l'association de cellules et de la matière qui les composent, le point de fonctionnement de cet ensemble de panneau photovoltaïque est défini par l'intersection de sa caractéristique courant-tension avec la ligne de charge [8].

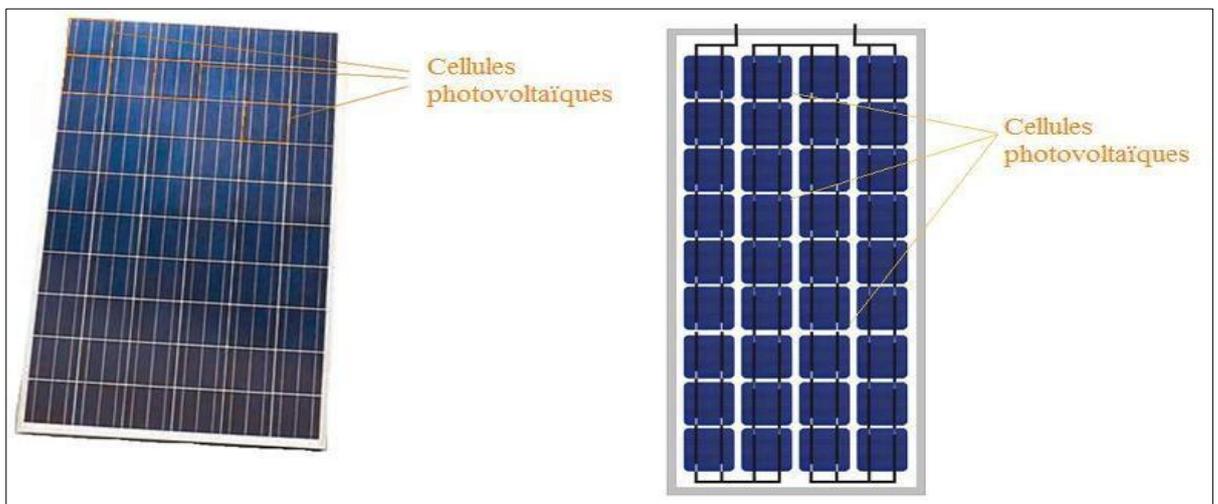


Figure 1- 15: panneau photovoltaïque

I. 7. 1 Association des cellules photovoltaïques

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm² (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes, les panneaux sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires, la connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules panneaux sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable.

Ces panneaux sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés [8].

a. *Association en série*

Dans l'association de plusieurs cellules identiques en série, le courant traversant chaque cellule est le même, la tension aux bornes de cette chaîne de cellule est obtenue en additionnant les tensions aux bornes de toutes les cellules, la figure (1.16) illustre la caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série

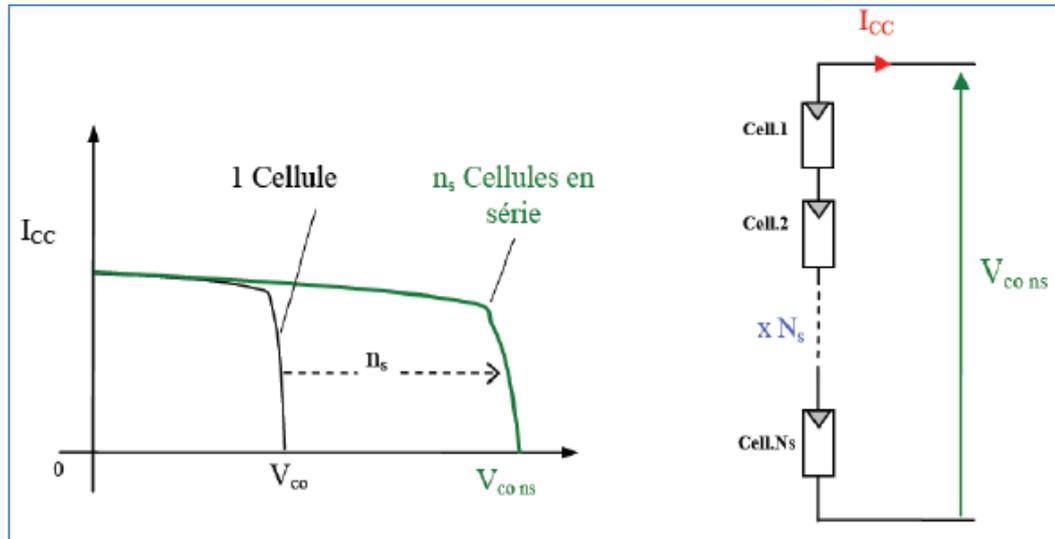


Figure 1- 16: Caractéristique résultante d'un groupement de n-s cellules en série.

$$V_{co_{n_s}} = n_s \cdot V_{co} \tag{1.2}$$

$$I_{cc_{n_s}} = I_{cc} \tag{1.3}$$

Où

n_s : nombre des cellules en série.

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

b. Association en parallèle

Les cellules identiques groupées en parallèle sont soumises à un même potentiel, le courant résultant de ce groupement est la somme des courants fournis par toutes les cellules. La figure (1.18) montre la caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle [8].

$$I_{cc_{n_p}} = n_p \cdot I_{cc} \tag{1.4}$$

$$V_{co_{n_p}} = V_{co} \tag{1.5}$$

c. Association mixte

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

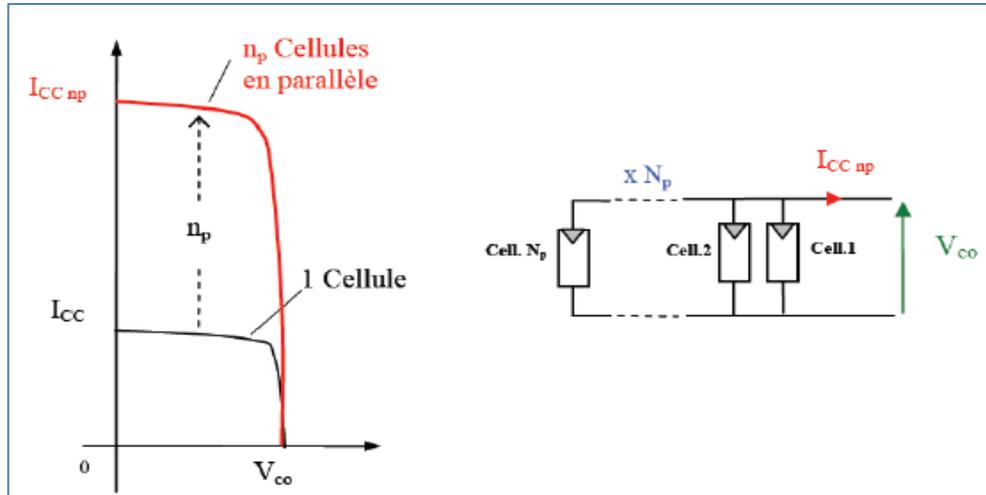


Figure 1- 17: Caractéristique résultante d'un groupement de Np cellules en parallèle.

$$\begin{cases} V_{oc} (tot) = N_s \cdot V_{oc} \\ I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \end{cases} \quad (1.6)$$

Avec :

N_p : nombre des cellules en parallèle.

N_s : nombre des cellules en série.

La figure (1.18) suivante montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p , cellules identiques [8].

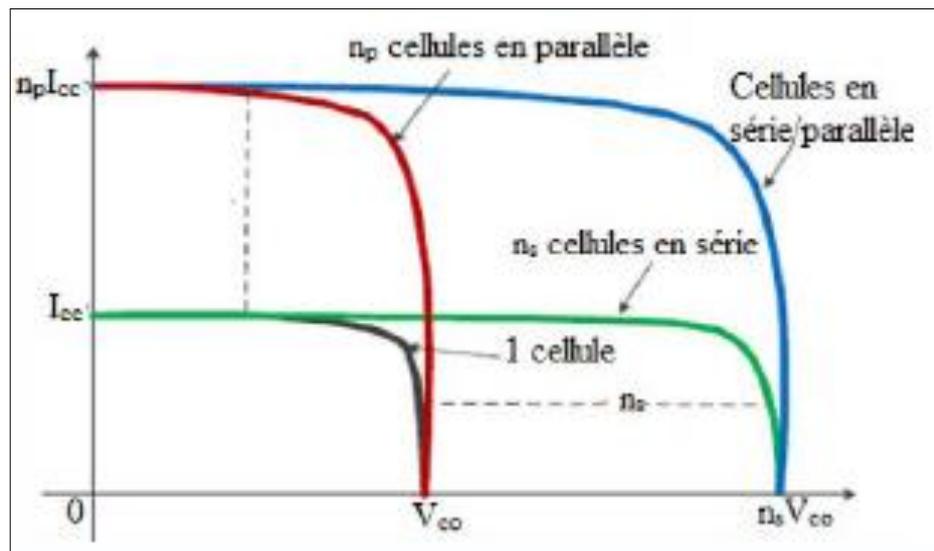


Figure 1- 18: Caractéristique I(V) d'une connexion mixte

I. 7. 2 Les paramètres d'un panneau photovoltaïque

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

a. **La tension en circuit ouvert V_{co}**

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

b. **La courant de court-circuit I_{cc}**

Le courant de court-circuit I_{cc} correspond à la valeur du courant lorsque la cellule est en condition de court-circuit, c'est-à-dire lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle. Le courant de court-circuit est très proche du photo-courant I_{ph} .

c. **La puissance maximale P_{max}**

La puissance maximale P_{max} délivrée par une cellule photovoltaïque correspond au maximum du produit de la tension maximale appliquée par le courant maximale mesuré aux bornes de la cellule, la puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC :

Standard Test Condition), c'est-à-dire sous l'ensoleillement de 1000 W/m^2 et à la température de 25°C .

d. Le rendement

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \tag{1.7}$$

Où

η : Rendement énergétique.

E : Éclairement (W/m^2).

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

P_{max} : Puissance maximale.

e. Le facteur de forme

Il représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$ comme le montre la figure (1.20). Ce facteur est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \tag{1.8}$$

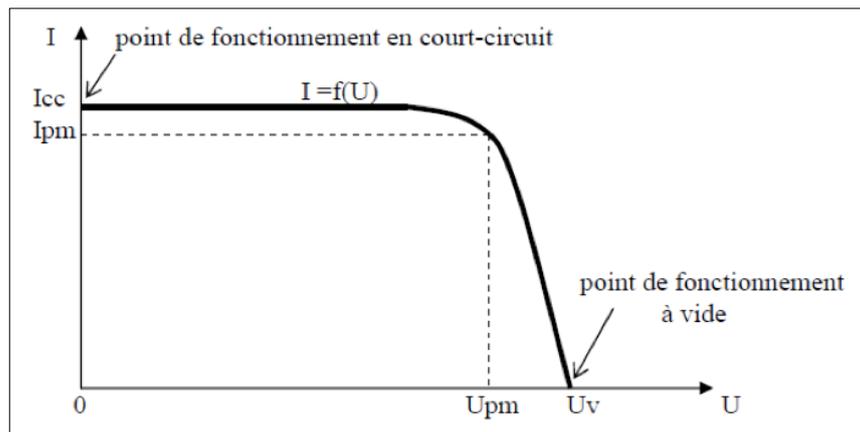


Figure 1- 19: illustration de $I=f(v)$ d'une cellule photoélectrique

I. 8 Protection des panneaux photovoltaïques

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajoute des diodes de protection Figure (1.20), pour montrer l'utilité des diodes de protection, on considère deux types de groupement de cellules PV : Parallèle et Série, dans un assemblage parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et les Courants s'ajoutent, dans des conditions défavorables (éclairage non uniforme et circuit ouvert), une cellule faible peut être parcourue en inverse par le courant produit par les autres cellules et ainsi dissiper une puissance importante et être détruite, pour éviter cet effet, il faut mettre une diode en série qui interdit tout courant inverse.

Par contre, dans un assemblage série, le courant constant et les tensions s'additionnent. dans certaines conditions d'éclairage non uniforme et de fonctionnement proche du court-circuit, une cellule peut être soumise à la tension des autres cellules appliquée en inverse et ainsi fonctionner en récepteur en dissipant une puissance importante et être détruite si la contrainte thermique est trop forte ou si la tension d'avalanche est dépassée, pour éviter cela, il faut disposer une diode en parallèle, aux bornes d'un groupement élémentaire de 30 à 40 cellules au silicium au maximum, l'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès l'apparition d'une tension en inverse aux bornes du groupement limite cette dernière à la tension de la diode et ainsi la puissance dissipée [5].

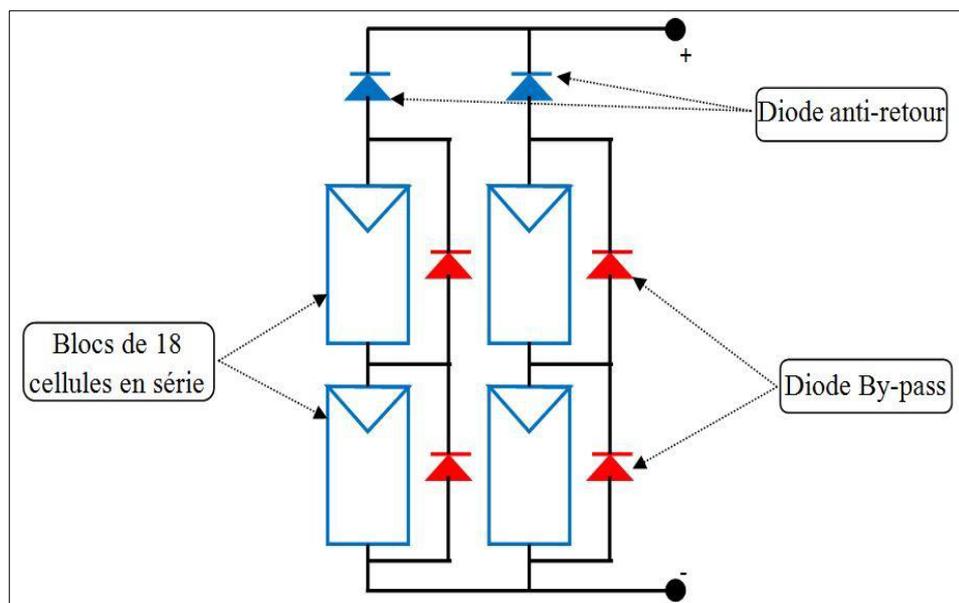


Figure 1- 20: Diodes de protection d'un panneau

I. 9 Influence de l'éclairement et la température

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température, les figures (1.21, 1.22, 1.23) donnent l'allure générale des Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque.

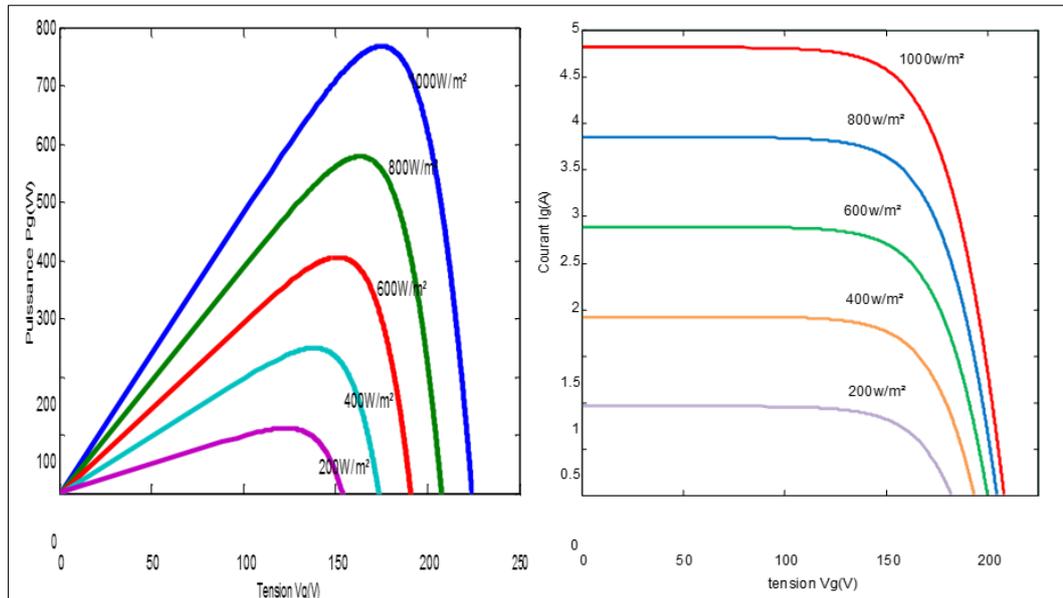


Figure 1- 21: Influence de la température

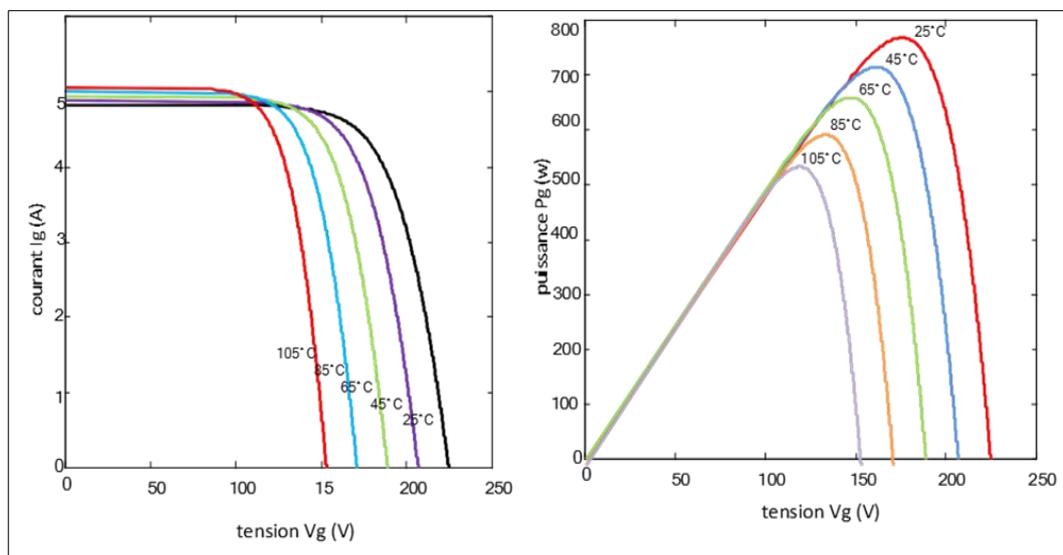


Figure 1- 22: Influence de l'éclairement

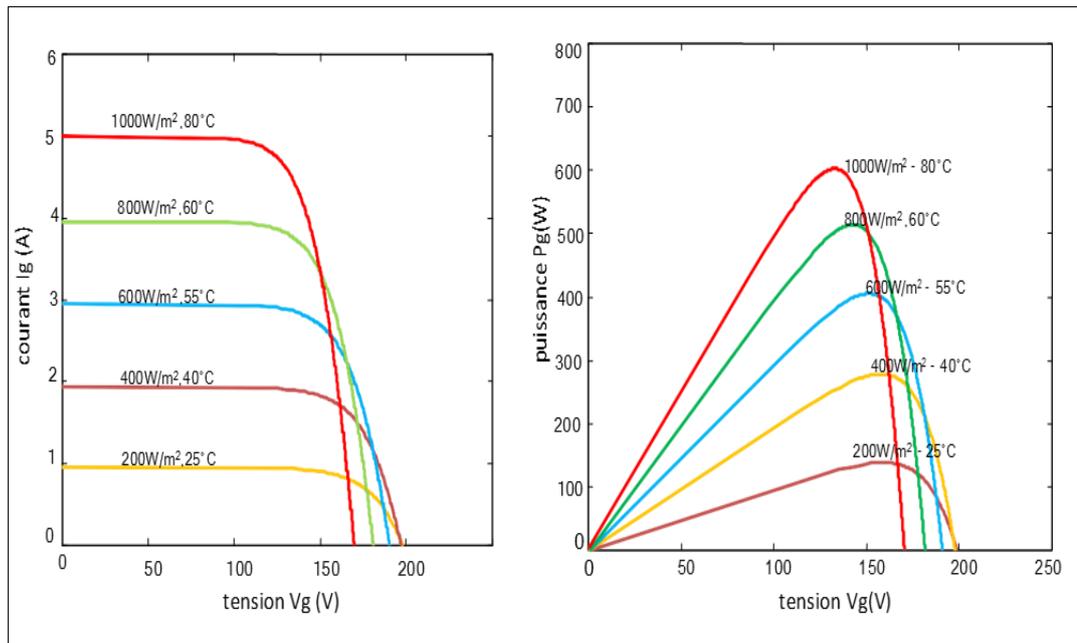


Figure 1- 23 : Influence de la température et l'éclairement simultanément.

I. 10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I. 10. 1 Avantages

Les avantages de l'électricité solaire photovoltaïque sont multiples :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.

- ✓ Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante et esthétique en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...).
- ✓ L'électricité solaire photovoltaïque a pour qualité sa fiabilité, la durée de vie des capteurs supérieure à 25 ans, son autonomie, son faible impact sur l'environnement.
- ✓ Technologie encore émergente, son coût lui permet d'être souvent compétitive par rapport aux solutions classiques dans les sites éloignés du réseau électrique ne demandant pas de très grosse quantité d'électricité fournie, ou dans des sites urbains lorsqu'elle évite des coûts de raccordement au réseau électrique public.
- ✓ Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible, car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement.
- ✓ Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes [7].

I. 10. 2 Inconvénients

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- ✓ Le rendement électrique diminue avec le temps (20 % de moins au bout de 20 ans).
- ✓ Pollution à la fabrication [7].

I. 11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque. On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, les différents composants d'une cellule photovoltaïque, leur principe de fonctionnement, leurs caractéristiques I-V et P-V, leur modèle électrique équivalent.

Nous avons également présenté le panneau photovoltaïque et leurs performances, en suite décrit l'influence des divers paramètres : l'éclairement et la température sur leur caractéristique et leurs paramètres électriques, l'association des cellules en série et en parallèle. Finalement nous avons présenté les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Chapitre II

Technique

d'identification basé sur

la méthode NR

II - Technique d'identification basé sur la méthode NR

II. 1 Introduction

Pour mieux comprendre les mécanismes physiques agissant à l'intérieur de la cellule solaire, et par conséquent les différents paramètres qui affectent ces caractéristiques, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'identification de ces paramètres, non seulement pour l'augmentation du rendement de la cellule photovoltaïque, mais aussi pour pouvoir simuler son comportement, et optimiser ses différentes caractéristiques. D'autre part, l'énergie photovoltaïque est très dépendante des conditions environnementales (température, irradiation...) et cela complique son optimisation, faisant de la modélisation du panneau un outil nécessaire. La modélisation des panneaux solaires est traditionnellement réalisée par ajustement numérique à des résultats expérimentaux étendus. Il est bien connu que l'étape d'identification des paramètres de n'importe quel système est une étape déterminante aussi bien pour la simulation que pour la pratique [9].

Dans ce chapitre, on aborde une des questions importantes liées aux systèmes photovoltaïques qui consiste à la modélisation et à la détermination de ces paramètres inconnus. En effet, Nous en choisissons les méthodes d'identification des paramètres des cellules et des panneaux photovoltaïques la plus simple et la plus utilisée, l'approche d'identification utilisé est la méthode analytique et la méthode basées sur l'analyse de courbe (I-V) à l'aide d'une méthode de Newton-Raphson.

II. 2 La Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Le circuit le plus populaire équivalent à une cellule/panneau solaire est illustré à la figure(2.1), il comprend une source de courant, une diode et deux résistances : une en série et une en parallèle, chaque élément inclus dans le circuit équivalent implique un paramètre à déterminer, par conséquent cinq paramètres (I_{ph} , I_D , A , R_s et R_{sh}) doivent être calculés lors de l'utilisation des méthodes d'identification [10] :

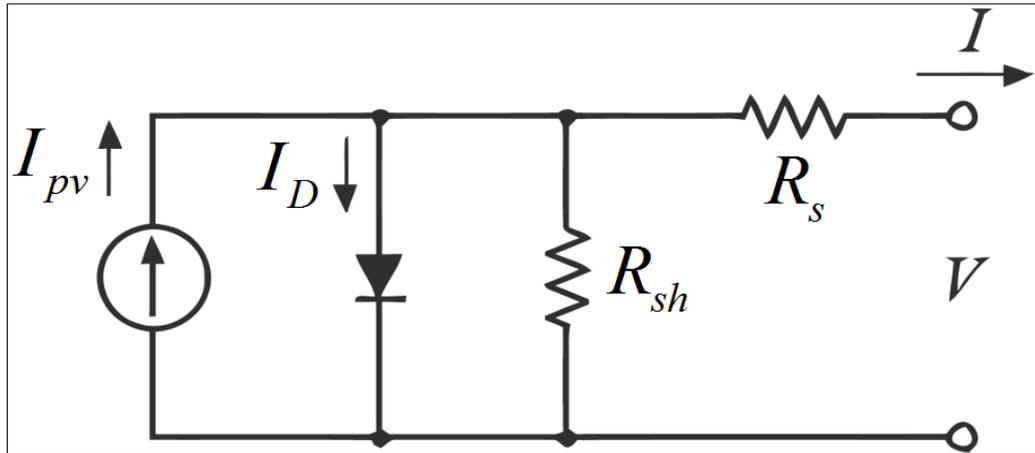


Figure 2- 1 Circuit équivalent d'un panneau solaire

Le comportement (I-V) du modèle de circuit formé d'une diode et de deux résistances (Figure 2.1) est défini par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{V+IR_s}{AV_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Où :

$V_t = \frac{q}{kT}$: est la tension Thermique, q : est la charge de l'électron $q=1.6*10^{-19} C$

k : est la constante de Boltzmann $k=1.38*10^{-23} Jk^{-1}$, T : est la température de la jonction P-N.
 I_{ph} : est le courant généré par la lumière, I_D : est le courant de saturation inverse, A : constante d'ajustement empirique égale à 1 pour un idéal jonction, V : est la tension apparaissant aux bornes de la cellule, R_s : résistance série (Ω), R_{sh} : résistance shunt(Ω).

La courbe courant-tension d'une cellule ou d'un panneau solaire, ci-après la courbe I-V est assez bien reproduite par ce simple circuit équivalent. Trois points de la courbe I-V sont également indiqués sur la figure (2.2), points de court-circuit, de puissance maximale et de circuit ouvert. Ces points représentatifs sont, avec leur variation en fonction de la température, les informations normales reprises dans les fiches techniques des constructeurs [10].

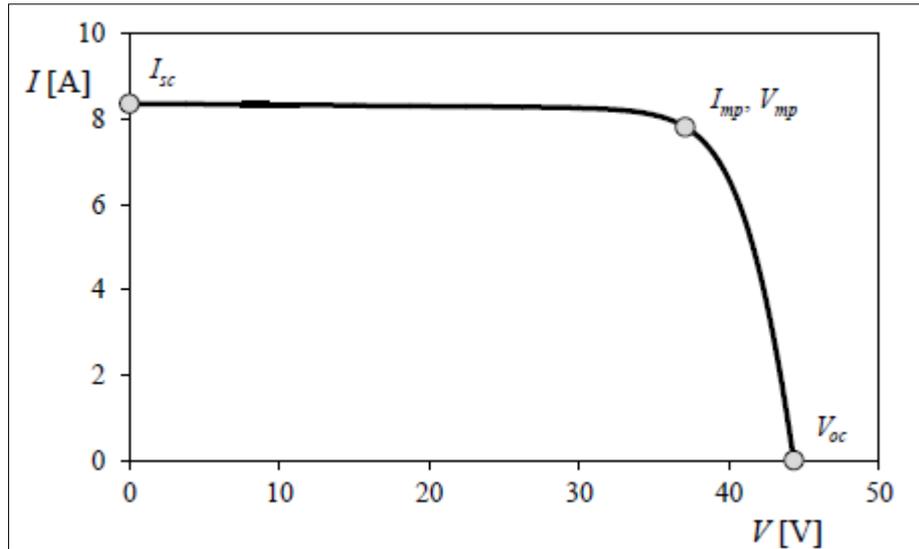


Figure 2- 2 : Courbe I-V d'un panneau solaire. Les trois points caractéristiques

Les équations à trois points (circuit ouvert, court-circuit et points de puissance maximale) indiqués sur la courbe de figure (2.2) sont :

Point V_{co} :

$$0 = I_{ph} - I_D \left(\exp \frac{V_{co}}{n_s AV_t} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

Point I_{sc} :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_D \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{n_s AV_t} - 1 \right) - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Point V_{mp}, I_{mp} :

$$I_{mp} = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{n_s AV_t} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

II. 3 Identification des paramètres d'un cellule photovoltaïque

Une connaissance précise des paramètres de panneaux photovoltaïques est indispensable pour la conception, le contrôle de qualité et pour des estimations de leurs performances. Ces paramètres sont souvent déterminés à partir de données expérimentales sous un éclairage et une température bien contrôlée.

Les constructeurs des cellules et des panneaux PV fournissent généralement une fiche technique (datasheet) contenant quelques paramètres de la cellule ou du panneau PV composé par un groupement de plusieurs cellules. Mais il y a d'autres paramètres qui ne sont pas fournis sur la fiche technique. En pratique la détermination de ces paramètres inconnus est très importante, le test standard d'un panneau photovoltaïque fournit la tension de circuit ouvert (V_{co}), courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à la puissance maximale (V_{mp}), le courant à la puissance maximale (I_{mp}), aux conditions standard de rayonnement de 1000 (W/m^2) et de température de 25°C.

L'objectif principal des méthodes d'identification, est de trouver les cinq paramètres de l'équation non linéaire $I(V)$, Compte tenu des valeurs données par toutes les fiches techniques fournies par les constructeurs des modules PV [9].

Les méthodes permettent de trouver à la fois, la meilleure solution de l'équation $I(V)$ pour le modèle photovoltaïque à une diode, y compris l'effet des résistances, série et parallèle, et garantir que la puissance maximale du modèle PV correspond à la puissance maximale du modèle réel [11].

II. 4 Méthode de Newton Raphson

La méthode de Newton-Raphson est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. C'est une méthode itérative basée sur l'évaluation de la fonction objectif ainsi que sa dérivée dans un point X_n . Sa formule s'écrit comme suit [12]:

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

Où

$f'(X_n)$: Evaluation de la dérivée de la fonction objectif $f(X)$ au point solution X_n .

$f(X_n)$: Evaluation de la fonction objectif $f(X)$ à la valeur actuelle X_n .

X_{n+1} : Mise à jour de la solution actuelle X_n .

II. 4. 1 Cas d'une équation

Pour former la fonction objective d'une d'équation a une seule variable $f(x) = 0$

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

II. 4. 2 Cas d'un système d'équations

Pour former la fonction objective d'un système d'équation $F(X_n) = 0$, on construit un système de N équations et de N inconnues.

$$\begin{cases} F(X_1) = 0 \\ F(X_2) = 0 \\ F(X_3) = 0 \\ \vdots \\ F(X_n) = 0 \end{cases}$$

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

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

Où :

$$X = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ \vdots \\ x(n) \end{bmatrix}, \quad F(X) = \begin{bmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ \vdots \\ F_n(X) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x(1)} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x(n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial x(1)} & \cdots & \frac{\partial F_n}{\partial x(n)} \end{bmatrix}$$

II. 5 Méthode d'identification analytique

Les méthodes analytiques représentent une solution à ce problème, car elles sont plus simples et ne nécessitent qu'une petite quantité de données (fréquemment incluses dans la fiche), dans cette méthode, seules les données du fabricant sont considérées comme disponibles pour le calcul des paramètres, En général, les fiches techniques commerciales ne contiennent que des informations sur les trois points caractéristiques de la courbe I-V pour différentes températures, à partir de ces trois points, il est possible d'extraire quatre conditions aux limites [12]. Comme ces conditions ne suffisent pas à déterminer les cinq paramètres du circuit équivalent, en l'absence de plus d'informations, certains auteurs proposent d'estimer le paramètre **A**, afin de réduire le nombre de paramètres à quatre, ce paramètre (**A**) est préférable à estimer car sa valeur est liée à une petite plage, il est généralement entre parenthèses [1, 1.5] pour une cellule solaire à simple jonction. En appliquant les quatre conditions aux limites au circuit équivalent Équation (2.1), il est possible d'obtenir les équations suivantes [11] :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{I_{cc}R_s}{AV_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc}R_s}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

$$0 = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{V_{co}}{AV_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

$$I_{mp} = I_{ph} + I_D \left(\exp\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{AV_t} - 1 \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

Avec quelques simplifications mineures et justifiées (c'est-à-dire en tenant compte de l'ordre de grandeur des différents termes dans les équations), les équations ci-dessus peuvent être simplifiées comme suit :

On a $I_{ph} \gg I_D$, le deuxième terme du membre de droite de l'équation (2.5) peut être négligé et l'expression (2.5) peut être réécrite comme suit [11] :

$$I_{ph} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{sc} \quad (2.8)$$

Encore une fois, il est possible d'estimer l'ampleur de chaque terme de l'équation (2.6), Certains auteurs laissent de côté le dernier terme de l'expression (2.6) [12], tandis que d'autres le conservent. Compte tenu du fait que la valeur de ce terme est supérieure à la plus faible restant dans l'expression, elle a été conservée dans les présents calculs. Enfin, à partir des équations (2.6) et (2.8), le courant de saturation, I_D peut être réduit à [11] :

$$I_D = \frac{(R_{sh} + R_s)I_{ph} - V_{oc}}{R_{sh} \exp\left(\frac{V_{co}}{AV_t}\right)} \quad (2.9)$$

Si l'équation (2.1) est évaluée au point de puissance maximale, l'expression suivante est obtenue :

$$I_{mp} = I_{ph} + I_D \left(\exp \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{AV_t} - 1 \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

Encore une fois, en analysant l'importance relative des différents termes de l'expression ci-dessus, il est possible de négliger le deuxième terme entre parenthèses. Enfin, l'expression suivante sans dépendance de I_{ph} et I_D peut-être dérivée des équations (2.8), (2.9) et (2.10) [11] :

$$I_{mp} = I_{ph} - \left(I_{sc} - \frac{V_{co} - R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \left(\exp \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{co}}{AV_t} \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (2.11)$$

La quatrième condition à analyser pour obtenir les quatre paramètres est le pic de puissance au point de puissance maximale. Cette condition a été évitée par certains auteurs dans des formulations analytiques [11]. Cependant, pour une meilleure simulation autour du point de puissance maximale, il est assez important de forcer la solution à le satisfaire. Comme il est bien connu, la puissance électrique peut être exprimée par :

$$P = V * I \quad (2.12)$$

En différenciant (2.12) par rapport à V,

$$\frac{dP}{dV} = \left(\frac{dI}{dV}\right)V + I \quad (2.13)$$

En imposant la condition de puissance crête ($P = 0$) à l'équation ci-dessus, l'expression suivante est obtenue [11] :

$$\left.\frac{dI}{dV}\right|_{[I_{mp}V_{mp}]} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (2.14)$$

En tenant également compte de l'équation (2.1) différenciée une fois par rapport à V, il est possible d'obtenir l'expression suivante à partir de l'équation. (2.14) :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_D}{AV_t} \left[\left(1 + \frac{dI}{dV}R_s\right) \cdot \exp\left(\frac{V + IR_s}{AV_t}\right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 + \frac{I}{V}R_s\right) \quad (2.15)$$

D'autre part, en tenant compte des expressions (2.8), (2.9) et (2.11), il est possible de dériver de l'équation. (2.15) une expression implicite de la résistance série R_s , en fonction des paramètres initiaux :

Équation pour R_s :

$$\frac{AV_t \cdot V_{mp}(2I_{mp} - I_{cc})}{\left(V_{mp}I_{cc} + V_{co}(I_{mp} - I_{cc})\right)(V_{mp} + I_{mp}R_s) - AV_t(V_{mp}I_{cc} - V_{co}I_{mp})} = \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s - V_{co}}{AV_t}\right) \quad (2.16)$$

Et enfin, l'expression ci-dessus combinée à l'équation (2.11) conduit à l'expression finale de la résistance shunt, R_{sh} en fonction de R_s et des paramètres initiaux [10] :

$$R_{sh} = \left(\frac{(V_{mp} - I_{mp}R_s)(V_{mp} - (I_{cc} - I_{mp})R_s - AV_t)}{(V_{mp} - I_{mp}R_s)(I_{cc} - I_{mp}) - AV_tI_{mp}}\right) \quad (2.17)$$

Comme indiqué ci-dessus, l'utilisation des équations ci-dessus est basée sur une estimation préalable du facteur d'idéalité A ,

La valeur de \mathbf{R}_s est obtenue à partir de l'équation (2.16) à l'aide de La méthode de *Newton-Raphson*, les autres valeurs sont calculées à partir des équations indiquées sur le tableau (2.1).

Équation pour \mathbf{R}_s :	$\frac{AV_t \cdot V_{mp}(2I_{mp} - I_{cc})}{(V_{mp}I_{cc} + V_{co}(I_{mp} - I_{cc})) (V_{mp} + I_{mp}\mathbf{R}_s) - AV_t(V_{mp}I_{cc} - V_{co}I_{mp})}$ $= \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}\mathbf{R}_s - V_{co}}{AV_t}\right)$
Équation pour \mathbf{R}_{sh} :	$R_{sh} = \left(\frac{(V_{mp} - I_{mp}\mathbf{R}_s)(V_{mp} - (I_{cc} - I_{mp})\mathbf{R}_s - AV_t)}{(V_{mp} - I_{mp}\mathbf{R}_s)(I_{cc} - I_{mp}) - AV_t I_{mp}} \right)$
Équation pour I_{ph} :	$I_{ph} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{cc}$
Équation pour I_D :	$I_D = \frac{(R_{sh} + R_s)I_{ph} - V_{co}}{R_{sh} \exp\left(\frac{V_{co}}{AV_t}\right)}$

Tableau 2- 1: Les équations de chaque paramètre ($\mathbf{R}_s, \mathbf{R}_{sh}, I_{ph}, I_D$):

Calculer \mathbf{R}_s par La méthode de Newton-Raphson

$$R_{s_{n+1}} = R_{s_n} - \frac{f(R_{s_n})}{f'(R_{s_n})} \quad (2.19)$$

A partir de l'équation (2.16) on a :

$$f(\mathbf{R}_s) = \frac{AV_t \cdot V_{mp}(2I_{mp} - I_{sc})}{(V_{mp}I_{sc} + V_{co}(I_{mp} - I_{cc})) (V_{mp} + I_{mp}\mathbf{R}_s) - AV_t(V_{mp}I_{cc} - V_{co}I_{mp})} - \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}\mathbf{R}_s - V_{co}}{AV_t}\right) \quad (2.20)$$

II. 6 Méthodes basées sur l'analyse de courbe (I-V)

La méthode basée sur l'analyse des courbes est basée sur l'extraction de cinq équations à cinq points connus, ces équations contiennent cinq inconnues, La résolution de ces équations conduit à déterminer les paramètres caractéristiques du panneau photovoltaïque (PV). Le choix des points se fait de plusieurs manières. Dans ce travail nous avons choisi deux méthodes :

- La première méthode dépend des trois points caractéristiques (I_{cc} , V_{co} , P_{max}), et les deux valeurs différentielles requises aux points de court-circuit et de circuit ouvert peuvent être facilement calculées avec les données du modèle de base du fabricant.
- Deuxième Méthode qui basé sur l'analyse de courbe (I-V) dépend des trois points caractéristiques (I_{cc} , V_{co} , P_{max}), et deux points choisis aléatoirement à partir de la courbe

II. 6. 1 Première Méthode qui basé sur la courbe (I-V):

Pour simplifier les procédures de calcul pour obtenir les cinq paramètres, en utilisant une méthode d'ajustement de courbe par morceaux et un modèle PV, les deux valeurs différentielles requises aux points de court-circuit et de circuit ouvert peuvent être facilement calculées avec les données du modèle de base du fabricant.

Par la suite, les cinq paramètres du modèle à cinq paramètres peuvent être obtenu directement par plusieurs équations explicites. Les résultats expérimentaux démontrent que cette méthode a une grande précision dans la simulation des courbes caractéristiques I-V des modules et des panneaux photovoltaïques dans toutes les conditions de fonctionnement, et qu'elle peut également prédire la production de centrales photovoltaïques réelles [13] .

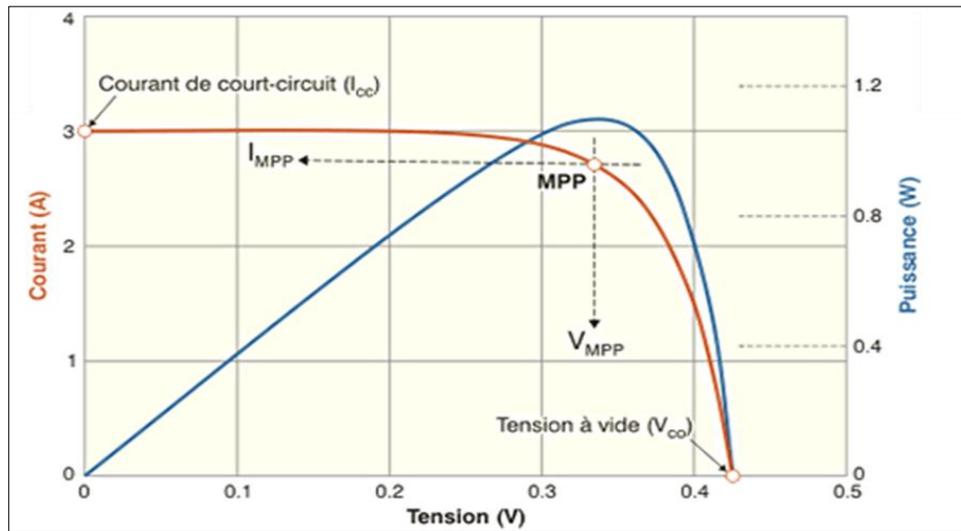


Figure 2- 3 : Les trois points sur la courbe I-V.

a. Premier point ($V=V_{co}$)

Au point de circuit ouvert sur une courbe expérimentale (I-V), $V=V_{co}$ et $I=0$. Avec ces substitutions dans l'équation (2.1), la première des cinq équations nécessaires est :

$$0 = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{V_{co}}{An_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (2.21)$$

b. Deuxième point ($I=I_{cc}$)

Au point de court-circuit sur la courbe(I-V), $V=0$ et $I=I_{cc}$. Avec ces substitutions dans l'équation (2.1), la deuxième équation nécessaire est :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{I_{cc}R_s}{An_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc}R_s}{R_{sh}} \quad (2.22)$$

c. Troisième point (P_{mp})

Au point de puissance maximale P_{mp} (V_{mp}, I_{mp}), $V=V_{mp}$ et $I=I_{mp}$, Avec ces substitutions dans l'équation (2.1), la troisième équation nécessaire est :

$$I_{mp} - I_{ph} + I_{01} \left(\exp\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{An_s V_t} - 1 \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (2.23)$$

d. **Quatrième point** ($[\frac{dI}{dV}]_{I=0}$) :

Pour obtenir la quatrième équation suivante, il est commode d'utiliser la dérivée de l'équation (2.1) par rapport à V :

$$-\frac{dI}{dV} = -I_D \left[\frac{1}{AV_t} \left(1 - \frac{dI}{dV} R_s \right) \cdot \exp \left(\frac{V + IR_s}{An_s V_t} \right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{I}{V} R_s \right) \quad (2.24)$$

Au point de circuit ouvert sur la courbe (I-V), $V = V_{co}$, $I = 0$, et

$$\frac{dI}{dV} = \left[\frac{dI}{dV} \right]_{I=0}$$

Avec ces substitutions dans l'équation (2.23), la troisième équation nécessaire est :

$$\left(\frac{dI}{dV} \right)_{I=0} = -I_D \left[\frac{1}{An_s V_t} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV} \right)_{I=0} R_s \right) \cdot \exp \left(\frac{V_{oc}}{An_s V_t} \right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV} \right)_{I=0} R_s \right) \quad (2.25)$$

e. **Cinquième point** ($[\frac{dI}{dV}]_{V=0}$) :

Au point de court-circuit sur la courbe I-V, $V = 0$, $I = I_{cc}$, et

$$\frac{dI}{dV} = \left[\frac{dI}{dV} \right]_{V=0}$$

Avec ces substitutions dans l'équation (2.24), la quatrième équation nécessaire est :

$$\left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0} = -I_D \left[\frac{1}{An_s V_t} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0} R_s \right) \cdot \exp \left(\frac{I_{cc} R_s}{An_s V_t} \right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV} \right)_{V=0} R_s \right) \quad (2.26)$$

On peut aussi ajouter une équation supplémentaire avec ces substitutions à l'équation (2.24) au point de puissance maximale [13]:

En tout point de la courbe I-V :

$$P = V * I \quad (2.27)$$

En différenciant (2.27) par rapport à V,

$$\frac{dP}{dV} = \left(\frac{dI}{dV}\right)V + I \quad (2.28)$$

Pour une puissance maximale

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.29)$$

De sorte que (2.29) devient

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (2.30)$$

Au point de puissance maximale, $V = V_{mp}$, $I = I_{mp}$:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I_{mp}}{V_{mp}} \quad (2.31)$$

Avec ces substitutions à l'équation (2.24), l'équation supplémentaire est

$$-\frac{dI_{mp}}{dV_{mp}} = -I_D \left[\frac{1}{An_s V_t} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{An_s V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \frac{I_{mp}}{V_{mp}} R_s \right) \quad (2.32)$$

Les équations (2.21), (2.22), (2.23), (2.25) et (2.26) comprennent les cinq équations indépendantes nécessaires pour résoudre les cinq paramètres I_{ph} , I_D , A , R_s et R_{sh} . Pour rendre ces équations quantitatives, il suffit de substituer les valeurs de V_{co} , I_{cc} , V_{mp} , I_{mp} , $\left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0}$, et $\left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0}$ obtenues à partir de la courbe I-V dans les cinq équations indépendantes.

Équation 1 :	$0 = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{V_{co}}{An_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}}$
Équation 2 :	$I_{sc} = I_{ph} - I_D \left[\exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{An_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}}$
Équation 3 :	$I_{mp} = I_{ph} + I_{01} \left(\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{An_s V_t}\right) - 1 \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}}$
Équation 4 :	$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0} = -I_D \left[\frac{1}{An_s V_t} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0} R_s \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{co}}{An_s V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0} R_s \right)$

Équation 5	$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} = -I_D \left[\frac{1}{An_s V_t} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} R_s \right) \cdot \exp\left(\frac{I_{cc} R_s}{An_s V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} R_s \right)$
------------	---

Tableau 2- 2 : les cinq équations indépendantes nécessaires pour résoudre les cinq paramètres ($R_s, R_{sh}, A, I_{ph}, I_D$):

Les cinq équations peuvent ensuite être résolues simultanément pour les cinq paramètres par un ordinateur numérique en utilisant la technique de Newton-Raphson pour les équations simultanées.

Pour former la fonction objectif, l'équation $I = F(V)$ donnée par l'expression (2.18) est réécrite sous la forme suivante [9]:

$$F(I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{V+IR_s}{A_1 n_s V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I \quad (2.33)$$

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

$$\begin{cases} F(I_{m1}, V_{m1}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m2}, V_{m2}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m3}, V_{m3}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ \vdots \\ F(I_{mN}, V_{mN}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \end{cases}$$

Où :

I_m, V_m : Sont respectivement le courant et la tension mesurés.

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

$$X_{n+1} = X_n - J^{-1}(X_n)F(X_n) \quad (2.34)$$

Où :

$$X = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_D \\ A \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix}, \quad F(X) = \begin{bmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ F_4(X) \\ F_5(X) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_5}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(5)} \end{bmatrix}$$

Les cinq équations :

$$F(1) = x(1) - x(2) \left[\exp\left(\frac{V_{co}}{x(3)n_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{x(5)} \quad (2.35)$$

$$F(2) = x(1) - x(2) \left[\exp\left(\frac{x(4)I_{cc}}{x(3)n_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{I_{cc}x(4)}{x(5)} - I_{sc} \quad (2.36)$$

$$F(3) = x(1) + x(2) \left(\exp\frac{V_{mp} + I_{mp}x(4)}{x(3)n_s V_t} - 1 \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp}x(4)}{x(5)} - I_{mp} \quad (2.37)$$

$$F(4) = -x(2) \left[\frac{1}{x(3)n_s V_t} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0} x(4) \right) \cdot \exp\left(\frac{V_{co}}{x(3)n_s V_t}\right) \right] - \frac{1}{x(5)} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0} x(4) \right) - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{I=0} \quad (2.38)$$

$$F(5) = -x(2) \left[\frac{1}{x(3)n_s V_t} \left(1 - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} R_s \right) \cdot \exp\left(\frac{I_{cc}x(4)}{x(3)n_s V_t}\right) \right] - \frac{1}{R_{sh}} \left(\left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} x(4) \right) - \left(\frac{dI}{dV}\right)_{V=0} \quad (2.39)$$

II. 6. 2 Deuxième Méthode qui basé sur la courbe (I-V)

Cette méthode est utilisée pour trouver les paramètres inconnus en utilisant plus de trois points de la courbe (I-V) au lieu de seulement les trois points remarquables en fonction du nombre d'inconnues pour chaque modèle. Pour le modèle à une diode, cinq points sont nécessaires pour trouver les paramètres inconnus. Cette méthode, basée sur la résolution d'un système de cinq équations non linéaires résultant de l'application de l'équation (2.1) à cinq points qui doivent être : le point de court-circuit $(0, I_{cc})$, le point de circuit ouvert $(V_{co}, 0)$, le point de puissance maximales (V_{mp}, I_{mp}) , et deux autres points (V_x, I_x) et (V_{xx}, I_{xx}) tel que : $V_x = \frac{1}{2} V_{co}$ et $V_{xx} = \frac{1}{2} (V_{co} - V_{mp})$.

Ces points sont mentionnés sur le tracé de la figure (2.2)

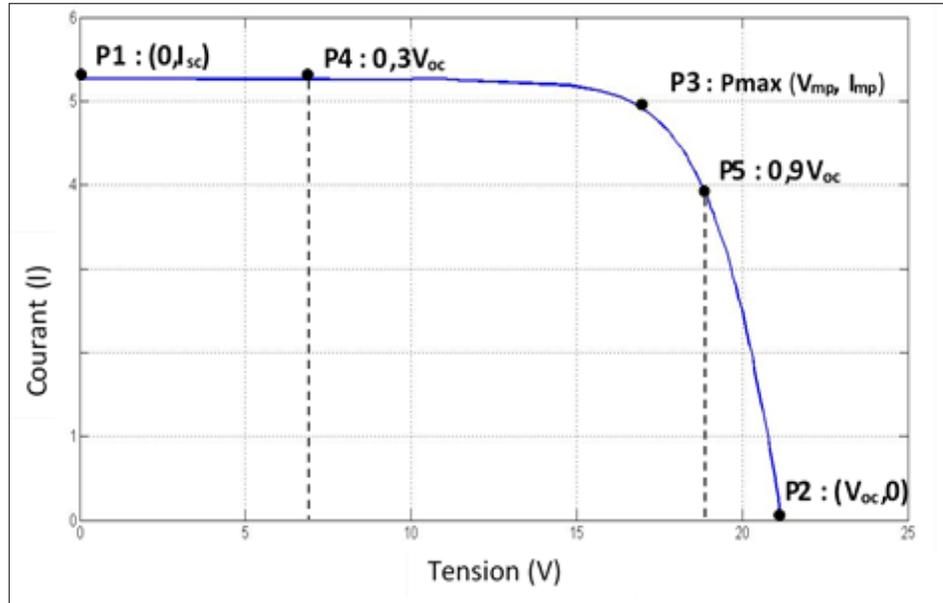


Figure 2- 4 : Les cinq points sur la courbe I-V

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

Les cinq points :

Point 1 : $(0, I_{sc})$ $I_{sc} - I_{ph} + I_D \left(\exp \frac{I_{cc} R_s}{n_s A V_t} - 1 \right) + \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} = 0$ (2.39)

Point 2 : $(V_{co}, 0)$ $I_{ph} - I_D \left(\exp \frac{V_{co}}{n_s A V_t} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} = 0$ (2.40)

Point 3 : (V_{mp}, I_{mp}) $I_{mp} - I_{ph} + I_{01} \left(\exp \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{n_s A V_t} - 1 \right) + \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}} = 0$ (2.41)

Point 4 : $I_x = I_{0,3V_{co}}$
 $V_x = 0,3V_{co}$ $I_x - I_{ph} + I_D \left(\exp \frac{V_x + I_x R_s}{n_s A_1 V_t} - 1 \right) + \frac{V_x + I_x R_s}{R_{sh}} = 0$ (2.42)

Point 5 : $I_{xx} = I_{0,9V_{co}}$
 $V_{xx} = 0,9V_{co}$ $I_{xx} - I_{ph} + I_D \left(\exp \frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{n_s A_1 V_t} - 1 \right) + \frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{R_{sh}} = 0$ (2.43)

Les équations allant de (2.43) à (2.46) constituent donc un système non linéaire qu'on peut résoudre avec des méthodes itératives connues comme la méthode de **Newton-Raphson**, et pour

former la fonction objectif, l'équation $I = F(V)$ donnée par l'expression (2.18) est réécrite sous la forme suivante :

$$F(I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{V+IR_s}{An_s V t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I \quad (2.44)$$

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

$$\begin{cases} F(I_{m1}, V_{m1}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m2}, V_{m2}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ F(I_{m3}, V_{m3}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \\ \vdots \\ F(I_{mN}, V_{mN}, I_{ph}, I_D, A, R_s \text{ et } R_{sh}) = 0 \end{cases}$$

Où I_m, V_m sont respectivement le courant et la tension mesurés.

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

$$X_{n+1} = X_n - J^{-1}(X_n)F(X_n) \quad (2.45)$$

Où :

$$X = \begin{bmatrix} I_{ph} \\ I_D \\ A \\ R_s \\ R_{sh} \end{bmatrix}, \quad F(X) = \begin{bmatrix} F_1(X) \\ F_2(X) \\ F_3(X) \\ F_4(X) \\ F_5(X) \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_1}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_2}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_3}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_4}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_4}{\partial x(5)} \\ \frac{\partial F_5}{\partial x(1)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(2)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(3)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(4)} & \frac{\partial F_5}{\partial x(5)} \end{bmatrix}$$

✓ Les cinq équations :

$$F(1) = x(1) - x(2) \left[\exp \left(\frac{V_{co}}{x(3)n_s V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{x(5)}$$

$$F(2) = x(1) - x(2) \left[\exp \left(\frac{x(4)I_{cc}}{x(3)n_s V_t} \right) - 1 \right] - \frac{I_{cc}x(4)}{x(5)} - I_{sc}$$

$$F(3) = x(1) - x(2) \left(\exp \frac{V_{mp} + I_{mp}x(4)}{x(3)n_s V_t} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + I_{mp}x(4)}{x(5)} - I_{mp}$$

$$F(4) = x(1) - x(2) \left(\exp \frac{V_X + I_X x(4)}{x(3)n_s V_t} - 1 \right) - \frac{V_X + I_X x(4)}{x(5)} - I_X$$

$$F(5) = x(1) - x(2) \left(\exp \frac{V_{xx} + I_{xx}x(4)}{x(3)n_s V_t} - 1 \right) - \frac{V_{xx} + I_{xx}x(4)}{x(5)} - I_{xx}$$

II. 7 Conclusion

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

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

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

Ensuite, nous avons adopté une méthode d'identification qui est basée sur l'optimisation à fin d'identifier ces paramètres à partir de la caractéristique I(V) expérimentale,

Chapitre III

Identification d'un panneau photovoltaïque par PSO

III - Identification d'un panneau photovoltaïque par PSO

III. 1 Introduction

L'optimisation, heuristique, mathématique ou autres, doté d'informations nécessaires est l'ajustement des variables pour améliorer le parcours calculé (résultats : décision optimale) par rapport au chemin requis selon certaine gamme d'intérêt ; en bref, l'optimisation est l'ajustement de variables dont le but d'obtenir une solution meilleure pour un processus donné.

Les métaheuristiques sont une famille d'algorithmes stochastiques destinés à résoudre des problèmes d'optimisation "difficile", utilisées dans de nombreux domaines, ces méthodes présentent l'avantage d'être généralement efficaces, sans pour autant que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme qu'il utilise [14].

Ce chapitre présente les métaheuristiques les plus utilisées dans la littérature. La méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP) pour l'identification des paramètres du PV.

III. 2 Métaheuristique

Une métaheuristique est un algorithme d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficiles pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace, les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution.

Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple Recherche Locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettant d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents.

En d'autres termes, ces algorithmes se veulent des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé, Les métaheuristiques sont réparties en deux catégories comme suit [15] :

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

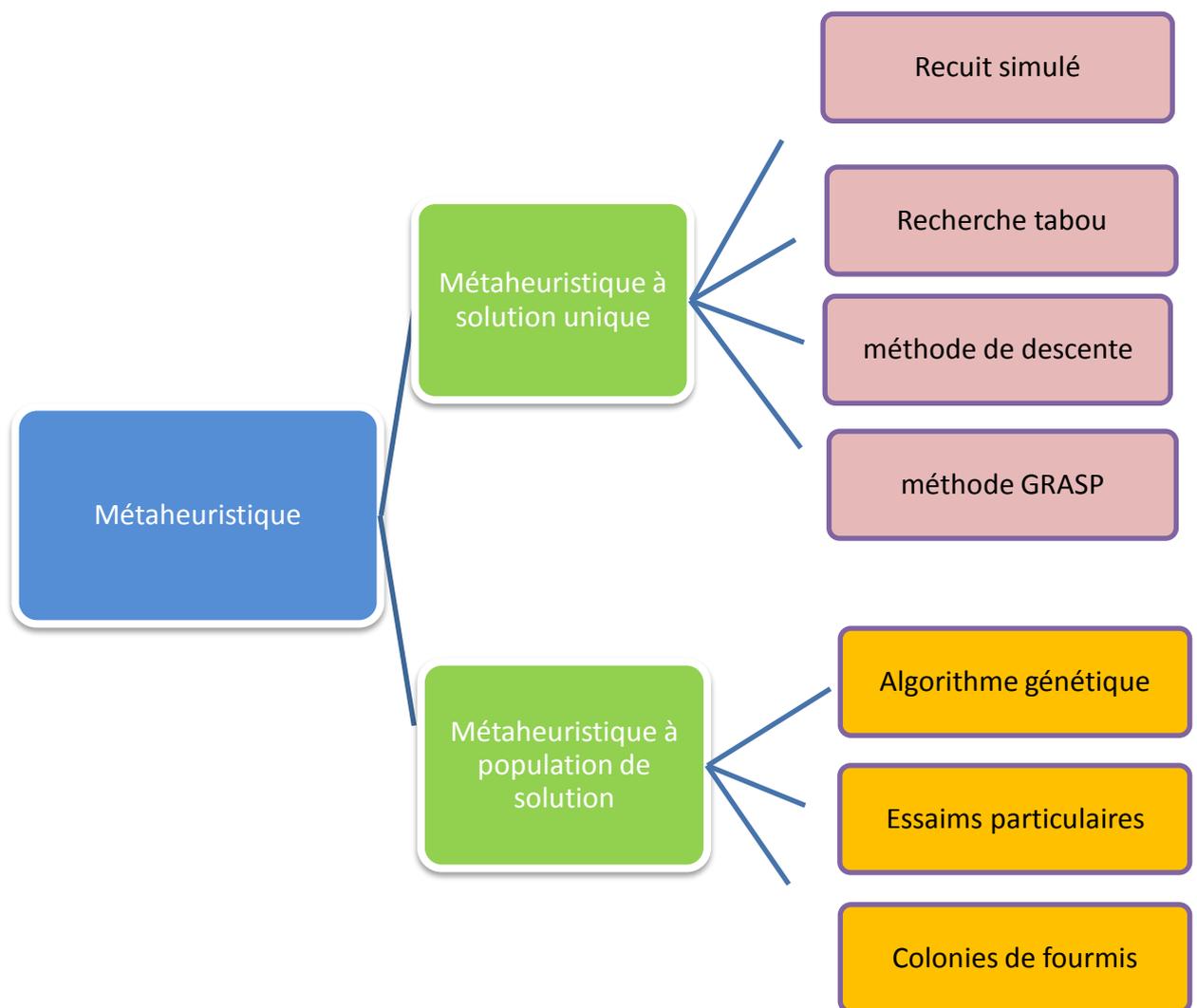


Figure 3- 1 : catégories des métaheuristiques

III. 2. 1 Métaheuristique à solution unique

Les métaheuristicques à solution unique ont plusieurs noms : elles peuvent être appelées méthodes de recherche locale ou bien méthodes de trajectoire. Leur mécanisme consiste à faire évoluer itérativement une solution dans l'espace de recherche afin de se diriger vers l'optimum global. Nous présentons les méthodes les plus connues qui sont : la méthode de descente, le recuit simulé, la recherche tabou, et la méthode GRASP [15].

a. *La méthode de descente*

La méthode de descente peut sembler la plus intuitive et la plus simple à comprendre dans le domaine de l'optimisation. Elle est d'ailleurs appelée hill climbing dans les problèmes de maximisation. L'algorithme commence par sélectionner aléatoirement une solution, puis à chaque itération la meilleure solution dans le voisinage de la solution courante est sélectionnée. L'algorithme s'arrête lorsque plus aucune amélioration n'est possible. Pour choisir la meilleure solution dans le voisinage il existe plusieurs stratégies différentes, l'algorithme peut choisir celle qui a le meilleur fitness par rapport à toutes les autres solutions dans le voisinage, ou choisir la première solution du voisinage qui améliore le fitness, il peut aussi sélectionner la solution qui améliore le moins la fitness ("la moins bonne solution"), il est aussi possible de choisir la solution au hasard, etc. La principale faiblesse de cette méthode de descente est qu'elle se trouve facilement piégée dans un optimum local. Une amélioration de cet algorithme consiste à lancer plusieurs redémarrages lorsqu'un optimum local est trouvé, en repartant d'une nouvelle solution générée aléatoirement, il s'agit d'algorithme de descente avec relance (ou random-restart hill climbing).

b. *Recuit simulé*

Le recuit simulé, simulated annealing (SA), tire son principe de la métallurgie. Il consiste à effectuer des cycles de refroidissement lent et de réchauffage d'un matériau afin de minimiser son énergie, en s'appuyant sur les lois de thermodynamique de Boltzmann. Kirkpatrick, C.D. Gelatt et M.P. Vecchi en 1983, puis V. Černý en 1985, ont adapté cette méthode à l'optimisation : la fonction objectif f correspond à l'énergie du matériau, et les paramètres de l'algorithme sont le critère d'arrêt, la température initiale T_0 (plusieurs méthodes existent), le critère de changement de palier de température, et la fonction de décroissance de la température. Lors de la recherche de l'optimum la température diminue, l'algorithme

commence par une marche aléatoire, puis les mauvaises solutions sont de moins en moins souvent acceptées, et l'algorithme converge vers une solution de l'espace de recherche. Un compromis est donc à trouver afin d'adapter la décroissance de la température pour éviter une trop forte décroissance de celle-ci et ainsi risque de piéger l'algorithme dans un optimum local. D'ailleurs, il existe plusieurs lois de décroissance de la température [15].

Le recuit simulé a été adapté pour résoudre les problèmes d'optimisation continue par Patrick Siarry, de plus il a connu un large essor dans différents domaines d'application.

c. *Recherche tabou*

La méthode de recherche tabou a été proposée par Fred Glover en 1986, elle introduit la prise en compte du passé par l'utilisation d'une mémoire des solutions explorées lors de la recherche de l'optimum. Cette mémoire est appelée liste tabou car elle contient les solutions déjà été visitées et par lesquelles il est interdit de repasser. L'objectif de cette mémoire est d'empêcher l'algorithme d'être piégé dans un optimum local car elle l'autorise à passer par des solutions qui détériorent le fitness. La taille de la mémoire, le nombre d'éléments mémorisés, est un paramètre de l'algorithme qui permet de prendre en compte l'équilibre de diversification et d'intensification évoqué précédemment. En effet, si la mémoire est faible alors elle va favoriser l'intensification, car un nombre de solutions restreint seront interdites. Cependant, plus la taille de la mémoire augmente, et plus la diversification est favorisée, car l'algorithme pourra de moins en moins visiter les régions précédentes qui ont de grandes chances d'être voisines à la solution actuelle. La procédure de cette métaheuristique commence par une première solution initiale qui est générée aléatoirement, puis la méthode va sélectionner itérativement la meilleure solution dans son voisinage et mémoriser la solution précédente. Ceci permet alors d'éviter les phénomènes dits de cyclage (l'algorithme tourne en boucle sur les mêmes solutions). Il existe des méthodes ayant une mémoire adaptative, c'est-à-dire que la taille de la mémoire va pouvoir s'adapter selon le contexte de la recherche et même créer de nouvelles solutions [15].

d. *Le GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure)*

Un algorithme glouton suit un principe très simple consistant à améliorer la solution en recherchant dans son voisinage une solution meilleure. Il va donc agir localement dans une zone spécifique. La procédure de recherche gloutonne aléatoire adaptative, plus couramment appelée

méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), a été proposée par Feo et Resende . Cette méthode alterne les phases de construction et d'amélioration jusqu'à atteindre le critère d'arrêt. L'étape de la construction du GRASP est similaire à une méthode gloutonne randomisée, elle génère une solution réalisable issue d'une liste de choix potentiels appelée restricted candidate list (RCL). Cette liste est triée, c'est la partie gloutonne de l'algorithme. L'étape d'amélioration utilise la solution générée lors de la phase précédente comme une solution initiale pour effectuer une recherche locale. Cette dernière peut être une descente, une recherche tabou, ou toute autre heuristique.

III. 2. 2 Métaheuristique à base de population

Contrairement aux méthodes à solution unique qui font intervenir une seule solution, les méthodes de recherche à population manipulent un ensemble de solutions appelé population. Le principe général de toutes ces méthodes consiste à combiner des solutions entre elles pour en former de nouvelles en essayant d'hériter des 'bonnes' caractéristiques des solutions parents. Un tel processus est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint. Parmi ces algorithmes à population, on peut citer [16] :

- Algorithmes génétiques
- Optimisation par essaims de particules
- Algorithme de colonies de fourmis

a. *Algorithme génétique (AG)*

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

Les AGs sont basés sur les étapes suivantes :

1. Choisir le codage des solutions
2. Générer une population initiale de taille fixe N , formée d'un ensemble fini d'individus, dite génération initiale.
3. Définir une fonction d'évaluation (fitness) permettant d'évaluer un individu et le comparer aux autres.
4. Choisir les individus par le mécanisme de couplage.
5. Générer de nouveaux individus à l'aide des opérateurs génétiques en utilisant : l'opérateur de croisement manipule la structure des chromosomes des parents afin de produire des individus meilleurs ou différents, cet opérateur est effectué selon une probabilité de croisement P_C .

L'opérateur de mutation évite d'établir des populations uniformes incapables d'évoluer il consiste à varier les valeurs de gènes de chromosomes selon une probabilité de mutation P_m

b. *Optimisation par colonie de fourmi (OCF)*

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

c. *Algorithme d'essaim particule (PSO)*

Les algorithmes d'essaims particuliers connus sous le nom de Particles swarm optimisation (PSO) ont été introduits par Kennedy et Eberhart]. Ces algorithmes s'inspirent de particules (des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, ces animaux se déplacent en groupe pour trouver de la nourriture.

Les individus de l'algorithme sont appelés particules (agents), dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée, et en fonction de la configuration adoptée du voisinage.

Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances : la propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers son meilleur voisin.

III. 3 Optimisation par Essaim Particulaire

III. 3. 1 Principe général

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio - psychologue) en 1995 [Kenn 95]. Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes alors qu'individuellement chaque individu a une « intelligence » limitée, et ne dispose que d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim. L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs [17].

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.

Kennedy et Eberhart (1995a) ont donné un modèle décrivant le comportement de PSO dans un programme informatique. Après peu de temps, ils ont réalisé que leur modèle pouvait être développé en tant qu'algorithme d'optimisation et ils l'appelaient PSO. Le terme (particule)

est utilisé pour représenter les poissons, les abeilles, les oiseaux ou tout autre type de agents naturels qui ont le comportement d'essaim [18].

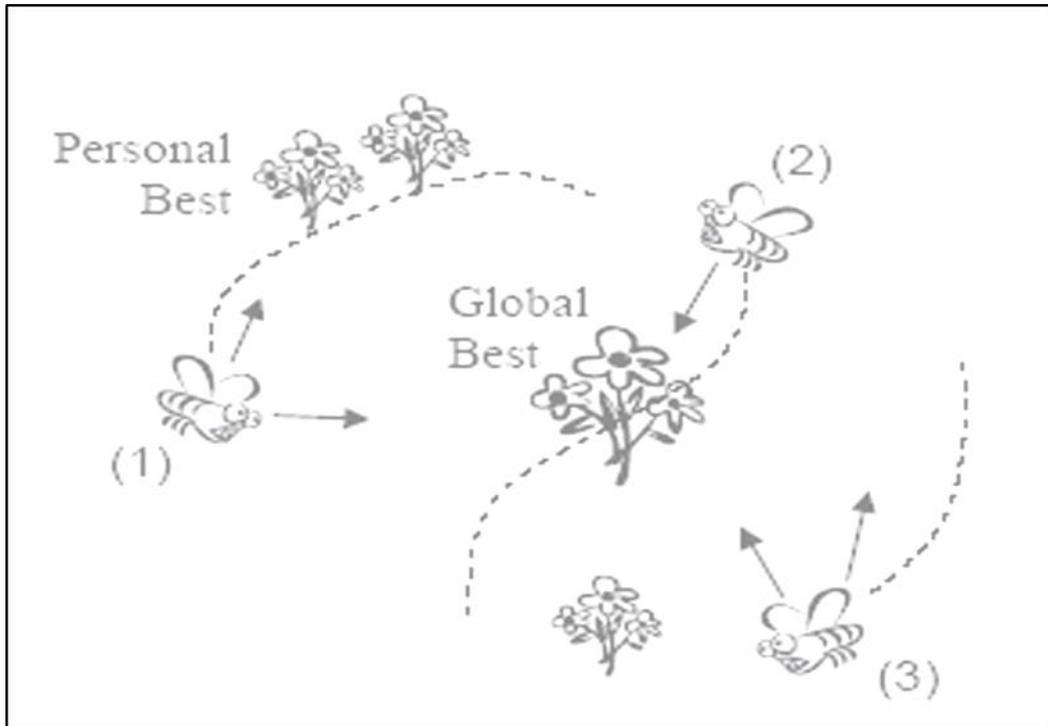


Figure 3- 2 : Simulation de PSO par essaim d'abeilles à la recherche de fleurs

III. 3. 2 Algorithme PSO (PSOA)

Les détails de PSOA sont présentés comme suit : s'il y a un essaim de P oiseaux ou des particules, chaque particule représentant un point possible (solution) dans l'espace de problème, *S. Kennedy et Eberhart (2001)* à l'origine a proposé que la position x^i , pour chaque particule i , se dégage en tant que :

$$x_{k+1}^i = x_k^i + v_{k+1}^i \quad (3.1)$$

et sa vitesse v^i est calculée comme suit :

$$v_{k+1}^i = v_k^i + c_1 \cdot r_1 \times (p_k^i - x_k^i) + c_2 \cdot r_2 \times (p_k^g - x_k^i) \quad (3.2)$$

L'indice k indique l'incrément d'un temps. P_k^i représente la meilleure position de la particule i au temps k jusqu'à présent, tandis que P_k^g est la meilleure position globale dans toutes les particules dans l'essaim à temps k . r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires compris entre

0 et 1, c_1 et c_2 représentent les paramètres de mise à l'échelle cognitives et sociales respectivement, qui sont choisis de telle sorte que $c_1 = c_2 = 2$ Donner une moyenne égale à 1 lorsqu'ils sont multipliés par r_1 et r_2 (Kennedy, Eberhart et Shi 2001).

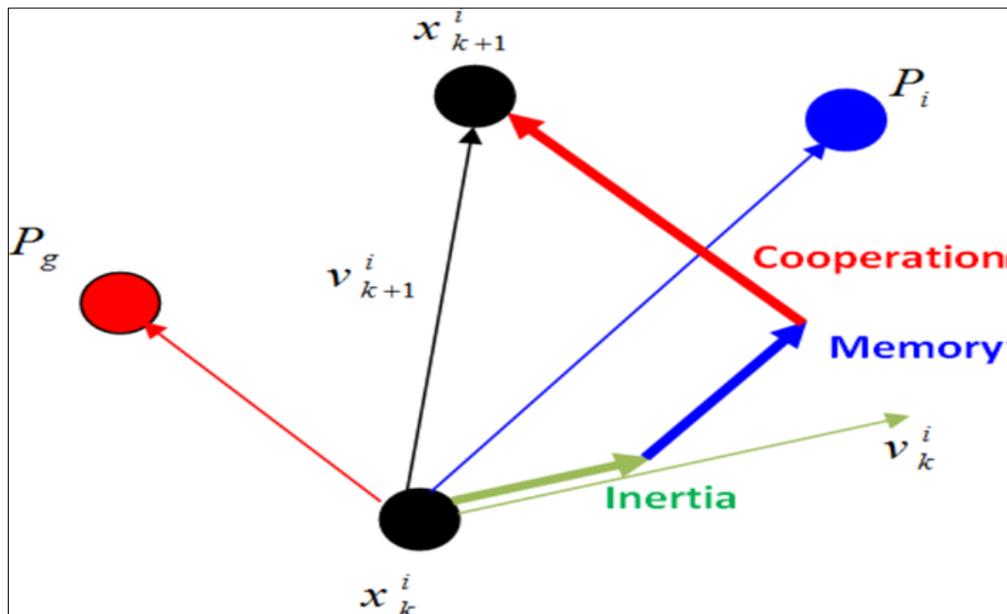


Figure 3- 3 : Met à jour la vitesse et la position du PSO dans l'espace bidimensionnel

L'utilisation de ces valeurs fait que les particules dépassent la cible dans la moitié du temps. L'équation (3.2) est utilisée pour déterminer la nouvelle vitesse v_{k+1}^i de la $i^{\text{ème}}$ particule à l'instant k , tandis que l'équation (3.1) donne le $i^{\text{ème}}$ nouvelle position de particule x_{k+1}^i en ajoutant son v_{k+1}^i à sa position actuelle x_k^i . La figure (3.2) montre la mise à jour de la vitesse et de la position des particules PSO dans espace bidimensionnel [19]. Appelons le meilleur fitness à ce jour de valeur de la particule i à P_k^i f_{best}^i et le meilleur globale fitness à ce jour la valeur de la particule i à P_k^g comme f_{best}^g , Le pseudo-code PSOA général peut être décrit dans la figure (3.3).

III. 4 Identification des paramètres d'un PV par (PSO)

L'étape essentielle de l'identification est le processus d'extraction des valeurs des paramètres électriques des modèles. Les paramètres du modèle de cellule PV et l'équation mathématique ne font pas partie de la fiche technique du module et doivent être extraits.

$$I = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{V + I R_S}{A V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{sh}} \quad (3.3)$$

Dans ce travail, l'algorithme PSO est appliqué pour l'extraction des paramètres, l'algorithmes PSO adaptés pour l'extraction de paramètres sont identifiés pour le modèle à une diode avec le vecteur de solution : $P = (I_{ph}, I_d, R_s, R_{sh}, A)$. Les limites inférieure et supérieure des paramètres sont déterminées à l'aide de calcul analytique, L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est la fonction optimisée de la fonction d'erreur. L'erreur pour un modèle à une diode est indiquée dans l'équation (3.4). L'erreur absolue individuelle (IAE) et la somme de l'erreur absolue individuelle (SIAE) sont présentées dans les l'équations (3.5) et (3.6) [19].

$$F(V, I, X) = I_{ph} - I_D \left(e^{\frac{V + I R_S}{A V_t}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{sh}} - I \quad (3.4)$$

$$IAE = |F(V, I, X)| \quad (3.5)$$

$$SIAE = \sum_I^K |F(V, I, X)| \quad (3.6)$$

Alors que L'erreur quadratique moyenne RMSE est définie par l'équation (3.7).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_I^K (F(V, I, X))^2} \quad (3.7)$$

Où K est le nombre de données mesurées et le reste des principales exigences de l'algorithme est $N = 2000$ qui représente le nombre d'essaims. Dans cette technique, n particules sont initiées aléatoirement comme $(X_k = (X_{k1}, X_{k2}, \dots, X_{kn}), k = (1, 2, \dots, n))$ de l'essaim pour la taille de la population (N), dans le maximum et intervalle minimum (V_{max}, V_{min}), et ses performances sont évaluées sur la fonction proposée. La vitesse des particules $V_k = (V_{k1}, V_{k2}, \dots, V_{kn})$ a été mise à jour comme indiqué dans l'équation (3.8) :

$$V_{t+1}^i = w \cdot V_t^i + c_1 \cdot \text{rand} \times (P_t^i - X_t^i) + c_2 \cdot \text{rand} \times (P_t^g - X_t^i) \quad (3.8)$$

Où, w : poids, t : itération, c_1, c_2 : facteurs de connaissance, P_t^i : meilleure position de particule du propriétaire, P_t^g : meilleure position globale d'essaim. La direction de la particule volante interagit dynamiquement entre l'expérience de vol simple et commune. L'algorithme est complété en trouvant la meilleure solution propre de chaque particule et la meilleure solution globale de l'essaim complet [20]. Ensuite, l'emplacement de chaque particule a été mis à jour après avoir changé sa vitesse, comme dans l'équation (3.9):

$$X_{t+1}^i = X_t^i + V_{t+1}^i \quad (3.9)$$

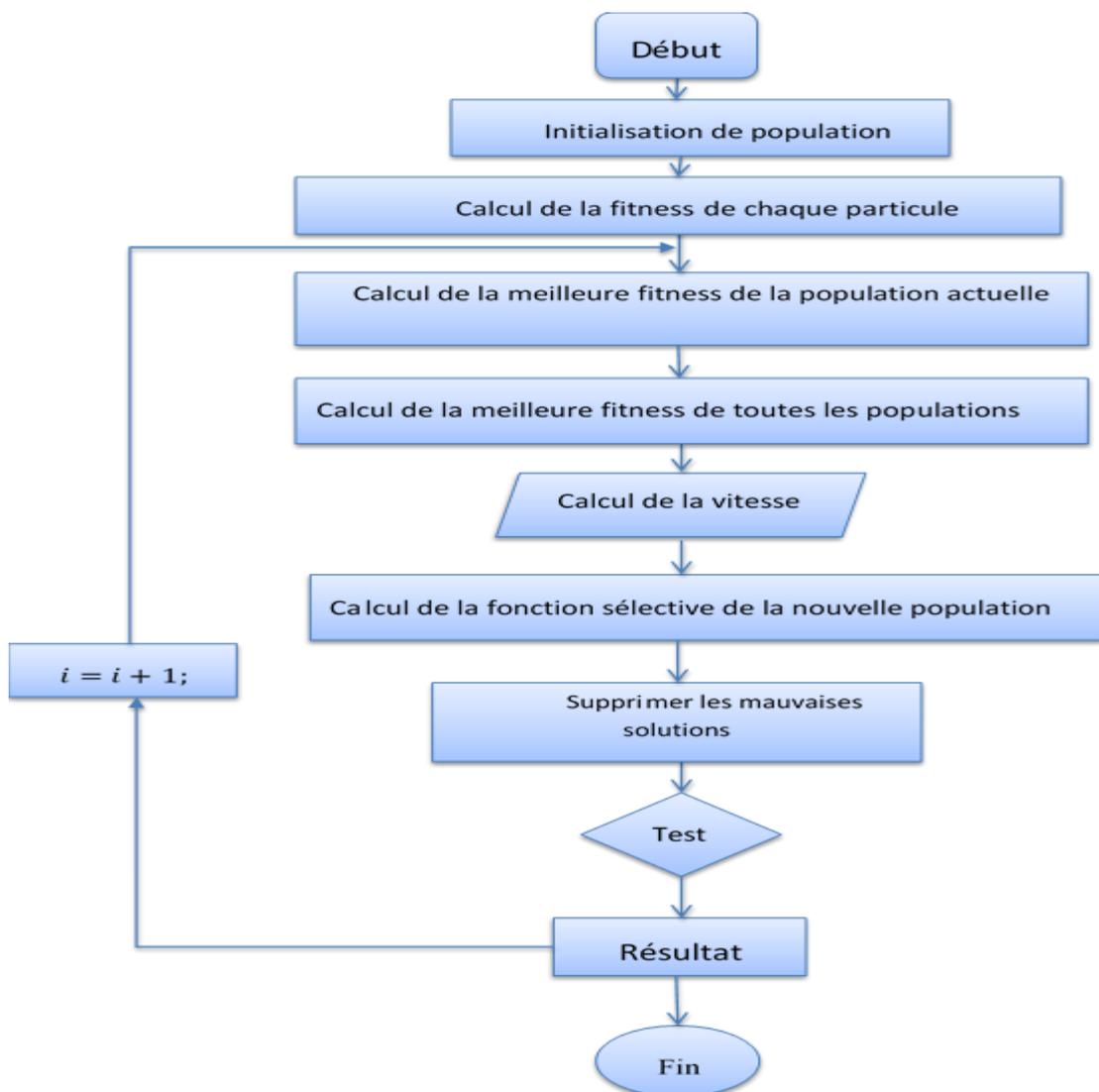


Figure 3- 4 : Organigramme de PSO

III. 5 Résultats obtenus par l'algorithme PSO

a. *L'étude expérimentale*

L'étude expérimentale a été réalisée sur un panneau solaire KC200GT, Le constructeur de panneau photovoltaïque fourni les paramètres du panneau (I_{cc} , V_{co} , I_{pm} , V_{pm}) sous les conditions standard de fonctionnement (une insolation de $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$, $1.5 AM$). Le tableau (3.1) montre les paramètres du panneau solaire fourni par le constructeur :

Paramètre	Valeur correspondante
Puissance maximale P_{max}	200 W
Tension en circuit ouvert V_{co}	32.9 V
Courant de court-circuit I_{cc}	8.21 A
Tension puissance maximale V_{mp}	26.3 V
Courant puissance maximale I_{mp}	7.61 A
Nombre de cellule par module	54

Tableau 3- 1 : Caractéristiques électriques typiques du panneau PV.

Caractéristique expérimentale à $T = 25^{\circ} \text{C}$.

La figure 3.5 et la figure 3.6 représentent respectivement la caractéristique $I(V)$ et la caractéristique $P(V)$ mesurées pour le module solaire à 25°C .

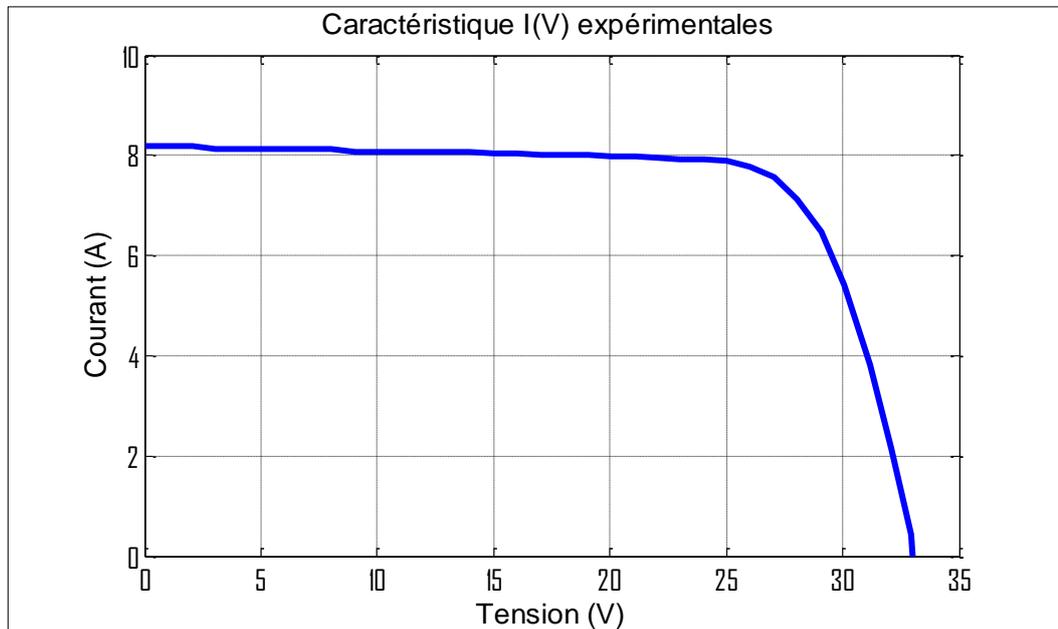


Figure 3- 5 : : Caractéristique $I(V)$ expérimentale à 25°C .

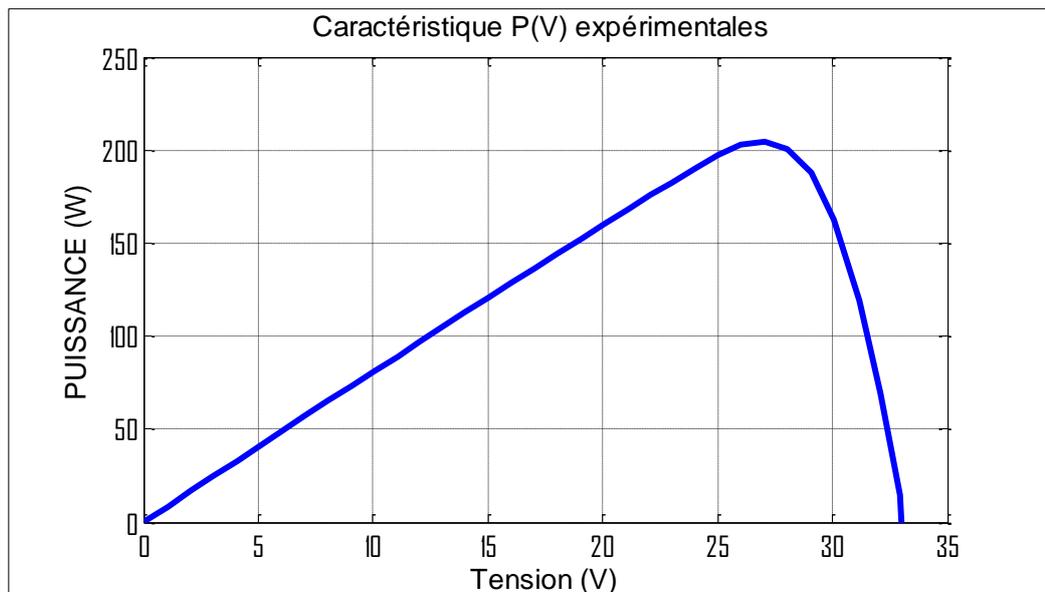


Figure 3- 6 : : Caractéristique $P(V)$ expérimentale à 25°C .

Caractéristique expérimentale à $T = 50^{\circ}\text{C}$.

La figure 3.7 et la figure 3.8 représentent respectivement la caractéristique $I(V)$ et la caractéristique $P(V)$ mesurées pour le module solaire à 50°C .

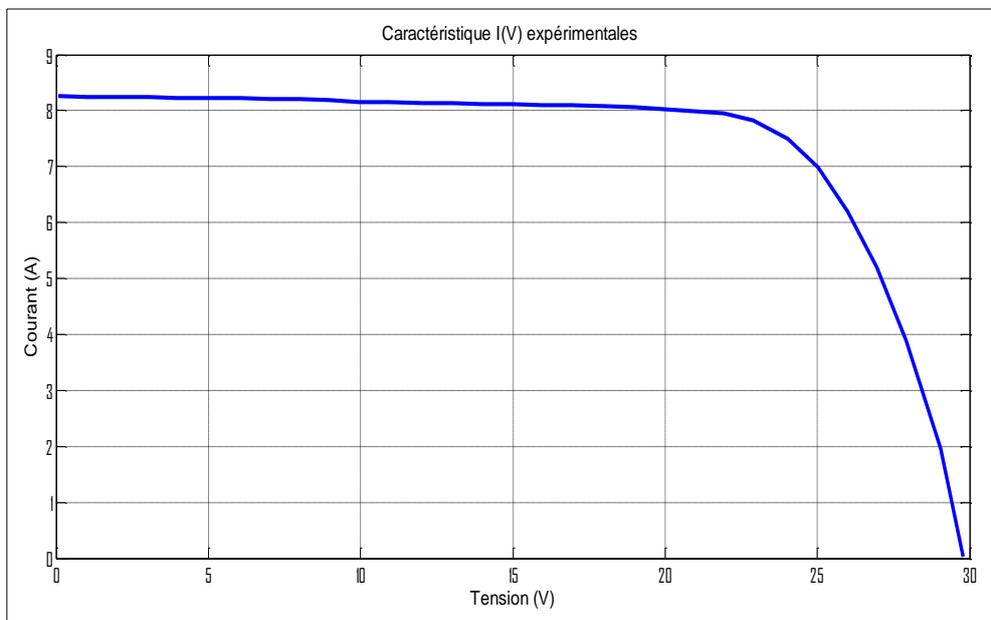


Figure 3- 8 : Caractéristique $I(V)$ expérimentale à 50°C .

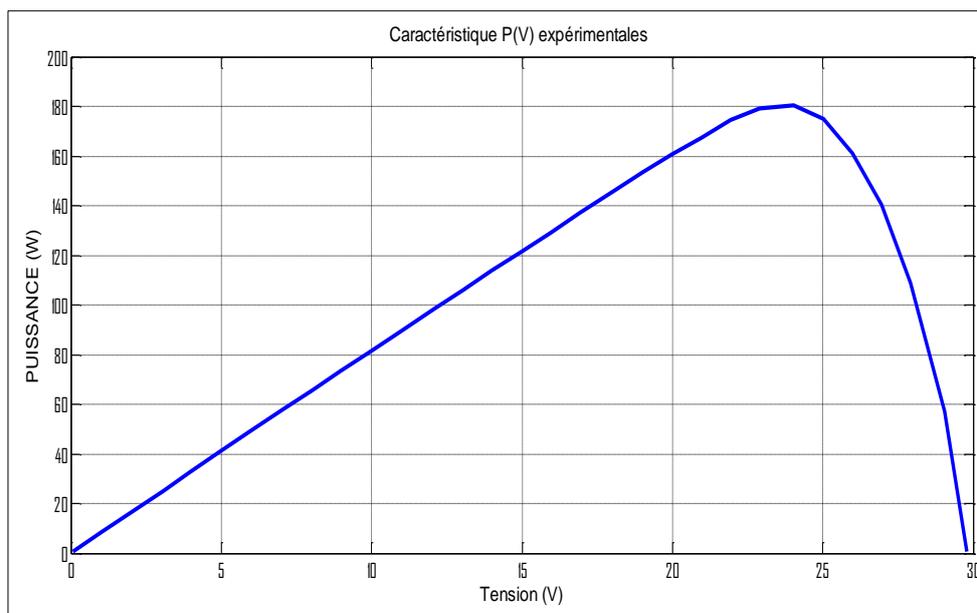


Figure 3- 7: Caractéristique $P(V)$ expérimentale à 50°C .

Caractéristique expérimentale à $T = 75^{\circ}\text{C}$.

La figure 3.9 et la figure 3.10 représentent respectivement la caractéristique $I(V)$ et la caractéristique $P(V)$ mesurées pour le module solaire à 75°C .

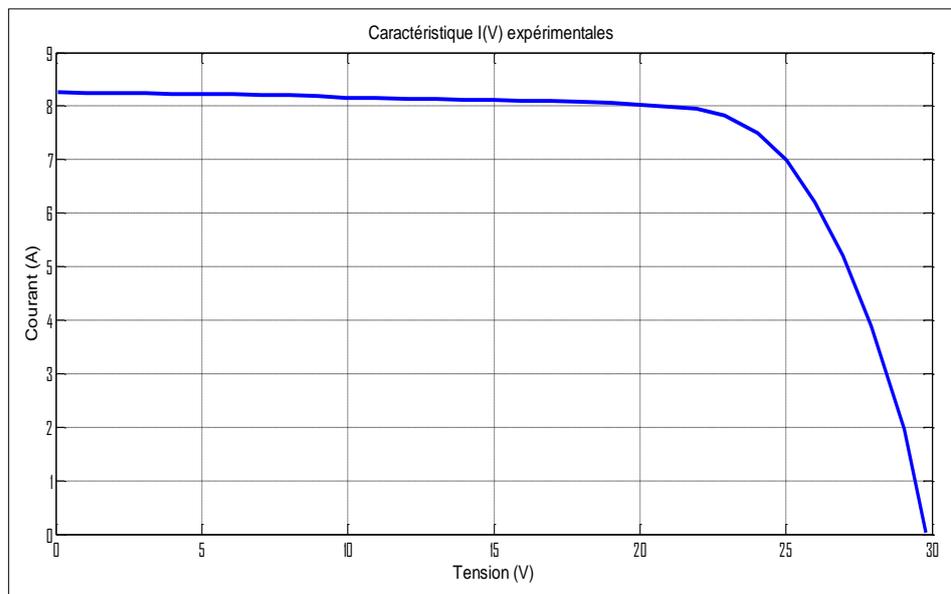


Figure 3- 10: Caractéristique $I(V)$ expérimentale à 75°C .

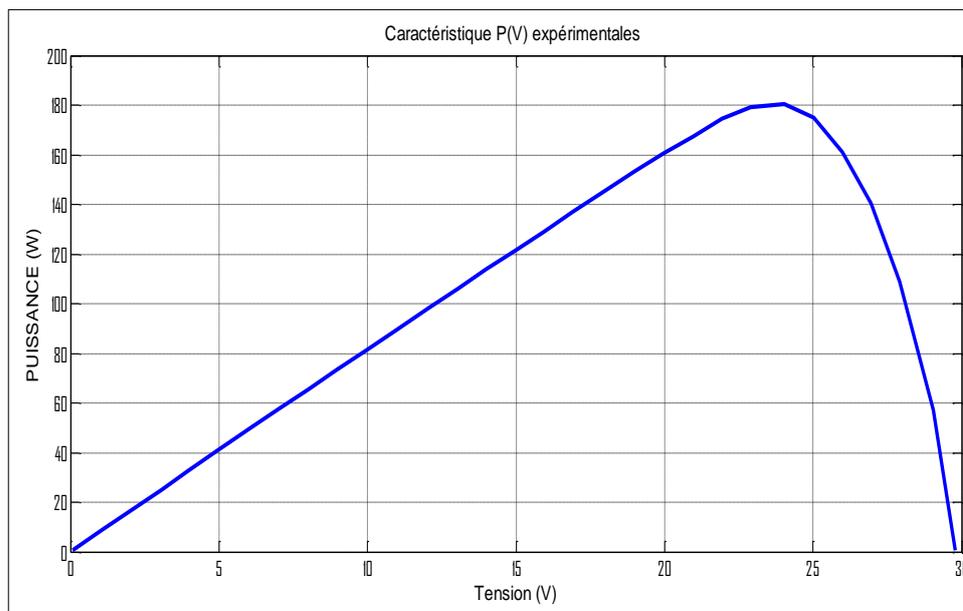


Figure 3- 9 : Caractéristique $P(V)$ expérimentale à 75°C .

b. *Les paramètres identifiés par PSO pour les différentes températures :*

Les paramètres identifiés (I_{ph} , I_D , A , R_s et R_{sh}) de panneau PV par l'algorithme de PSO pour les différentes températures (25°C, 50°C, 75°C), sont donnés dans le tableau suivant :

Modèle	Paramètres				
	I_{ph} (A)	I_d (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	A
$T = 25 + 273 \text{ } ^\circ K$	8.1782	$2.9268 * 10^{-9}$	0.2265	135.5432	1.0981
$T = 50 + 273 \text{ } ^\circ K$	8.2359	$3.0413 * 10^{-6}$	0.1325	236.9090	1.4530
$T = 75 + 273 \text{ } ^\circ K$	8.3562	$1.0624 * 10^{-7}$	0.3327	101.7713	1.0680

Tableau 3- 2 : Les paramètres identifiés de panneau PV en utilisant l'algorithme de PSO pour les différentes températures.

Les résultats à 25°C

Les superpositions des caractéristiques $I(V)$, $P(V)$, expérimentales et estimées sont illustrées par les figures suivantes à 25°C :

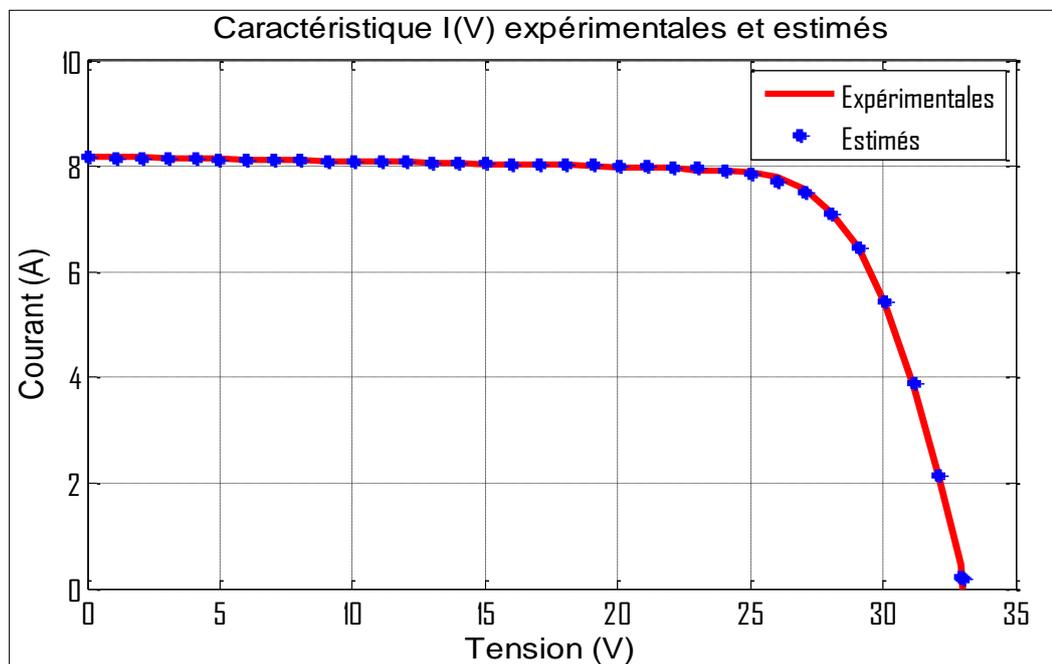


Figure 3- 11 : Caractéristique $I(V)$ expérimentale et estimée à 25°C

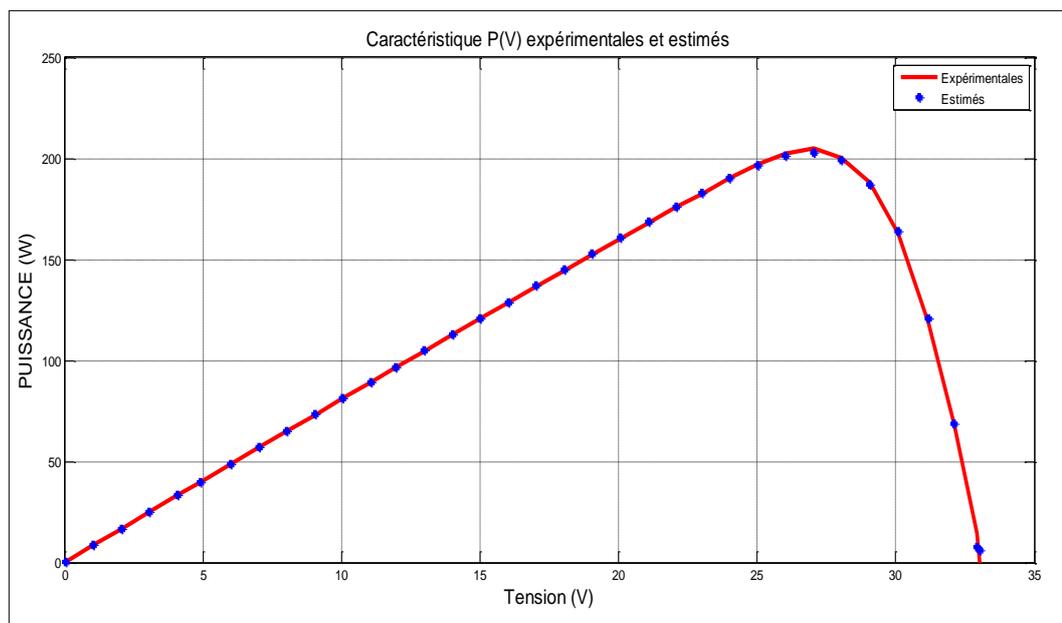


Figure 3- 12 : Caractéristique $P(V)$ expérimentale et estimée à 25°C.

Les figures (3-13 à 3-18) sont présentées : L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'optimisation des paramètres de PV par l'algorithme de d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) à 25°C

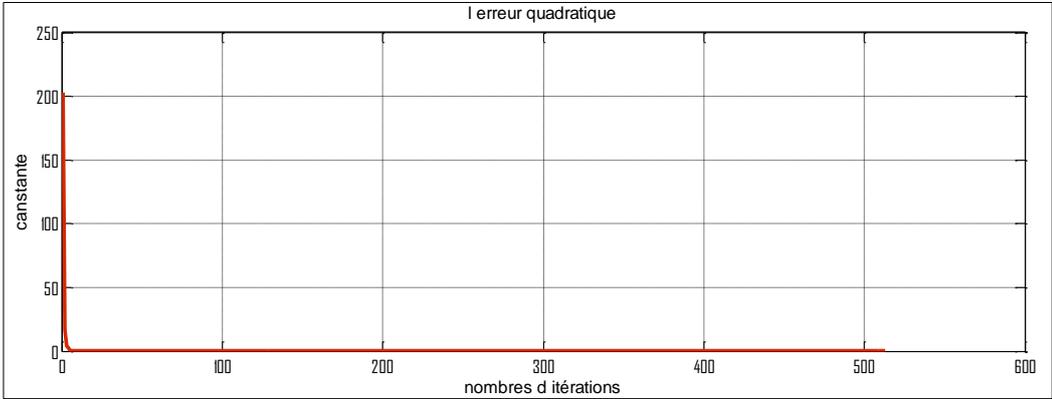


Figure 3- 13: L'erreur quadratique moyenne (RMSE) à 25°C.

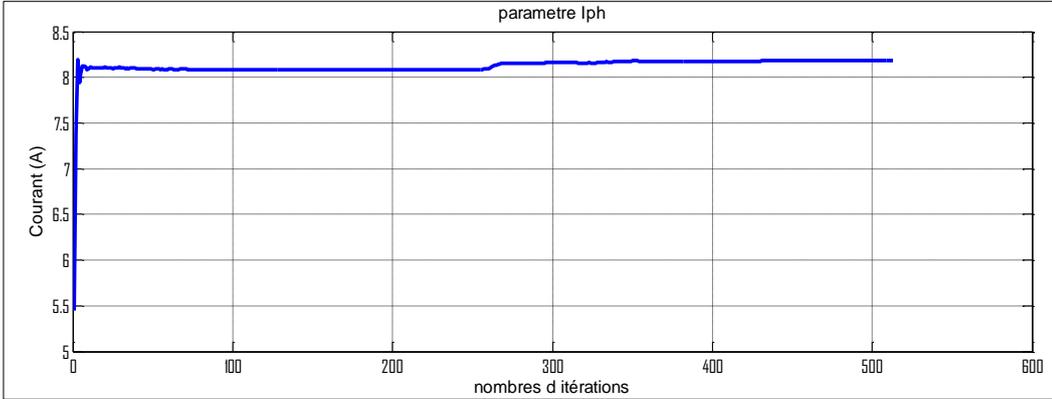


Figure 3- 15 : L'optimisation de I_{ph} .

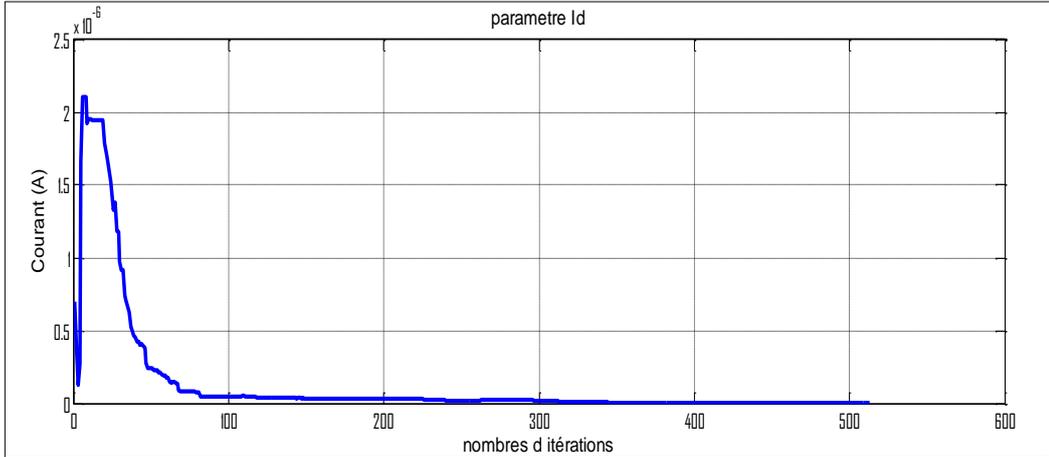


Figure 3- 14: L'optimisation de I_d

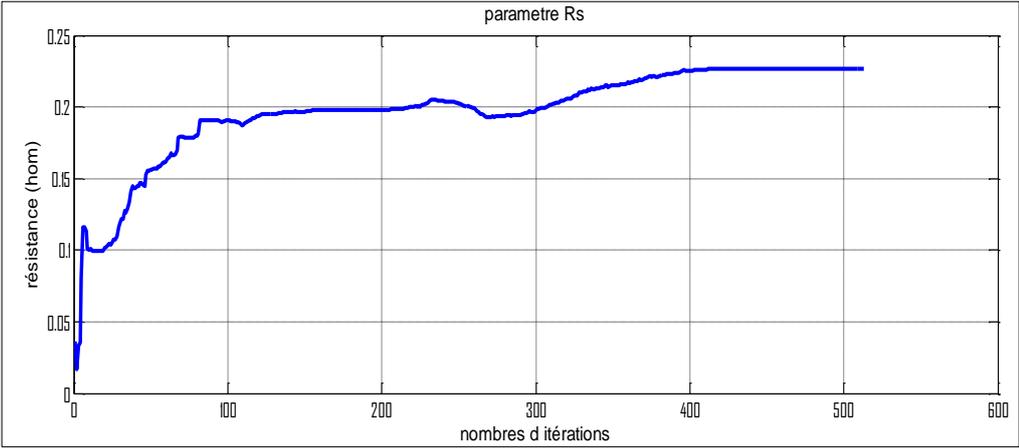


Figure 3- 16: L'optimisation de R_s .

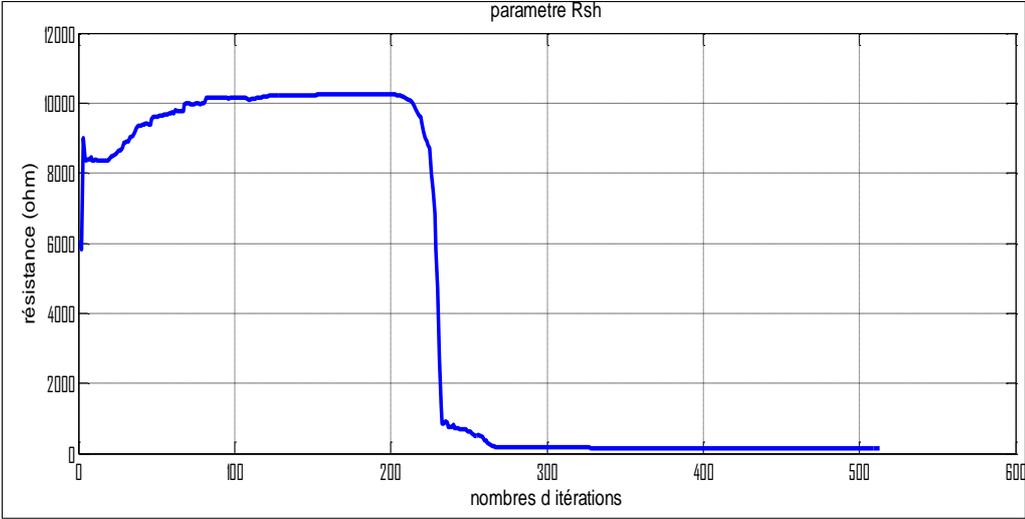


Figure 3- 17 : L'optimisation de R_{sh} .

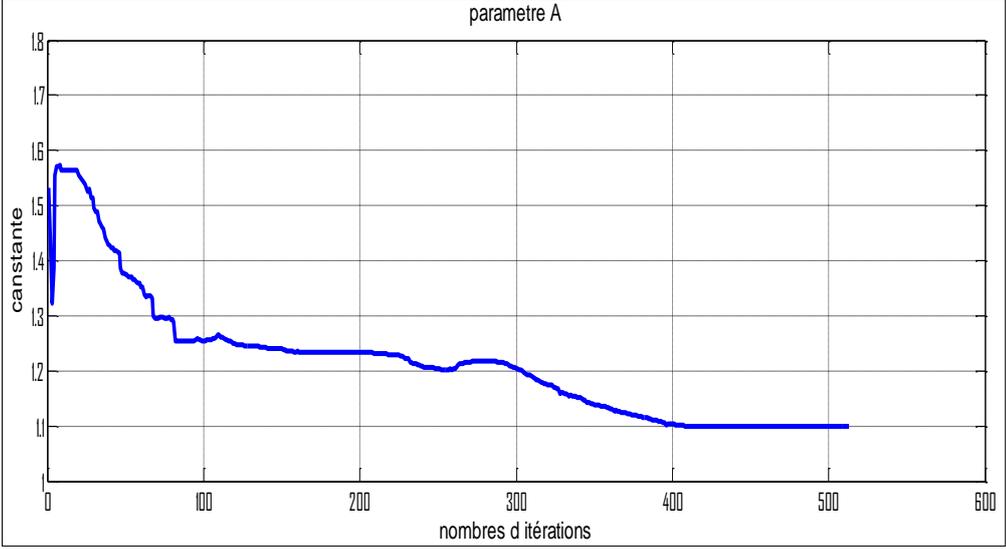


Figure 3- 18: L'optimisation de A .

Les résultats à 50°C

Les superpositions des caractéristiques I(V), P(V), expérimentales et estimées à 50°C sont illustrées par les figures suivantes :

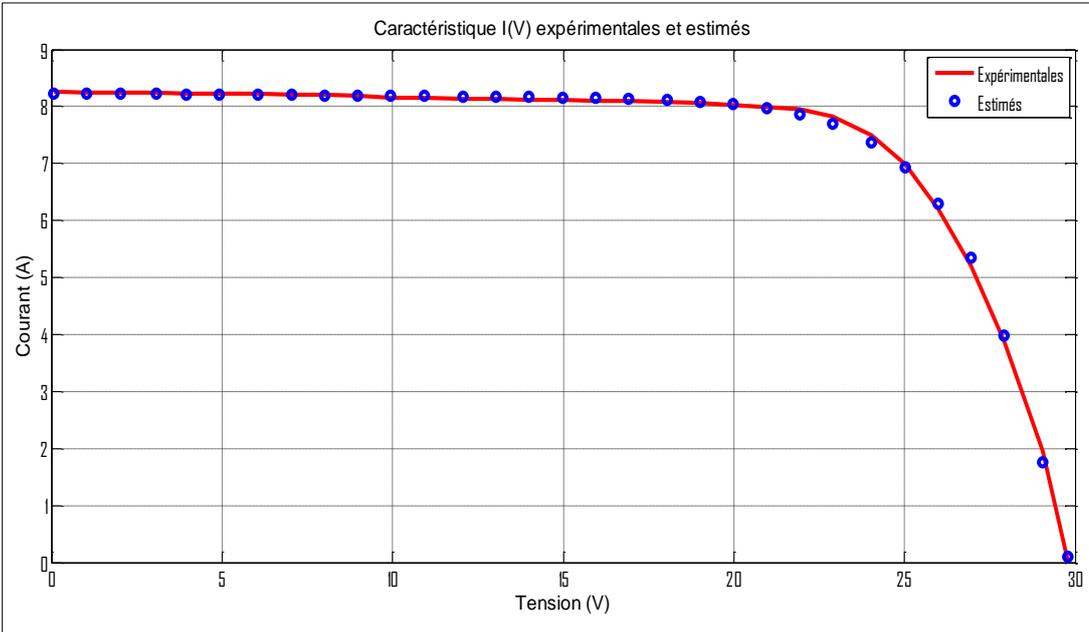


Figure 3- 19 : Caractéristique I(V) expérimentale et estimée à 50°C.

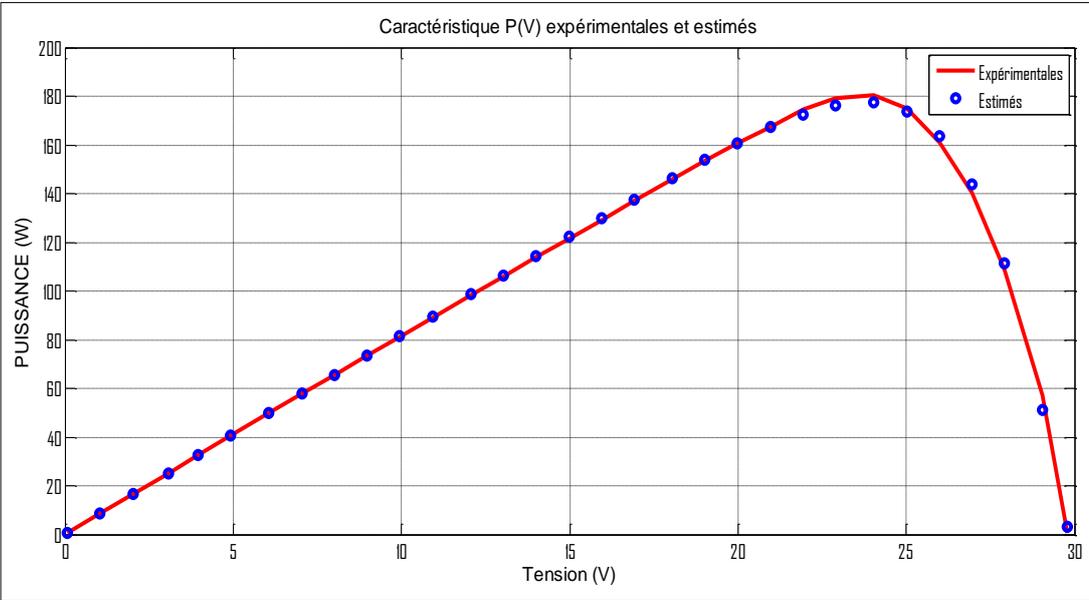


Figure 3- 20 : Caractéristique P(V) expérimentale et estimée à 50°C

Les figures (3-25 à 3-30) sont présentées L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'optimisation des paramètres de PV par l'algorithme de d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) à 50°C.

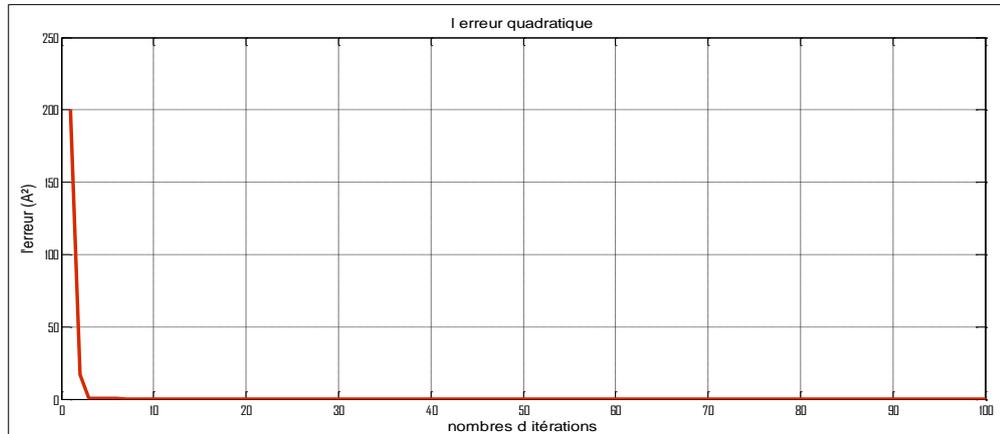


Figure 3- 21 : L'erreur quadratique moyenne (RMSE) à 50°C.

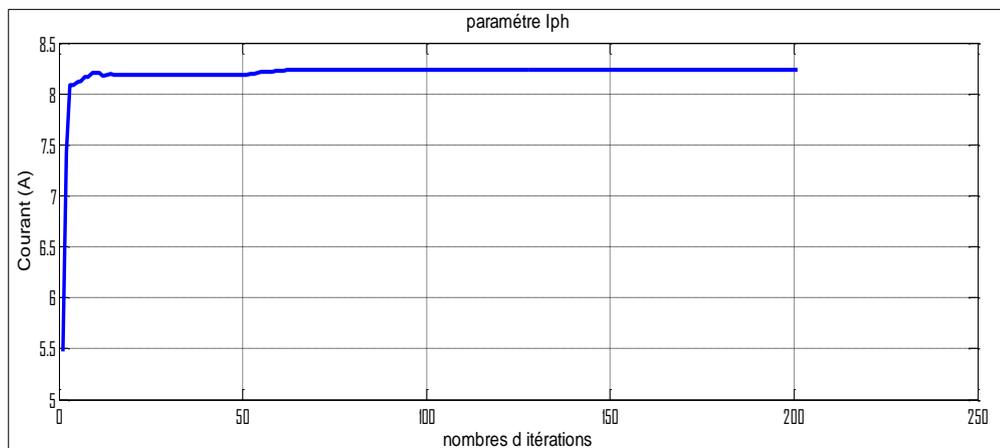


Figure 3- 22 : L'optimisation de I_{ph} .

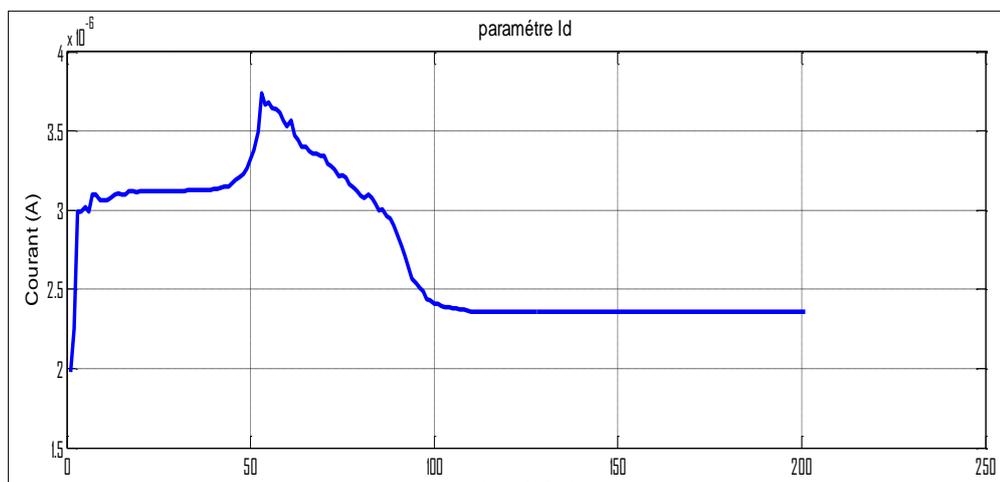


Figure 3- 23: L'optimisation de I_d .

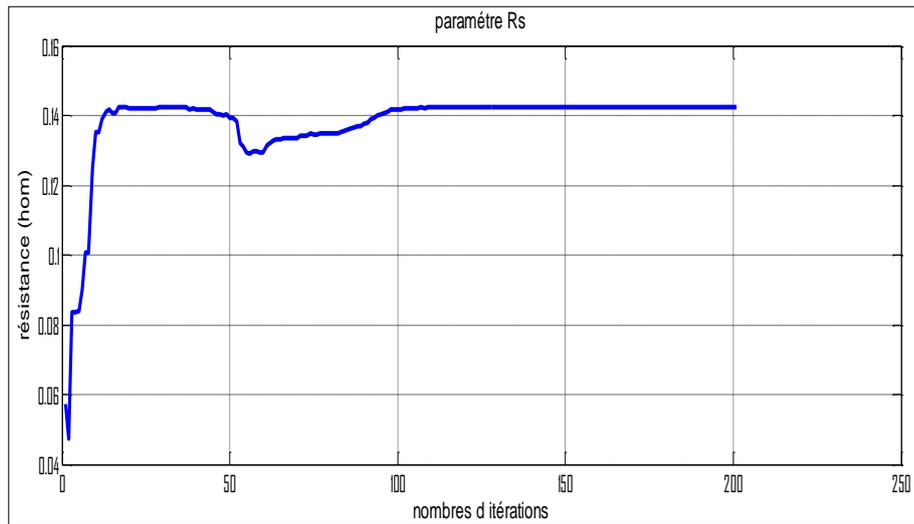


Figure 3- 24: L'optimisation de R_s .

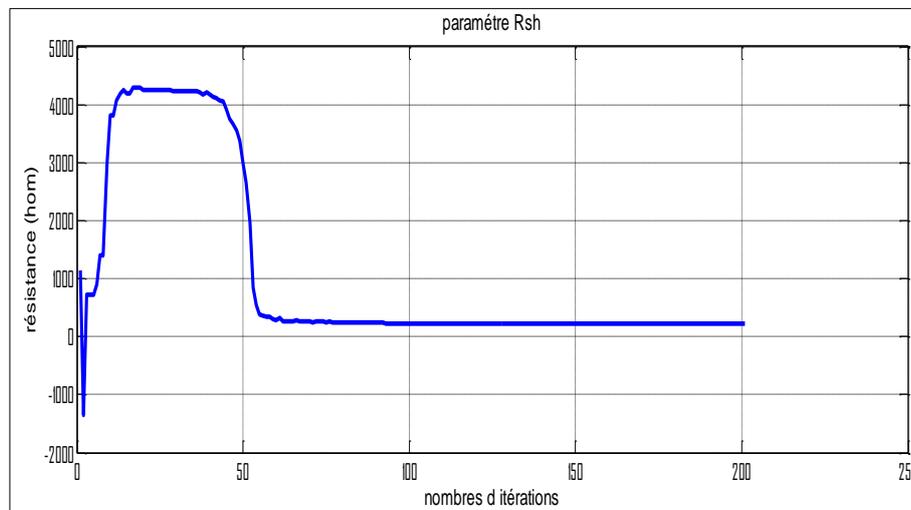


Figure 3-25:L'optimisation de R_{sh}

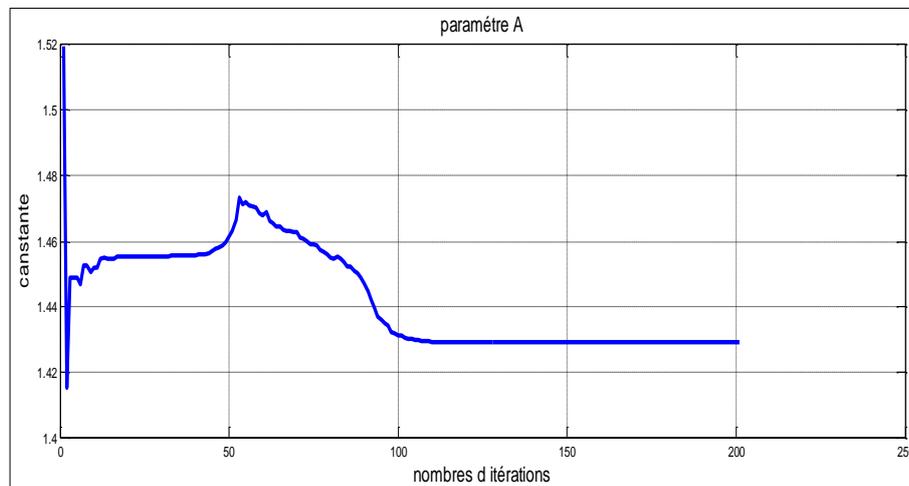


Figure 3- 26 : L'optimisation de A .

Les résultats à 75°C

Les superpositions des caractéristiques I(V), P(V), expérimentales et estimées à 75°C sont illustrées par les figures suivantes :

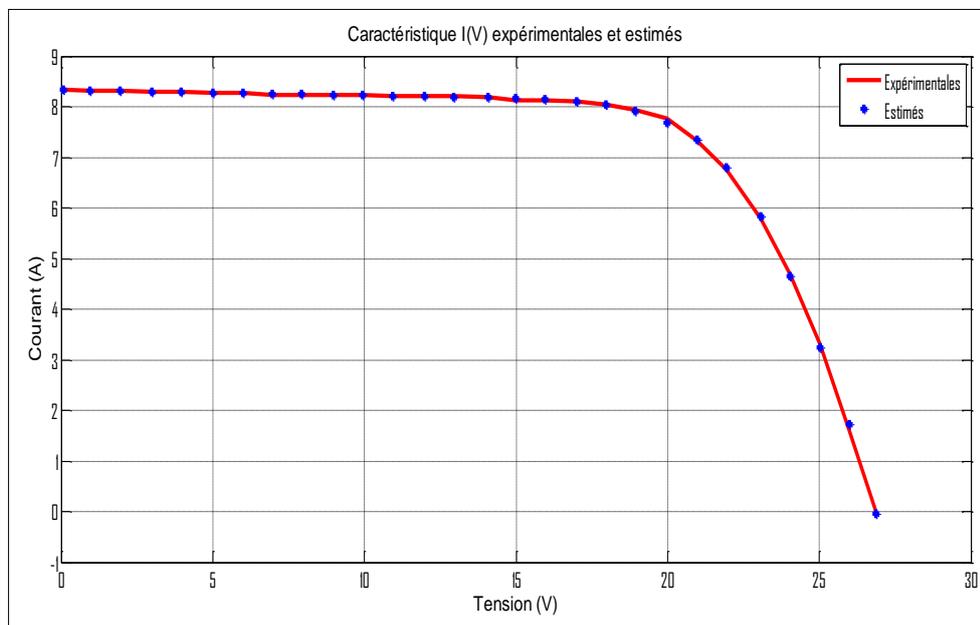


Figure 3- 27: Caractéristique I(V) expérimentale et estimée à 75°C

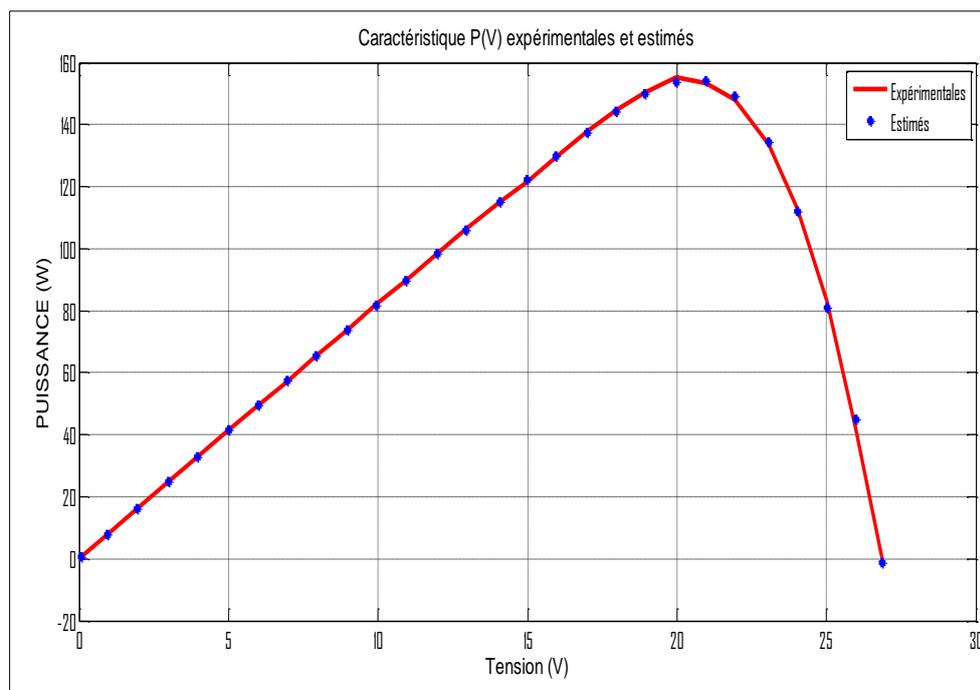


Figure 3- 28 : Caractéristique P(V) expérimentale et estimée à 75°C

Les figures (3-37 à 3-42) sont présentées : L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'optimisation des paramètres de PV par l'algorithme de d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) à 75°C :

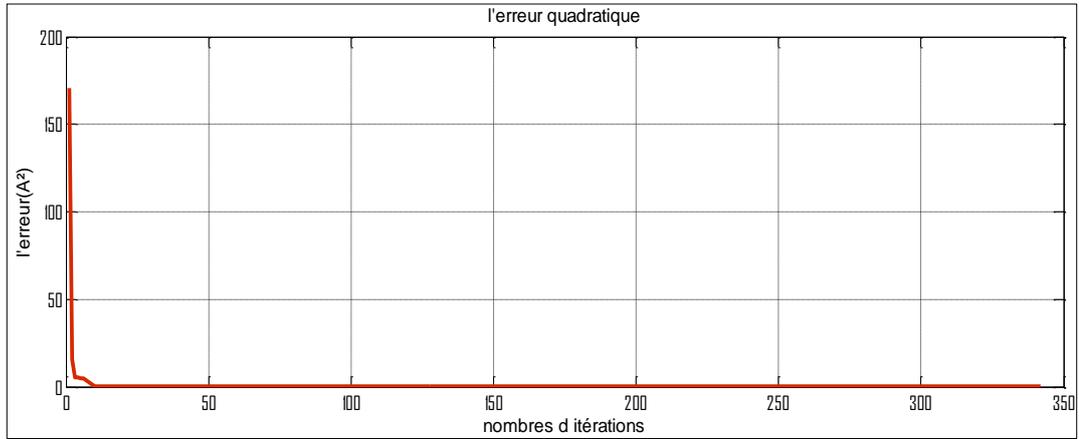


Figure 3- 29: L'erreur quadratique moyenne (RMSE) à 75°C.

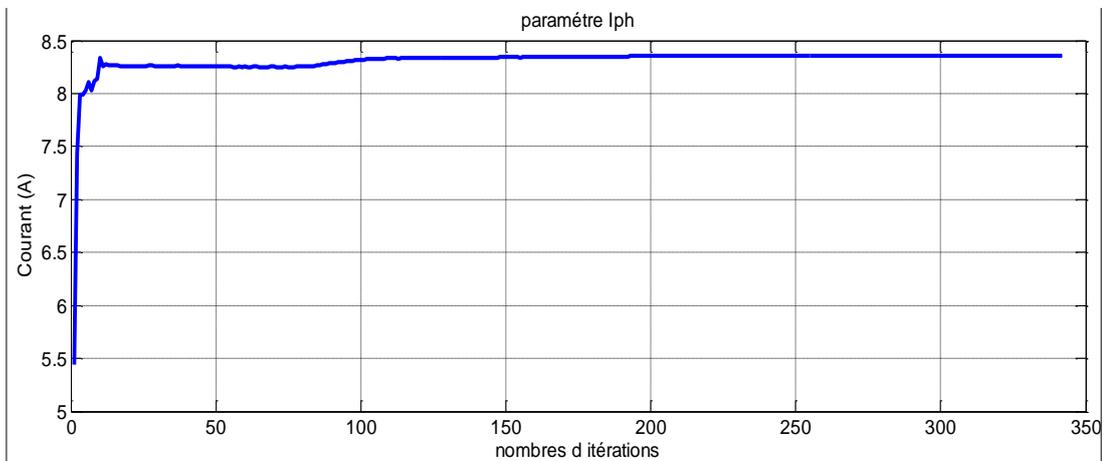


Figure 3- 30 : L'optimisation de I_{ph}

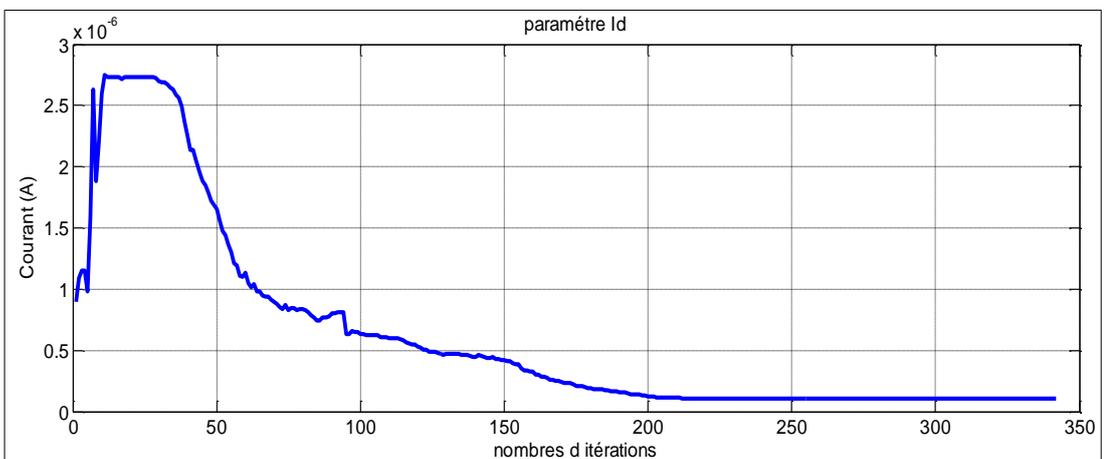


Figure 3- 31: L'optimisation de I_d .

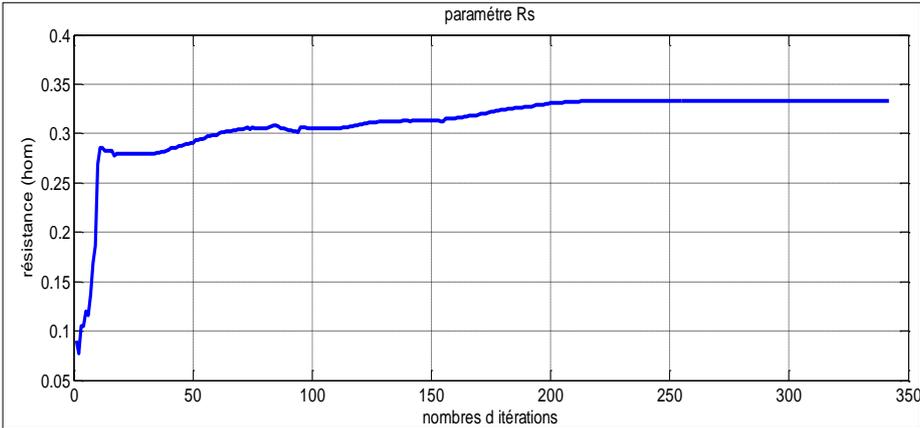


Figure 3- 32:L'optimisation de Rs.

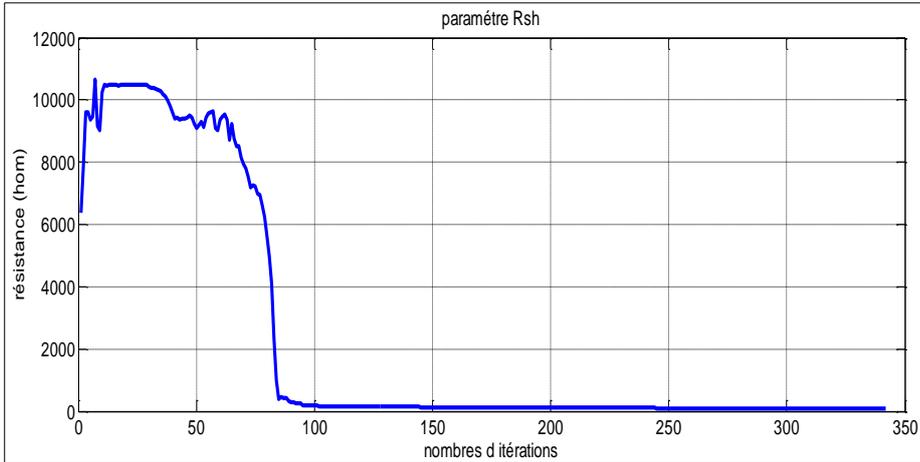


Figure 3- 33: L'optimisation de Rsh.

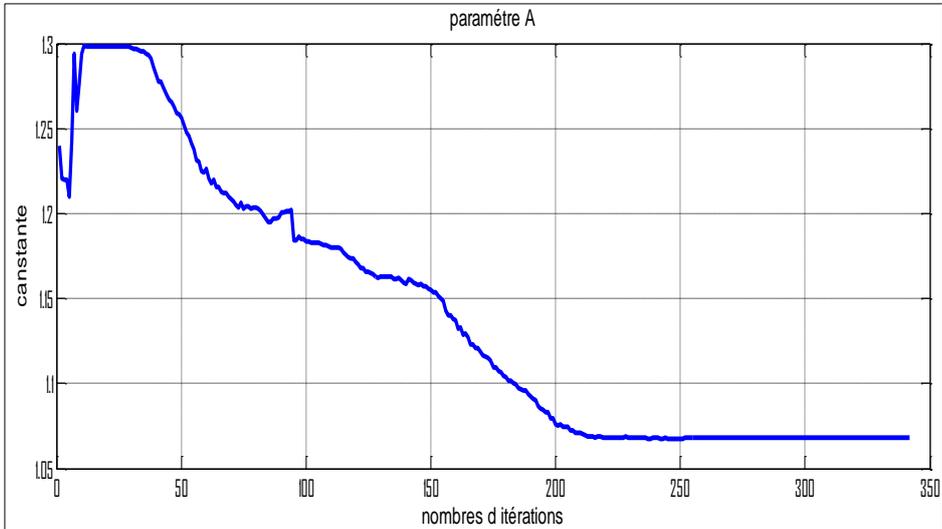


Figure 3- 34: L'optimisation de A.

III. 5. 2 Discussion des résultats

Les différents paramètres identifiés par cette méthode l'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) sont présentés dans les tableaux (3-2) et (3-3)

A partir des figures 3-11, 3-12, 3-19, 3-20, 3-27 et 3-28, on remarque que la méthode de d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) présente une bonne concordance entre les valeurs de la caractéristique $I(V)$, $P(V)$ expérimentale et estimée.

A partir des figures 3-13, 3-21, 3-29, il est à noter que la méthode d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) d'assurer une meilleure minimisation de l'erreur.

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

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

III. 6 Conclusion

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

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

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

Conclusion générale

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

Dans notre travail, la méthode de d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) est utilisée comme méthode d'identification. Le vecteur paramètre est obtenu par minimisation de l'erreur quadratique entre le courant mesuré et le courant calculé. L'algorithme d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) est adopté comme technique de minimisation.

On a identifié un panneau photovoltaïque pour trois températures différentes, dans un premier temps, on a utilisé l'identification analytique pour déterminer l'espace de recherche associé à l'algorithme de d'optimisation par Essaim Particulaire (PSO).

Les résultats obtenus par l'identification analytique et l'algorithme de l'optimisation par Essaim Particulaire (PSO) sont proches. Et la superposition des courants mesurés et ceux calculés par PSO montre l'efficacité de l'approche utilisé.

Les perspectives suivantes sont envisagées :

Une étude comparative basée sur les différents modèles présentés.

Réalisation d'un banc d'essais.

Bibliographie

- [1] A. NEDJMA, Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque., , THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE, Belfort,, le 28 Janvier 2020..
- [2] K. SAFIA, Optimisation Des Paramètres D'une Cellule Photovoltaïque Par Les Algorithmes Génétiques, these de Majistre option instrumentation, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF I, 21/12/2014.
- [3] R. d. B. << CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES ORGANIQUES DÉRIVÉES DE NOUVEAUX SYSTÈMES CONJUGUÉS >>, , Thèse de Doctorat Spécialité : Physique Ecole Doctorale d'Angers , Angers, 23 Septembre 2003.
- [4] Touil Nacer Eddine et Ghenbazi Slimane, << Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque >>, these mastre acadimique ,Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [5] B. ABDELHAKIM, << Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome >>, , These Doctrat en électronique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1, UFAS(ALGERIE), 2015.
- [6] «<https://zestedesavoir.com/@Aabu>,» 15 janvier 2019. [En ligne].
- [7] D. S. K. M. << Application de méthode d'optimisation d'ordre zéro à l'identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque >>, ,Mémoire de Master Filière Électrotechnique, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2020.
- [8] <https://energieplus-lesite.be/>, «<https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/effets-photoelectrique-et-electroluminescent/>,» Copyright 2021 . [En ligne].
- [9] K. RIAD, << Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques>>, ,These doctorat en science Option: Automatique,UNIV- SETIF 1; UFAS(ALGERIE), 2015..

- [10] S. P. a. C. d. M. Javier Cubas *, «<< Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function >>,» vol. , 2014.
- [11] S. P. ,. M. V. Javier Cubas' *, «<< On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior >>,» February 2014.
- [12] J. R. C. D. F. N. L. R. D. Reis, «<< The Newton Raphson Method in the Extraction of Parameters of PV Modules >>,» ISSN 2172-038 X, No.15 April 2017.
- [13] K. L. KENNERUD, «<< Analysis of Performance Degradation in CdS Solar Cells >>,» NOVEMBER 1969.
- [14] B. Nour-Eddine, «<< Amélioration des Performances de Contrôle D'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Métaheuristiques >>,» 13/03/2013.
- [15] A. GHOUARI, «<< Métaheuristiques adaptatives d'optimisation continue basées sur des méthodes d'apprentissage >>,» décembre 2018.
- [16] D. OTSMANE Ouissem, «< Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque à l'aide d'une métaheuristique >>, Mémoire de Master Électrotechnique ,Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2020.
- [17] A. EL DOR, «< Perfectionnement des algorithmes d'Optimisation par Essaim Particulaire Applications en segmentation d'images et en électronique >>, THÈSE DE DOCTORAT EN INFORMATIQUE, UNIVERSITÉ PARIS-EST, décembre 2012.
- [18] A. E. H. M.A. El-Shorbagy, «<< Particle Swarm Optimization from Theory to Applications >>,» April-June 2018.
- [19] W. A. E. M. Ahmed, Hala M. Abdel Mageed , Samah AbdEltwab Mohamed et Amr A. Saleh, «<< Fractional order Darwinian particle swarm optimization for parameters identification of solar PV cells and modules >>,» June 2021.