

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA



**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**

**Mémoire de fin d'étude présenté**

**En vue d'obtention du diplôme de MASTER en Electronique**

**Option : Microélectronique**

**Par :**

**M<sup>elle</sup> Galloul Lyssia**

**M<sup>elle</sup> Messahli Lynda**

**Thème :**

*Modélisation d'un  
panneau photovoltaïque*

**Soutenu le : 07/10/2020, devant le Jury composé de:**

Mr. Mekhmoukh	Président
Mme. Bendjelloul	Examinatrice
Mme. Idjdarene	Encadreur
Mme. Achour	Co-encadreur

**Année universitaire : 2019 /2020**

## *Remerciements*

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

*On tient particulièrement à remercier Madame IDJDARENE Souad et Madame ACHOUR Yakout, enseignantes au département génie électrique, de l'université Abderrahmane Mira. Bejaia, pour avoir accepté d'assurer l'encadrement de ce travail. Elles ont toujours fait preuve d'une importante disponibilité au cours de ce travail et pendant la rédaction de ce manuscrit. Leurs orientations efficaces et leurs conseils précieux nous a permis de réaliser convenablement les différentes étapes du sujet.*

*Nous nous adressons nos vifs remerciements aux membres de jury, d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

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

## *Dédicaces*

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant  
de M'avoir donné le courage et la patience  
pour réaliser Ce travail malgré toutes les  
difficultés rencontrées*

*Je dédie ce modeste travail à*

*Mes très chers parents, pour leur sacrifice, ils  
n'ont jamais cessé de m'encourager. Que Dieu  
mes les garde.*

*Mes très chères sœurs et belle-sœur*

*Mes très chers frères*

*Mes très chers amis (es) en particulier*

*Ma meilleure amie Meriem*

*Tous ceux qui m'ont encouragé durant mon  
parcours d'étudiant*

*Lyssia*

# Dédicaces

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de M' avoir donné le  
courage et la patience pour réaliser Ce travail malgré toutes les  
difficultés rencontrées*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents que dieu les garde et les Protège*

*A mes sœurs*

*A mon frère Younes*

*A mes très chères amies*

*Et à tous ceux qui me sont chers*

*Lynda*

## Résumé

La cellule photovoltaïque est l'élément de base des systèmes photovoltaïques et de la conversion de l'énergie solaire. Notre étude concerne la modélisation et l'optimisation des paramètres électrique du panneau CEM100M-36. Nous avons effectué l'extraction des paramètres des modèles à une diode et à deux diodes à partir de la caractéristique (I-V) expérimentale de ce panneau par les algorithmes génétiques. Les résultats obtenus permettent de reproduire la caractéristique du panneau PV. Le modèle à deux diodes représente le comportement réel de ce panneau.

**Mots-clés :** Cellule photovoltaïque, modélisation, optimisation de paramètres, Algorithmes génétiques

## Abstract

The photovoltaic cell is the basic building block of photovoltaic systems and the conversion of solar energy. Our study concerns the modeling and optimization of the electrical parameters of the CEM100M-36 panel. We performed the extraction of the parameters of the one-diode and two-diode models from the experimental (I-V) characteristic of this panel by the genetic algorithms. The results obtained make it possible to reproduce the characteristic of the PV panel. The two diode model represents the actual behavior of this panel.

**Keywords:** Photovoltaic cell, modeling, optimization of parameters, Genetic algorithms

## الملخص

الخلية الكهروضوئية هي البنية الأساسية للأنظمة الكهروضوئية وتحويل الطاقة الشمسية. تتعلق دراستنا بنمذجة و تحسين المعلمات الكهربائية للوحة CEM100M-36. أجرينا استخراج معلمات نموذج ثنائي الصمام الثنائي وثنائي الصمام الثنائي من الخاصية التجريبية (I-V) لهذه اللوحة بواسطة الخوارزميات الجينية. نتيج النتائج التي تم الحصول عليها إعادة إنتاج خاصية اللوحة الكهروضوئية. يمثل نموذج الصمام الثنائي السلوك الفعلي لهذه اللوحة.

**الكلمات المفتاحية:** الخلية الضوئية، نمذجة، تحسين المعلمات، الخوارزميات الجينية

## Table des matières

<b>Résumé</b> .....	I
<b>Table des matières</b> .....	II
<b>Liste des figures</b> .....	VI
<b>Liste des tableaux</b> .....	VIII
<b>Liste des symboles</b> .....	IX
<b>Introduction générale</b> .....	1

### Chapitre I

#### Généralité sur le photovoltaïque

I.1 Introduction .....	3
I.2 Spectre solaire .....	4
I.3 Dualité de la lumière .....	6
I.4 La cellule photovoltaïque .....	7
I.4.1 Propriétés des semi-conducteurs .....	8
I.4.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	10
I.5 Différents types technologies de cellules photovoltaïques.....	10
I.5.2 Technologie de la 2 <sup>ème</sup> génération à base de couche-mince.....	10
I.5.3 Technologie de la 3 <sup>ème</sup> génération : multi-jonction concentration.....	13
I.6 Paramètres de la cellule solaire .....	13
I.6.1 Courant de court-circuit $I_{CC}$ .....	13
I.6.2 Tension à circuit ouvert $V_{CO}$ .....	13

I.6.3 Facteur de forme FF .....	13
I.6.4 Rendement de conversion $\eta$ .....	13
I.6.5 Point de puissance maximal PPM .....	14
I.6.6 Repense spectrale d'une cellule solaire .....	14
I.7 Influence des paramètres externes sur les caractéristiques électriques de la cellule PV .....	15
I.7.1 Influence de la température.....	15
I.7.2 Influence de l'éclairement.....	16
I.8 Panneau photovoltaïque .....	17
I.8.1 Constitution d'un panneau photovoltaïque.....	17
II.8.1.a Mise en série.....	17
II.8.1.b Mise en parallèles .....	17
II.8.1.c Mise en série et en parallèle (hybride).....	18
I.8.2 Protection des modules photovoltaïques.....	19
I.9 Orientation et inclinaison d'un module photovoltaïque.....	19
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	19
I.10.1 Avantages.....	19
I.10.2 Inconvénients.....	20
I.11 Conclusion.....	20

## **Chapitre II**

### **Modélisation d'une cellule photovoltaïque.**

II.1 Introduction.....	21
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	22

---

II.3 Modèle à une diode.....	22
II.3.1 Modèle à trois paramètres (modèle idéal).....	22
II.3.2 Modèle à quatre paramètres.....	23
II.3.3 Modèle à cinq paramétré (LP5).....	24
II.4 Modèle à deux diodes.....	26
II.5 Algorithme génétique.....	28
II.6 Etapes d'un Algorithme génétique.....	29
II.6.1 Initialisation.....	30
II.6.1.1 Création de la population initiale.....	30
II.6.1.2 Codage / Décodage .....	31
II.6.2 Évaluation.....	31
II.6.3 Sélection.....	32
II.6.3.1 Sélection par roulette.....	32
II.6.3.2 Sélection par tournoi.....	33
II.6.4 Croisement.....	33
II.6.4.1 Croisement point simple.....	34
II.6.4.2 Croisement multipoint.....	34
II.6.5 Mutation.....	34
II.6.6 Insertion.....	35
II.6.7 Critère d'arrêt.....	35
II.7 Influence des paramètres de l'AG.....	35
II.8 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.....	36
II.8.1 Avantages des AGs.....	36
II.8.2 Inconvénients des AGs.....	36



II.9 Conclusion.....	37
----------------------	----

## **Chapitre III**

### **Simulation et discussions des résultats.**

III.1 Introduction.....	38
III.2 Optimisation des paramètres électriques d'un module PV.....	39
III.2.1 Méthodologie de calcul.....	39
III.3 Données expérimentales.....	42
III.4 Résultats et discussion.....	44
III.4.1 Optimisation des paramètres.....	44
III.4. 1. 1 Modèle à une diode (Cinq paramètres) .....	44
III.4. 1. 2 Modèle à deux diodes (Sept paramètres).....	46
III.5 Conclusion.....	49
Conclusion générale.....	50

*Liste des figures*

<b>Figure I-1</b> : Eclairage solaire.....	4
<b>Figure I-2</b> : Schéma indiquant le nombre d'air masse AMx en fonction de la position géographique.....	5
<b>Figure I-3</b> : semi-conducteur de type N et type P.....	7
<b>Figure I-4</b> : Structure basique d'une cellule solaire.....	8
<b>Figure I-5</b> : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.....	9
<b>Figure I-6</b> : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule solaire.....	14
<b>Figure I-7</b> : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) de la Cellule photovoltaïque.....	16
<b>Figure I-8</b> : Influence de l'éclairage sur les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque à T=25°C. ....	16
<b>Figure I-9</b> : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	17
<b>Figure I-10</b> : Caractéristique courant tension de Np cellule en parallèles.....	18
<b>Figure I-11</b> : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de (N <sub>P</sub> + N <sub>S</sub> ) cellules identiques.....	18
<b>Figure II-1</b> : Circuit équivalent d'une cellule PV –Model idéal.....	22
<b>Figure II-2</b> : Schéma équivalant du modèle à une exponentielle (LP4).....	24
<b>Figure II-3</b> : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (L5P).....	25
<b>Figure II-4</b> : Circuit électrique équivalent à double diode (2M7P).....	27
<b>Figure II-5</b> : Etapes d'un Algorithme Génétique.....	30
<b>Figure II-6</b> : Sélection par roulette.....	32
<b>Figure II-7</b> : Sélection par tournoi.....	33
<b>Figure II-8</b> : Exemple de croisement en un point.....	34

<b>Figure II-9</b> : Exemple de croisement en multipoint.....	34
<b>Figure II-10</b> : Exemple de mutation.....	35
<b>Figure III-1</b> : Organigramme de l'algorithme génétique.....	40
<b>Figure III-2</b> : Montage réalisé.....	43
<b>Figure III-3</b> : Caractéristiques I-V et P-V du panneau PV.....	43
<b>Figure III-4</b> : Evolution des valeurs minimales de la fitness en fonction de nombre de générations.....	45
<b>Figure III-5</b> : Caractéristique I-V expérimentale et celle calculée.....	45
<b>Figure III-6</b> : Caractéristique P-V expérimentale et celle calculée.....	46
<b>Figure III-7</b> : Evolution des valeurs minimales de la fitness en fonction de nombre de générations.....	47
<b>Figure 8</b> : Caractéristique I – V expérimentale et celle calculée.....	48
<b>Figure 9</b> : Caractéristique P – V expérimentale et celle calculée.....	48

*Liste des tableaux*

Tableau I-1 : Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.....	6
Tableau I-2 : Tableau récapitulatif des différents types des cellules PV.....	12
Tableau III-1 : Bornes maximales et minimales des différents paramètres du modèle à une diode.....	41
Tableau III-2 : Bornes maximales et minimales des différents paramètres du modèle à deux diodes .....	41
Tableau III-3 : Paramètres de AG utilisés dans cette application.....	41
Tableau III-4 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque de type CEM100M-36.....	42
Tableau III-5 : Les paramètres extraits de la cellule en utilisant les algorithmes génétiques.....	44
Tableau III-6 : Valeurs des paramètres obtenues par les AGs pour le modèle à deux diodes.....	47

*Liste des symboles.*

PV	Photovoltaïque
AM	Air Mass
AM0	Hors atmosphère (application spatiale).
AM1	Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur).
AM1.5	Spectre standard, le soleil est à 45°.
IEC	International Electrotechnical Commission
$h$	constante de Planck ( $\text{j.s}^{-1}$ )
$c$	vitesse de la lumière dans le vide ( $\text{m.s}^{-1}$ ) .
$\lambda$	Longueur d'onde
$I_{CC}$ .	Courant de court-circuit.
$V_{CO}$	Tension de circuit ouvert.
FF	Facteur de forme.
$\eta$	Rendement de conversion d'énergie
PMM	Point de puissance maximale.
<b>RS</b>	Réponse spectrale
$P_{ppm}$	Puissance maximale
$I_{ppm}$	Courant optimale au point de puissance maximale (A).
$V_{ppm}$	Tension optimale au point de puissance maximale (V).
$V_{opt}$	Tension optimale.
$I_{opt}$	Courant optimum
IQE	rendement quantique interne de la cellule.
EQE	Le rendement quantique externe
$V_{CONs}$	Somme des tensions en circuit ouvert des cellules en série.
$I_{CCNp}$	Somme des courants de court-circuit des cellules en parallèle.

$N_s$	Nombre de cellules en série.
$N_p$	Nombre de cellules en parallèle.
GPV	Générateur photovoltaïque.
$I_{ph}$	Courant photonique.
$I_d$	Courant de la diode.
$I_s$	Courant de saturation inverse de la diode.
$V_T$	Potentiel thermodynamique.
$N$	Facteur d'idéalité de la diode.
$q$	Charge d'électron $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
$K$	Constante de Boltzmann $K = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
$T$	Température de la jonction des cellules PV.
$R_s$	Résistance série.
$R_p$	Résistance parallèle.
$I_p$	courant circulant dans la résistance $R_p$ .
$I^P$	courant de sortie fourni par le panneau solaire.
$V^P$	Tension de sortie fournie par le panneau solaire.
$f$	Fonction objectif
$F$	Fonction fitness (coût).
$g$	Fonction assurant le passage de la fonction objectif à la fonction fitness.
$S_m$	solution satisfaisante.
$N_{gen}$	nombre de génération.
$N$	Taille de population.
$S$	La longueur des individus.
AG	Algorithme génétique.
$P_c$	Probabilité de croisement.
$P_m$	Probabilité de mutation.
$N_{gen}$	Nombre de générations.
MSE	Mean Squared Error.

$L$	est le nombre de point de la caractéristique I-V.
$I_{cal}$	est le courant prédit à $V_i$ .
$I_{mes}$	est le courant expérimental à $V_i$ .
$Ini\_pop$	La population initiale.
$N$	taille de la matrice.
$M$	et le nombre de variables dans le chromosome.
$B_{max}$	La borne maximale des valeurs des paramètres à déterminer.
$B_{min}$	La borne minimale des valeurs des paramètres à déterminer.
$f'(I_n)$	représente l'évaluation de la dérivée de la fonction objective $f(I)=0$ .
$f(I_n)$	représente l'évaluation de la fonction objective $f(I)$ à la valeur actuelle $I_n$ .
$I_{n+1}$	représente la mise à jour de la solution actuelle $I_n$ .
$\Delta_{er}$	L'erreur en pourcent (%) de la puissance maximale.
$P_{mes}$	Puissance mesurée à partir de l'expérimentale.
$P_{cal}$	Puissance calculée à partir des paramètres obtenus par l'AG.

### Introduction générale

La plus grandes parties de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire.

Face à l'épuisement des ressources fossiles et les problèmes environnementaux causés par l'émission de gaz à effet serre lors de l'exploitation de ces ressources, il s'avère nécessaire de trouver d'autres sources d'énergie qui répondent au besoin du monde et assurent la protection de l'environnement. Des progrès technologiques ont démontré que la sécurité dans les approvisionnements en énergie est assurée par les sources d'énergie renouvelable (le soleil, le vent, la chaleur de la terre ...).

Les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets polluants, de plus elles sont inépuisables. De grands efforts ont été consacrés par plusieurs pays afin de développer ces ressources, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque (PV). En effet selon les chiffres donnés en 2017 de « **International Energy Agency** » [1] la production d'énergie photovoltaïque (PV) va tripler en huit ans pour atteindre les 900 TWh en 2022.

L'énergie photovoltaïque repose sur la transformation des rayons lumineux provenant du soleil en électricité, cette transformation est assurée par un composant électronique qui est la cellule photovoltaïque, élément de base de tout système PV. La première cellule fabriquée aux Etats-Unis vers les années 50 [2] était à base de silicium. Pour réduire les coûts et augmenter les performances des cellules PV, plusieurs recherches sont dirigées vers d'autres technologies en exploitant d'autres nouveaux matériaux. La concurrence sur l'optimisation et l'augmentation de l'efficacité de ces composants, conduit les chercheurs à trouver des méthodes pour déterminer les paramètres intrinsèques de ces cellules.

Dans ce contexte, notre travail est focalisé sur la modélisation et l'optimisation des paramètres des différents modèles (modèle à une diode et à deux diodes) d'un module PV en utilisant les algorithmes génétiques.

Ce manuscrit est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à l'étude du rayonnement solaire, principe de la cellule PV, et l'architecture d'un générateur photovoltaïque GPV. Dans le deuxième chapitre, nous



présentons les différents circuits électriques du modèle à une seule diode et à deux diodes d'une cellule PV, ainsi que leurs équations mathématiques. Nous décrivons également dans ce chapitre les notions de base et le principe des algorithmes génétiques.

Le dernier chapitre, sera destiné à la description de la méthode appliquer pour déterminer les paramètres électriques et aux résultats de simulation comparatives des caractéristiques courant-tension I-V et puissance-tension P-V mesurées et calculées entre les modèles électrique d'un module PV à une et à deux diodes.

Enfin, nous terminerons cette étude par une conclusion générale.

### I.1 Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire a connu ces dernières années une large propagation dans plusieurs pays du monde. Cette exploitation se fait principalement de deux manières.

- Transformation thermique : Par l'exploitation de la chaleur du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz).
- Transformation photovoltaïque : c'est la transformation d'une partie de la lumière du rayonnement solaire vers une énergie électrique, grâce au panneau PV formé des cellules à semi-conducteur.

Ce chapitre est donc consacré à présenter les généralités du système PV, en commençant par l'élément de base qui est la cellule PV, puis l'architecture du générateur PV et les techniques de protection.

## I.2 Spectre solaire

Le spectre du rayonnement électromagnétique solaire comporte une très grande étendue, depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X. On distingue en général le spectre continu, qui est sensiblement celui d'un corps noir à environ 6000K et le spectre réel d'émission du soleil [3].

La figure I-1 présente la courbe d'énergie du corps noir à 6000K, le rayonnement solaire hors de l'atmosphère et le rayonnement solaire au niveau de la mer en fonction de la longueur d'onde. Ces courbes montrent que 9,2% de l'énergie de ce spectre se trouve dans l'ultraviolet, 42,4% dans le visible et 48,4% dans l'infrarouge.

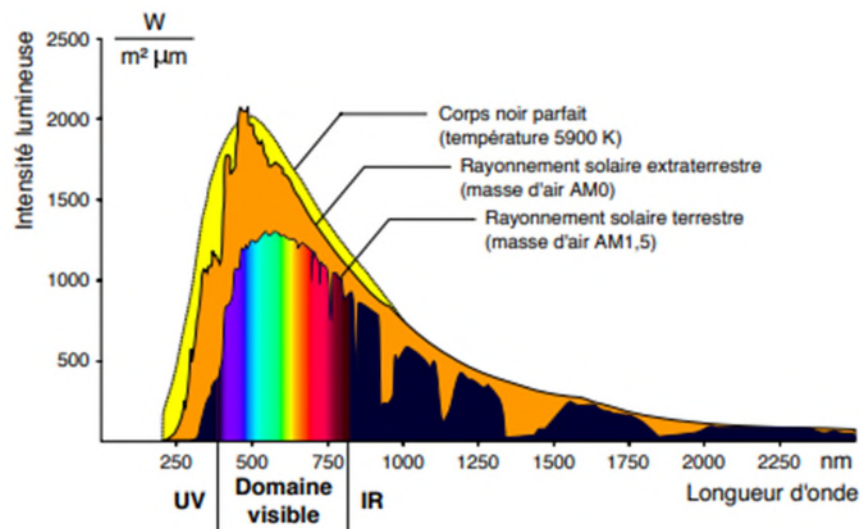


Figure I-1 : Eclairage solaire [4].

D'après la figure I-1, nous constatons que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé.

Sur la surface de la terre, le spectre solaire n'est pas le même que dans l'espace, car il est pondéré par l'absorption des molécules présentes dans l'atmosphère ( $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,...). Les conditions climatiques ainsi que la présence de particules influent également sur la valeur réelle du spectre. Pour tenir compte de cette différence, on doit comparer les performances des cellules solaires et qualifier les différents spectres solaires utilisés, on introduit un coefficient appelé masse d'air ( $AM_x$ ) dont l'expression est :

$$x = \frac{1}{\sin \theta} \quad (I.1)$$

Où  $\theta$  est l'angle que fait le soleil avec son zénith. Par définition, AM0 correspond aux conditions hors atmosphère. Quand le soleil fait un angle de  $48.19^\circ$  par rapport au zénith, la lumière incidente est dite AM1.5. Le nombre de masse d'air caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ( $83.3 \text{ mW/cm}^2$  pour AM1.5 dont la surface est inclinée à  $37^\circ$  du soleil) et de plus, sert de standard pour quantifier les performances de nouveaux dispositifs photovoltaïques. Les conditions standards de caractérisation sont définis par les normes IEC-60904 de l'International Electrotechnical Commission (IEC) selon une distribution spectrale AM1.5 global (somme des rayonnements directs et diffus), d'intensité  $100 \text{ mW/cm}^2$  et pour une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$  [5,6].

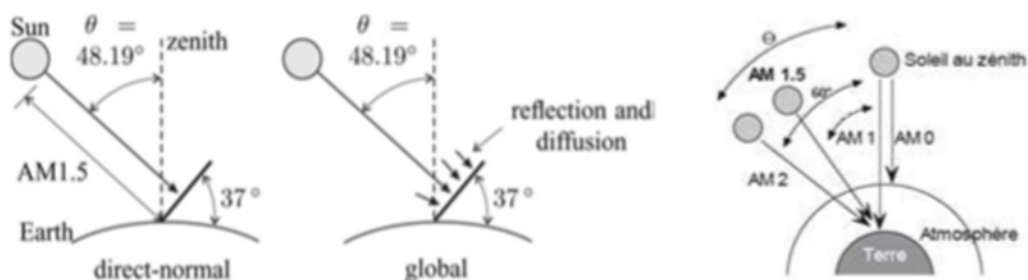
Au sol, le rayonnement solaire a au moins deux composantes : une composante directe et une composante diffusée (rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle : nuages, sol) formant le rayonnement global. La Figure I-2 illustre le spectre d'émission solaire sous AM1.5 global normalisé à  $100 \text{ mW/cm}^2$  [7,8]

Sa valeur dépend de la pression, de l'altitude et de l'angle d'incidence des rayons lumineux. L'intégration de l'irradiation sur la totalité du spectre permet d'obtenir la puissance  $P$  (en  $\text{W.m}^{-2}$ ) fournie par le rayonnement. Pour simplifier on utilise les notions suivantes [7] :

**AM0** : Hors atmosphère (application spatiale).  $P \approx 1.36 \text{ KW.m}^{-2}$ .

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

**AM1.5G** : Spectre standard, le soleil est à  $45^\circ$ .  $P \approx 1 \text{ KW.m}^{-2}$ .



**Figure I-2** : Schéma indiquant le nombre d'air masse AMx en fonction de la position géographique.

### I.3 Dualité de la lumière

La lumière peut être sous forme ondulatoire de longueur d'onde  $\lambda$  ou sous forme corpusculaire possédant une énergie  $E$  liée à  $\lambda$  par la relation suivante [7] :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

$h$  : constante de Planck ( $\text{j.S}^{-1}$ ).

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide ( $\text{m.S}^{-1}$ ).

$\nu$  : Fréquence ( $\text{S}^{-1}$ ).

$\lambda$  : Longueur d'onde ( $\text{m}$ ).

La notion de dualité onde/corpuscule est importante pour comprendre les phénomènes d'interaction entre un rayonnement et un matériau.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\mu\text{m}$  (ultra-violet) et  $4\mu\text{m}$  (infra-rouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\mu\text{m}$ . 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre  $0,2\mu\text{m}$  et  $2,5\mu\text{m}$ . De  $0,4\mu\text{m}$  à  $0,78\mu\text{m}$ , le spectre correspond au domaine du visible. Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Le tableau **I-1** donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [9].

$\lambda(\mu\text{m})$	$E(\text{ev})$	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

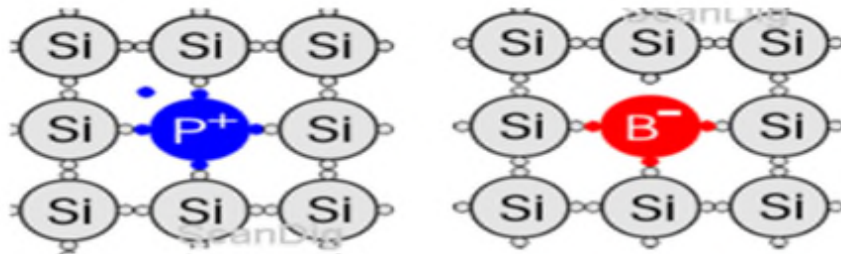
**Tableau I-1** Valeurs énergétiques des photons issus du spectre solaire.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons. Puis, l'énergie des photons excite des électrons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

### I.4 La cellule photovoltaïque

#### I.4.1 Propriétés des semi-conducteurs

Un Semi-conducteur est un composant dont la conductivité électrique (plus importante que celle des isolants, mais plus faible que celle des métaux) augmente par addition d'impuretés dans sa structure. Le semi-conducteur le plus courant est à base de silicium Si, un élément chimique le plus souvent associé à l'oxygène dans la silice SiO<sub>2</sub>, donc très abondant dans la nature. Le silicium pur est un semi-conducteur intrinsèque. Les propriétés d'un semi-conducteur peuvent être contrôlées en le dopant par des impuretés. Un semi-conducteur présentant plus d'électrons que de trous est alors dit de type N, tandis qu'un semi-conducteur présentant plus de trous que d'électrons est dit de type P. La figure ci-dessous montre comment se font les liaisons dans un cristal de silicium.



**Figure I-3** : semi-conducteur de type N et type P.

Chaque Si comporte quatre électrons périphériques, appelés électrons de valence, et chacun de ses quatre voisins apporte un électron à mettre en commun pour créer quatre liaisons avec ses plus proches voisins. Il y a donc huit électrons externes autour de chaque Si (configuration stable). Le principe est ensuite d'utiliser les éléments voisins dans la classification périodique l'une présentant un excès d'électrons grâce au phosphore (Ph) et l'autre un déficit en électrons grâce au Bore (Bo), sont dites respectivement dopée de type N et dopée de type P [10].

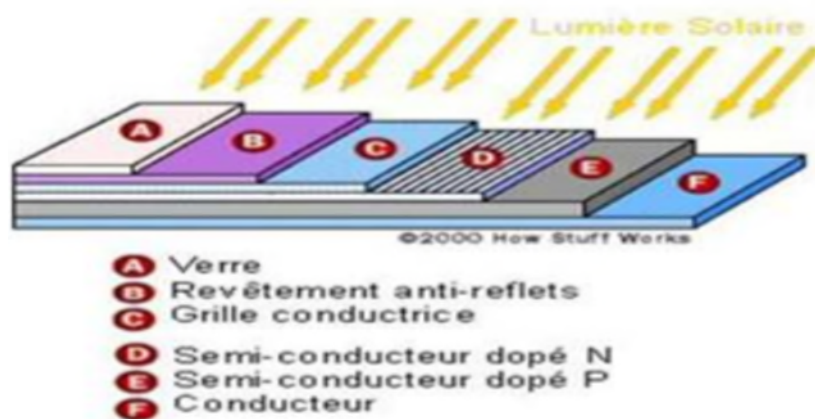
### I.4.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N en y diffusant du bore ou du phosphore [10]. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice.
- d'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- d'une grille conductrice sur le dessus (cathode) et d'un métal conducteur sur le dessous (anode).
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

La Figure I-4 représente la structure basique d'une cellule photovoltaïque.



**Figure I-4 :** Structure basique d'une cellule solaire.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en

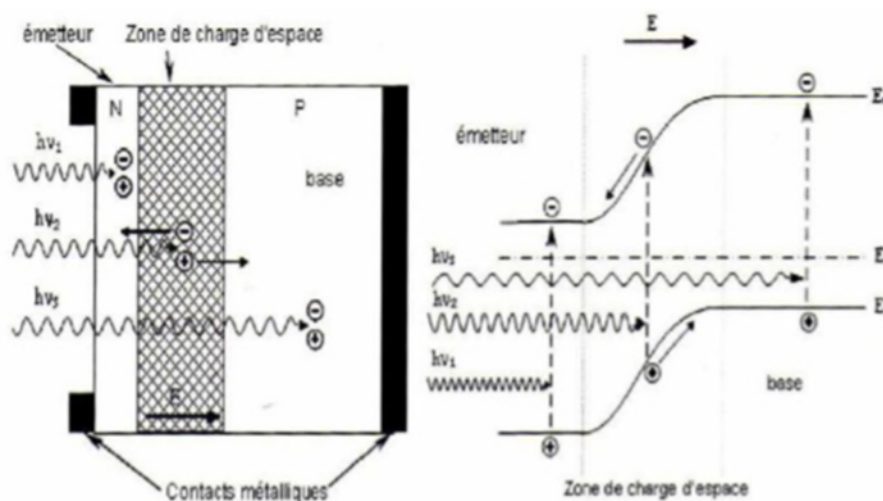
fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [11].

Une cellule PV donc est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [10] :

- Absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert de l'énergie lumineuse aux électrons.
- La collecte des charges.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant : d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire.



**Figure I-5** : Structure (à gauche) et diagramme de bande (à droite) d'une cellule photovoltaïque.

Comme nous montre la figure ci-dessus, les photons incidents créent des porteurs dans les zones **N** et **P** et dans la zone de charge d'espace. Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :



- dans la zone **N** ou **P**, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone **P** (pour les trous) ou dans la zone **N** (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un photocourant de diffusion.
- dans la zone de charge d'espace, le pair électron/ trou créés par les photons incidents sont dissociés par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région **N**, les trous vers la région **P**.

Ce déplacement des photoporteurs donne naissance à un photocourant de génération. Ces deux contributions ensemble ont pour résultat de donner un photocourant total  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [12].

### I.5 Différentes types technologies de cellule photovoltaïque

Les différentes technologies de cellule PV existantes sont :

#### I.5.1 Technologie de la 1<sup>ère</sup> génération à base de silicium cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [13].

#### I.5.2 Technologie de la 2<sup>ème</sup> génération à base de couche-mince

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé de silicium ou d'autres matériaux. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir [14] :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de Cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

### **I.5.3 Technologie de la 3<sup>ème</sup> génération : multi-jonction concentration**

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement. Il y a trois types de cellules [13].

- Cellule multicouche.
- Cellule organique.
- Cellule à concentration.

Dans le tableau **I-2**, on résume les différentes performances des technologies citées précédemment [15].

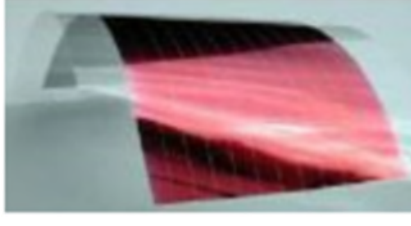
Type de cellule	Rendement	Avantages	Inconvénients	Illustration
<b>Silicium Poly-cristallin</b>	11-15%	Bon Rendement Pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
<b>Silicium mono-cristallin</b>	13-17%	Bon rendement Pour une Cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en fabrication	
<b>Silicium amorphe</b>	5-6%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
<b>Cdte</b>	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium Très Polluant	
<b>CIGS</b>	20%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
<b>Cellules organiques</b>	5%	Faible cout de fabrication flexible	Rendement encore trop bas	

Tableau I-2 : tableau récapitulatif des différents types des cellules PV.

## I.6 Paramètres de la cellule solaire

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- ✚ Le courant de court-circuit  $I_{cc}$
- ✚ La tension en circuit ouvert  $V_{co}$
- ✚ Le facteur de forme  $FF$
- ✚ Le rendement de conversion d'énergie  $\eta$
- ✚ Le point de puissance maximale  $PPM$
- ✚ La réponse spectrale  $RS$

### I.6.1 Courant de court-circuit $I_{cc}$

Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque éclairée lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension  $V$  à ses bornes est alors nulle).

### I.6.2 Tension à circuit ouvert $V_{co}$

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire :  $V_{co} = V (I = 0)$ .

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par [16] :

$$V_{co} = \frac{k.T}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I-4)$$

### I.6.3 Facteur de forme $FF$

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance optimale que peut délivrer la cellule notée  $P_{ppm}$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule  $I_{cc} * V_{co}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également [9]. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{ppm}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I-5)$$

### I.6.4 Rendement de conversion $\eta$

Le rendement  $\eta$  de la cellule solaire exprimé en pourcentage, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance optimale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente [17].

$$\eta = \frac{V_{PPm} \cdot I_{PPm}}{P_{in}} \quad (\text{I-6})$$

Avec :

$I_{ppm}$  : Courant optimale au point de puissance maximale (A).

$V_{ppm}$  : Tension optimale au point de puissance maximale (V).

$P_{in}$  : Puissance incidente.

### I.6.5 Point de puissance maximal PPM

Obtenu pour une tension et un courant optimaux :  $V_{opt}$  et  $I_{opt}$  (appelés aussi  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ ), le fonctionnement de la cellule est donc optimale. Voir la Figure I-6.

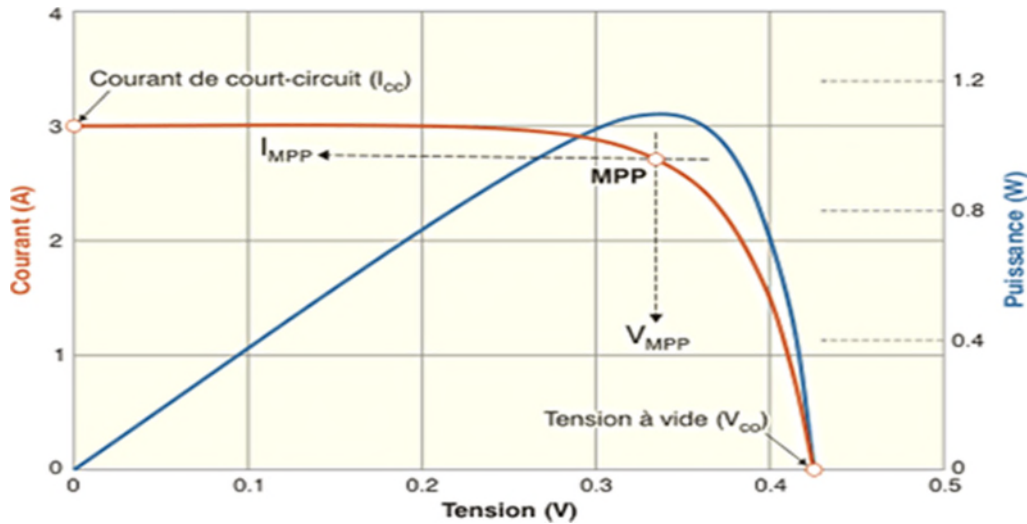


Figure I-6 : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule solaire [18].

### I.6.6 Repense spectrale d'une cellule solaire

La réponse spectrale  $RS$  d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale  $RS$  est donnée par la relation suivante [19] :

$$RS = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} (A/W) \quad (\text{I-7})$$

Le rendement quantique externe ***EQE*** de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons incidents pour chaque longueur d'onde, il est relié à la réponse spectrale par :

$$EQE(\lambda) = RS(\lambda) \frac{h.c}{\lambda.q} \quad (\text{I-8})$$

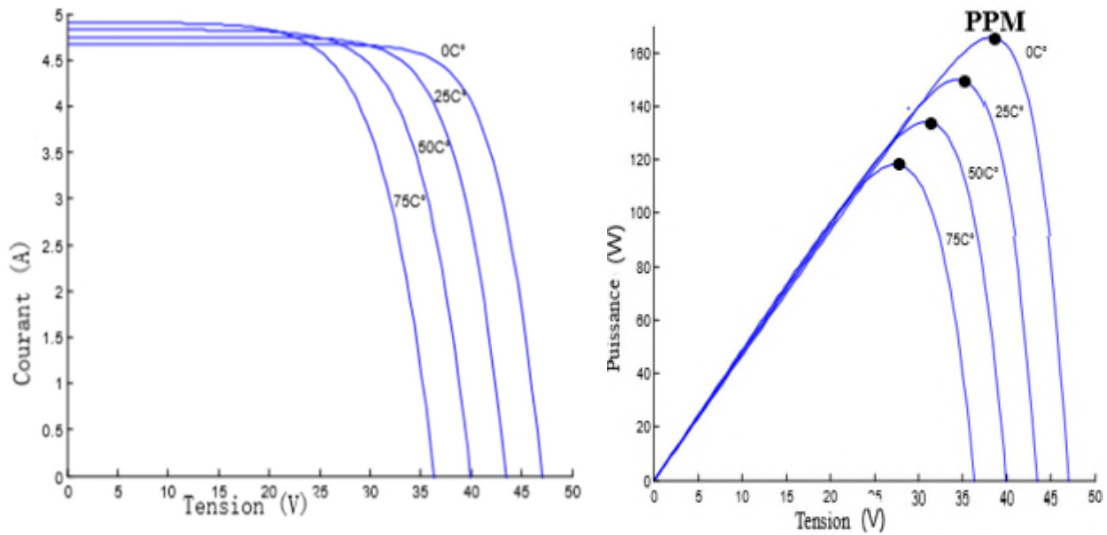
Le rendement quantique interne ***IQE*** de la cellule est le rapport du nombre de porteurs générés sur le nombre de photons pénétrant dans le matériau, il est relié au rendement quantique externe ***EQE*** par l'équation :

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (\text{I-9})$$

## I.7 Influence des paramètres externes sur les caractéristiques électriques de la cellule PV

### I.7.1 Influence de la température

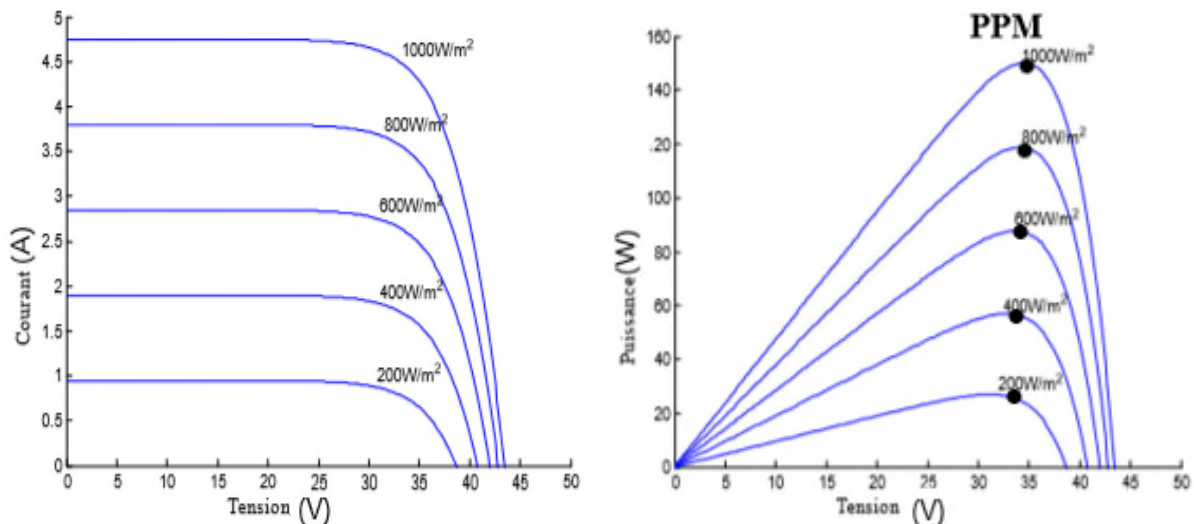
La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques par ce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température [20]. La température influe peu sur la valeur du courant de court-circuit (***I<sub>CC</sub>***). Par contre la tension en circuit ouvert (***V<sub>co</sub>***) ainsi que le point de puissance maximal (***PPM***), de chaque courbe baissent assez fortement lorsque la température augmente. Ce comportement est présenté dans la Figure I-7 pour un éclairage fixe  $E=1000\text{W/m}^2$ .



**Figure I-7 :** Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque.

### I.7.2 Influence de l'éclairement

La valeur du courant court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre la tension en circuit-ouvert ne varie pas dans la même proportion, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que la puissance est pratiquement proportionnelle à l'intensité lumineuse. Cela est illustré dans la Figure I-8 [21].



**Figure I-8 :** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) de la cellule photovoltaïque.

## I.8 Panneau photovoltaïque

### I.8.1 Constitution d'un panneau photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules PV élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ).

Pour obtenir des puissances supérieures, il est donc nécessaire d'associer en série et/ou en parallèle plusieurs modules pour former un panneau photovoltaïque et aussi l'association de plusieurs panneaux en série et/ou en parallèle forme un champ PV ou un générateur PV [22].

Ces deux types d'association des cellules photovoltaïques peuvent être détaillés comme suit :

#### I.8.1.a Mise en série

Le groupement de ( $N_s$ ) cellule en série figure I-9 permet d'augmenter la tension du module photovoltaïque. L'équation I-10 résume la caractéristique électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$$V_{CO_{N_s}} = V_{CO} \cdot N_s \quad (\text{I-10})$$

$V_{CO_{N_s}}$  : la somme des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{CC_{N_s}}$  : courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

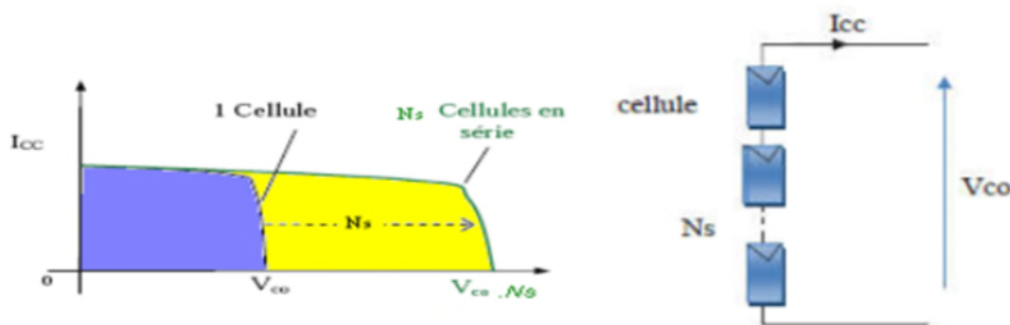


Figure I-9 : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellule en série [23].

#### I.8.1.b Mise en parallèles

Les propriétés du groupement de ( $N_p$ ) cellules en parallèles figure I-10 permet d'augmenter le courant du module photovoltaïque. L'équation I-11 résume la caractéristique électriques d'une association parallèle de ( $N_p$ ) cellules.



Avec :

$$I_{CCNp} = I_{CC} \cdot N_p \quad (\text{I-11})$$

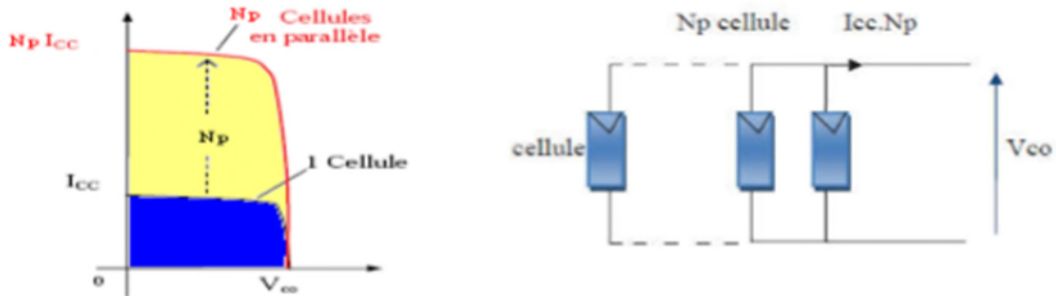


Figure I-10 : Caractéristique courant tension de Np cellule en parallèles [24].

### I.8.1.c Mise en série et en parallèle (hybride)

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

$$V_{CO}^T = N_S \cdot V_{CO} \quad (\text{I-12})$$

$$I_{CC}^T = N_P \cdot I_{CC} \quad (\text{I-13})$$

Avec :

$V_{CO}^T$  : Sommes des tensions en court-circuit en série ;

$I_{CO}^T$  : Sommes des courants en court-circuit en parallèle.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{CC}$  et de la tension à vide  $V_{CO}$  sont plus ou moins importantes figure I-11 [25].

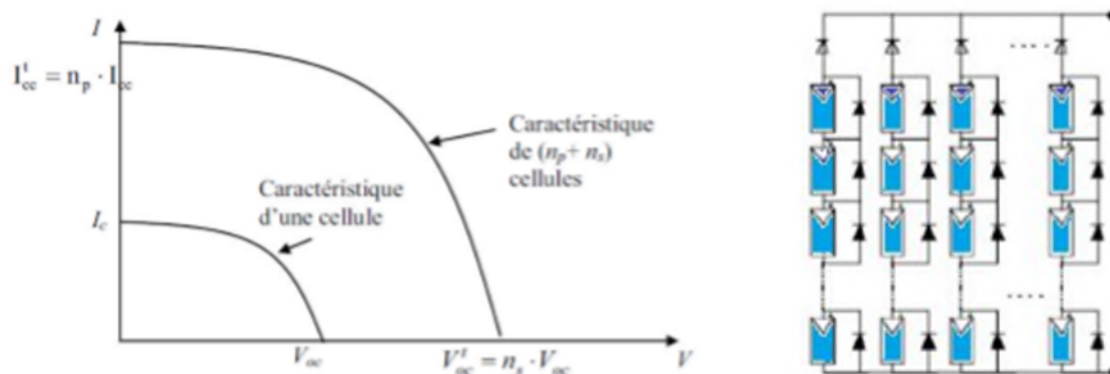


Figure I-11 : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de  $(N_p + N_s)$  cellules identiques.

### I.8.2 Protection des modules photovoltaïques

Il est nécessaire de garantir la protection des installations photovoltaïques afin d'augmenter leurs durées de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et leurs fonctionnements [21].

Pour cela deux types de protection sont misent en place :

- Les diodes de by-pass.
- Les diodes anti-retour.

### I.9 Orientation et inclinaison d'un module photovoltaïque

La position du soleil vis-à-vis des modules photovoltaïques influe directement sur leur production énergétique. Leur placement est très important à fin de profiter au maximum de leurs possibilités.

On appelle l'orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...). Quant à l'inclinaison elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés.

L'orientation idéale d'un module photovoltaïque est : vers l'équateur, ce qui donne :

- Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord ;
- Orientation vers le nord dans l'hémisphère sud.

On déduit de ce fait que l'inclinaison idéale est égale à la latitude du lieu +10° (pour une orientation sud).

### I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

#### I.10.1 Avantages

- Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- C'est une énergie propre et sans risque.
- C'est une énergie renouvelable et inépuisable.
- Elle est de moins en moins chère.
- Une énergie fiable pour tout type de bâtiment.

- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse contrairement aux installations éoliennes.

### I.10.2 Inconvénients

- Les panneaux solaires coutent excessivement cher, du fait de la haute technicité qu'ils requièrent.
- Le rendement actuel des cellules photovoltaïques reste assez faible.
- La production d'énergie ne se fait que le jour alors que la plus forte demande se fait la nuit.
- La transformation du silicium de sa forme naturelle (non exploitable) à sa forme traité (exploitable) nécessite une très haute température (donc beaucoup d'énergie).

### I.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduits (cellule, module, panneau) afin de permettre une bonne compréhension de fonctionnement des systèmes PV.

Ce chapitre nous a permis d'explorer le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies utilisées pour y parvenir. Des aspects aussi bien technologiques qu'électriques ont été abordés afin de mieux comprendre l'ensemble du mécanisme de conversion photovoltaïque.

### II.1 Introduction

La modélisation mathématique des cellules Photovoltaïque (PV) est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement, d'extraction des paramètres ou de simulation d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. La cellule PV est représentée généralement par un circuit électrique équivalent, dont les paramètres sont souvent déterminés en utilisant la caractéristique courant-tension. La détermination précise de ces paramètres reste un défi pour les chercheurs. De ce fait, notre travail consiste à optimiser les paramètres d'un module PV par les algorithmes génétiques.

A la naissance des algorithmes génétiques (AGs) plusieurs problèmes d'optimisation ont été résolus. La simplicité, la facilité et l'efficacité des AGs rendent leurs domaines d'application très vaste, ils sont utilisés dans l'optimisation de fonction numérique difficile.

Ce chapitre est constitué de deux parties. La première est consacrée à la modélisation de la cellule photovoltaïque où nous présentons les différents modèles électriques existants dans la littérature. La seconde partie est consacrée aux algorithmes génétiques comme étant une méthode d'optimisation.

## II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leur réalisation. Ces modèles se différencient par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque.

## II.3 Modèle à une diode

### II.3.1 Modèle à trois paramètres (modèle idéal)

Le modèle idéal est le plus simple des modèles d'une cellule photovoltaïque, il est représenté par une source de courant, qui modélise le courant généré par les photoporteurs, en parallèle avec une diode idéale qui modélise la jonction PN [27].

Le schéma électrique équivalent de la cellule PV pour ce modèle est représenté par la figure (II-1) :

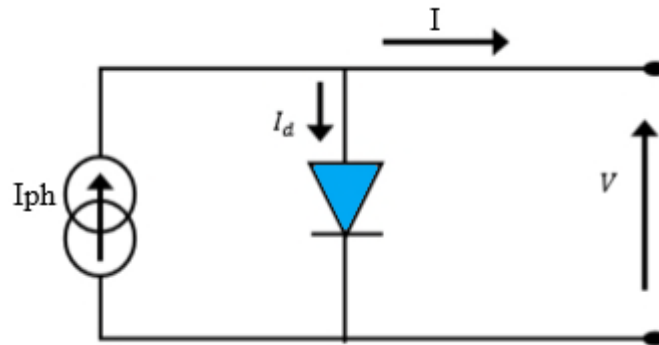


Figure II-1 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Model idéal.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante :

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

Avec :

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{n.V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-2})$$

La tension  $V_T$  est souvent donnée par :

$$V_T = \frac{k.T}{q} \quad (\text{II-3})$$

D'où :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V}{n.V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-4})$$

Avec :

- $I$  : représente le courant de sortie fournie par la cellule solaire [A] ;
- $I_{ph}$  : représente le courant génère par la cellule solaire lorsqu'elle est exposée à la lumière du soleil [A] ;
- $I_d$  : représente le courant de la diode [A] ;
- $I_s$  : Courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) [A] ;
- $V$  : représente la tension de sortie du modèle [V] ;
- $V_T$  : représente la potentielle thermodynamique [V] ;
- $n$  : représente le facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule PV, en général :  $1 < n < 2$ ).
- $q$  : Charge d'électron ( $q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) ;
- $k$  : Constante de Boltzmann ( $k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ) ;
- $T$  : représente la température de la jonction des cellules PV donnée en kelvin [K].

### II.3.2 Modèle à quatre paramètres

Le modèle à quatre paramètres est un modèle largement utilisé, il a été étudié par Townsend [28]. La cellule est modélisée par une source du courant  $I_{ph}$ , dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série  $R_s$  qui modélise les pertes aux contacts et aux connections. Elle est très faible. La figure ci-dessous illustre le circuit électrique équivalent pour ce modèle.

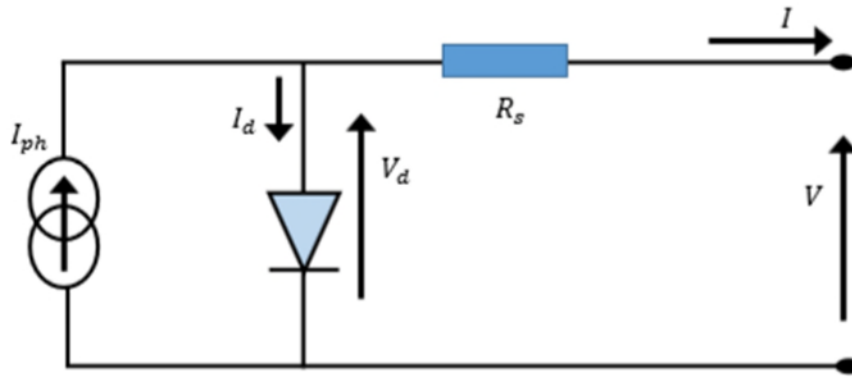


Figure II-2 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (LP4).

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

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

Avec :

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-6})$$

D'où l'équation du courant qui est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n V_T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-7})$$

### II.3.3 Modèle à cinq paramétré (LP5)

C'est un modèle semblable au modèle simplifié. Comme le montre la figure II-3, une source de courant et une diode en parallèle avec une résistance en série, mais dans ce modèle une résistance shunt en parallèle  $R_p$  est ajoutée ayant une grande influence sur le courant généré par le modèle. Physiquement, la résistance shunt sert à la modélisation des pertes autour de la jonction dues aux impuretés et sur les coins de la cellule [29] [30].

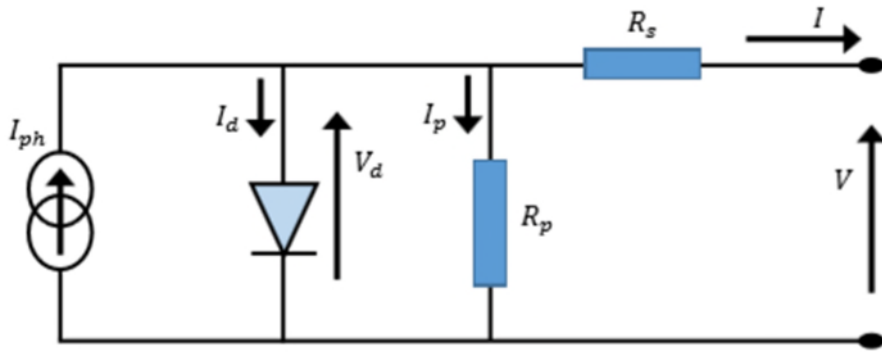


Figure II-3 : Schéma équivalent du modèle à une exponentielle (L5P).

Ce modèle est le plus utilisé dans de nombreuses recherches grâce à son comportement qui est plus proche à une cellule PV, et sa simplicité pour le calcul mathématique.

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

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad (\text{II-9})$$

Ou,  $I_p$  : représente le courant circulant dans la résistance  $R_p$

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

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{n V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_p} \quad (\text{II-10})$$

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



$$I^P = N_p \cdot I \tag{II-11}$$

$$V^S = N_s \cdot V \tag{II-12}$$

Donc l'équation du courant devient comme suit :

$$I^P = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \left[ \exp \left( \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{R_s \cdot I^P}{N_p}}{n \cdot V_T} \right) - 1 \right] - \frac{\frac{V}{N_s} + \frac{R_s \cdot I^P}{N_p}}{R_p} \tag{II-13}$$

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

## II.4 Modèle à deux diodes

Actuellement le modèle à deux diodes est le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes). Ce modèle est composé de deux exponentiels. Le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion [31] [32].

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent à deux diodes ci-dessous figure (II-4). Il consiste à la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes ayant les courants de saturation  $I_{s1}$  et  $I_{s2}$ , les facteurs de diode  $n_1$  et  $n_2$ , une source de courant produisant un photo-courant  $I_{ph}$ , qui dépend de l'éclairement solaire [33].

La résistance série  $R_s$  rend compte de la résistivité du matériau, de celle des électrodes et du contact semi-conducteur-Métal.

La résistance parallèle (shunt) ou de court-circuit  $R_p$  traduit quant à elle, la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, causé par un défaut.

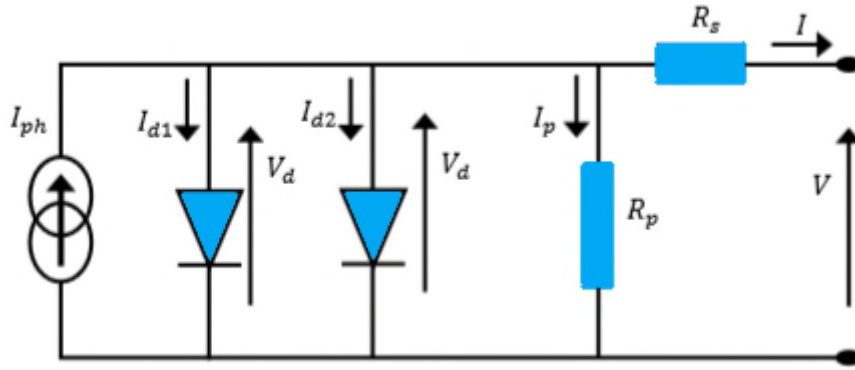


Figure (II-4) : Circuit électrique équivalent à double diode (2M7P).

Les résistances  $R_s$  et  $R_p$  tiennent compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule photovoltaïque. Plus la valeur de  $R_p$  est grande, moins il y a de courants de fuite et le facteur de forme est meilleur. En revanche, plus la valeur de  $R_s$  est petite, moins il y a de pertes résistives à l'interface entre le métal et le semi-conducteur [34].

A partir de la figure II-4, il est clair d'observer que le courant de sortie de la cellule solaire est décrit par l'équation ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p \quad (\text{II-14})$$

Où  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont les courants qui traversent la première et de la deuxième diode respectivement.

$$I_{d1} = I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-15})$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_{T2}}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-16})$$

Avec :

- $I_{s1}$  représente le courant de saturation la première diode ;
- $I_{s2}$  représente le courant de saturation de la seconde diode ;
- $n_1$  et  $n_2$  représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes.

Le courant prédit par le circuit présenté par la figure II-4 peut être exprimé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{n_1 V_{T1}}\right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{n_2 V_{T2}}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (\text{II-17})$$

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

D'après les équations (II-10) et (II-17), on a besoin de déterminer par une méthode d'optimisation qui est les algorithmes génétiques, les valeurs optimales des paramètres qui sont :

- Equations (II.10) : cinq paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $R_s$ ,  $R_p$  et  $n$ ).
- Equations (II.17) : sept paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $n_1$  et  $n_2$ ).

### II.5 Algorithme génétique

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont commencé dans les années 50 par les biologistes. Puis, ils ont été développés en 1975 par John Holland professeur à l'Université du Michigan [35].

C'est une méthode d'optimisation applicable aux systèmes linéaires et non linéaires, basé sur les techniques dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle. Dans un problème d'optimisation, chaque variable correspond un gène dans le chromosome. Par ailleurs, les chromosomes évoluent selon différentes opérations obéissant aux lois génétiques pour aboutir un chromosome optimal.

Les 4 principaux points qui font la différence fondamentale entre les AGs et les méthodes numériques classiques sont [36] :

- Les AGs utilisent un codage des paramètres et non les paramètres eux même
- Les AGs travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique. Ce qui offre l'avantage de minimiser la probabilité de trouver un point optimal local (dans le cas de plusieurs optimaux).
- Les AGs utilisent seulement les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
- Les AGs utilisent des règles de transitions probabilités pour arriver à une solution optimale.

## II.6 Etapes d'un Algorithme génétique

L'application des transformations génétique sur une population d'individus afin d'arriver en fin à un individu optimal passe par les cinq étapes suivantes [37] :

- **Etape 1** : Générer de manière aléatoire N chromosomes dans la population initiale dans l'espace de recherche avec le chromosome.  $[X_1, \dots, X_n]$ , où  $X_{min} < X < X_{(1,\dots,n)} < X_{max}$
- **Etape 2** : Calculer la fonction objective pour chaque chromosome.
- **Etape 3** : Appliquer les opérateurs suivants : la reproduction, le croisement et la mutation.
- **Etape 4** : la solution optimale est obtenue, le processus peut être arrêté. Sinon répéter les étapes 2, 4 jusqu'à ce que la condition de N soit atteinte.
- **Etape 5** : obtention de La solution optimale  $X^*$ , qui correspondant à la meilleure fonction objective.

Ces étapes sont résumées dans la figure II-5 ci-dessous.

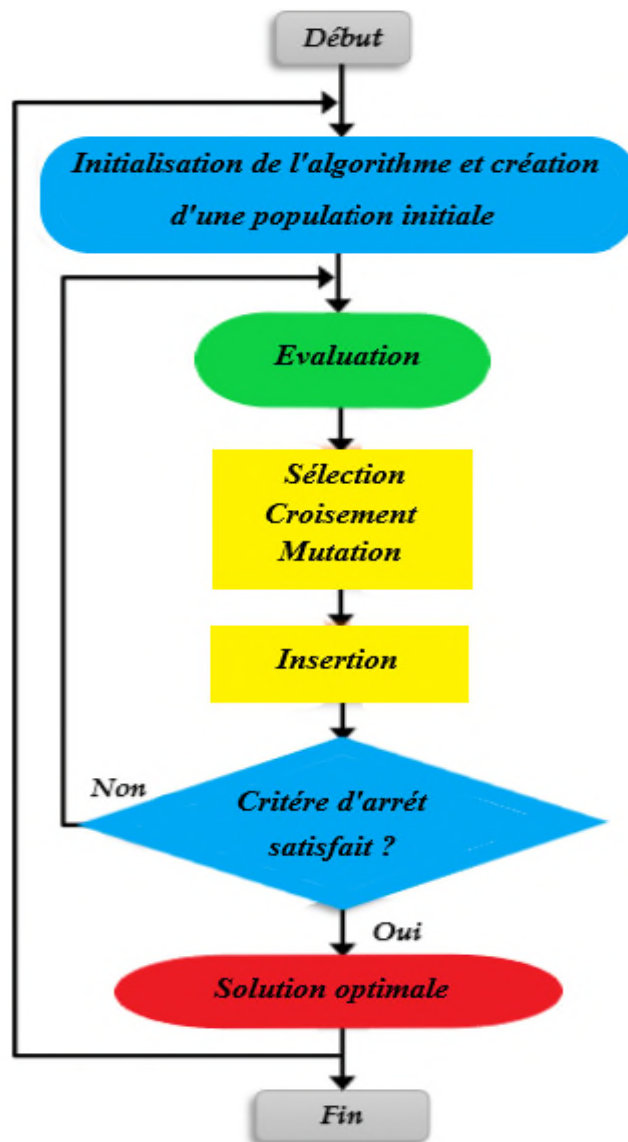


Figure II-5 : Etapes d'un Algorithme Génétique.

Voyons maintenant plus en détail ces différentes phases :

### II.6.1 Initialisation

#### II.6.1.1 Création de la population initiale

Cette phase est simple. Elle consiste à choisir aléatoirement les individus dans la population. Ces individus sont en général codés, il existe trois principaux types de codage : binaire, gray ou réel.

### II.6.1.2 Codage / Décodage

Le codage est une partie très importante des algorithmes génétique, à chaque paramètre on doit faire correspondre à un gène. Un chromosome est constitué d'un ensemble de gènes, chaque dispositif est présenté par un individu doté d'un génotype constitué d'un ou plusieurs chromosomes. La population sera un ensemble de N individus, qui évoluera d'une génération à une autre. Il existe trois types principaux de codage : binaire, gray et réel [38].

➤ **Le codage binaire**

C'est le plus simple et premier à utiliser dans les AGs. Il présente plusieurs avantages : alphabet minimum  $\{0,1\}$ , facilité de mise en point d'opérateurs génétiques et existence de fondements théorique. Cependant ce type de codage peut devenir si mauvais dans des espaces de grandes dimensions [37].

➤ **Le codage réel**

La représentation réelle élimine toutes les opérations de conversion des solutions, qui se représentent un grand nombre de fois à chaque génération [39].

➤ **Le codage de gray**

Le codage de gray est un codage qui a comme propriété qu'entre un élément  $n$  et un élément  $n+1$ , donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère [40].

### II.6.2 Évaluation

L'évolution est une opération très importante elle assure la survie d'un individu optimal.

➤ **Fonction de fitness**

Elle donne en valeur numérique positive la qualité d'un individu. Selon cette valeur on calcule la chance de sélection de l'individu correspondant.

➤ **Fonction objectif**

Elle donne les performances d'un individu, cette fonction peut être négative, nulle, ou à caractère minimal lorsque l'individu est optimal. C'est pour ça qu'elle nécessite parfois, un transfert en fonction positive qu'on cherche à maximiser (fonction fitness) [41].

Cette transformation est assurée par une fonction  $g$  :

$$F(x) = g(f(x)) \quad (\text{II-18})$$

Avec :

$f$  : Fonction objectif.

$F$  : Fonction fitness (coût), positive non nulle.

$g$  : Fonction assurant le passage de la fonction objectif à la fonction fitness.

### II.6.3 Sélection

Cette étape permet aux individus d'une population de survivre, ou de mourir. C'est-à-dire elle permet de choisir les individus qui vont accorder à la génération intermédiaire pour se former la nouvelle génération.

La probabilité de suivre d'un individu est liée à son efficacité relative au sien de la population. Il existe plusieurs méthode de sélection, les plus utilisées sont les deux suivants [42] [43] :

#### II.6.3.1 Sélection par roulette

Les parents sont sélectionnés en fonction de leur performance. Meilleur est le résultat codé par un chromosome, plus grandes est ses chances d'être sélectionné. Il faut imaginer une sorte de roulette de casino sur laquelle sont placés tous les chromosomes de la population, la place accordée à chacun des chromosomes étant en relation avec sa valeur d'évaluation [44]. Cette roulette est représentée par la figure II-6.

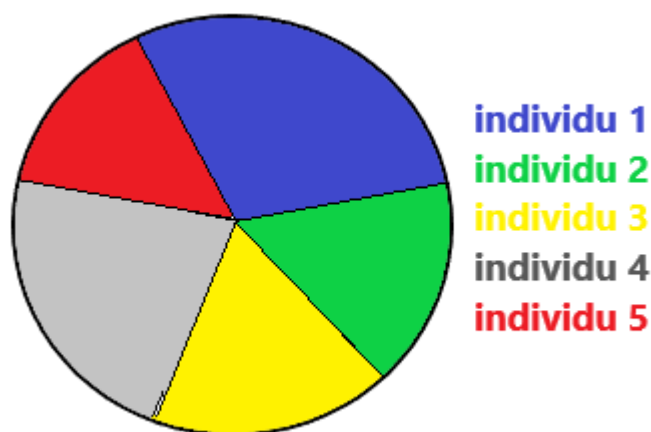


Figure II-6 : Sélection par roulette.

Ensuite, la bille est lancée et s'arrête sur un chromosome. Les meilleurs chromosomes peuvent ainsi être tirés plusieurs fois et les plus mauvais ne jamais être sélectionnés. Cela peut être simulé par l'algorithme suivant :

- On calcule la somme  $S$  de toutes les fonctions d'évaluation d'une population.
- On génère un nombre "r" entre 0 et  $S$ .
- On calcule ensuite une somme  $2 S$  des évaluations en s'arrêtant dès que r est dépassé.
- Le dernier chromosome dont la fonction d'évaluation vient d'être ajoutée est sélectionné.

### II.6.3.2 Sélection par tournoi

Sur une population de  $N$  chromosomes, on forme  $N$  pair de chromosomes. Dans les paramètres de l'AG, on détermine une probabilité de victoire du plus fort. Cette probabilité représente la chance qu'a le meilleur chromosome de chaque paire d'être sélectionné. Cette probabilité doit être grande (entre 70% et 100%). A partir des  $N$  pairs, on détermine ainsi  $N$  individus pour la reproduction [45] (voir la figure II-7).

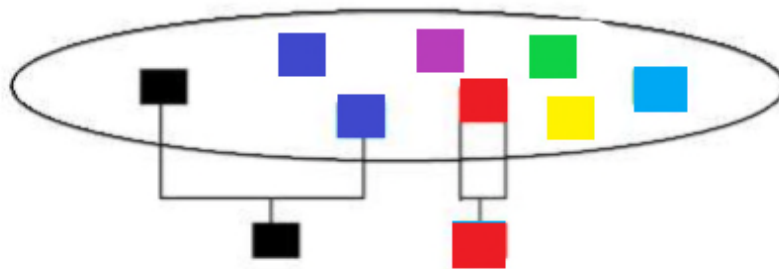


Figure II-7 : Sélection par tournoi.

### II.6.4 Croisement

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. En recombinant les chromosomes d'une paire d'individus sélectionnés (parents), une nouvelle paire d'individus (enfants) est créée. Cette dernière hérite certaines caractéristiques de leurs parents [46].

Plusieurs stratégies de croisement sont utilisées on cite par exemple :



### II.6.4.1 Croisement point simple

Pour chaque couple on choisit au hasard un point de croisement figure II-8. Le croisement s'effectue directement au niveau binaire. Un croisement peut être coupé au milieu d'un gène [47].

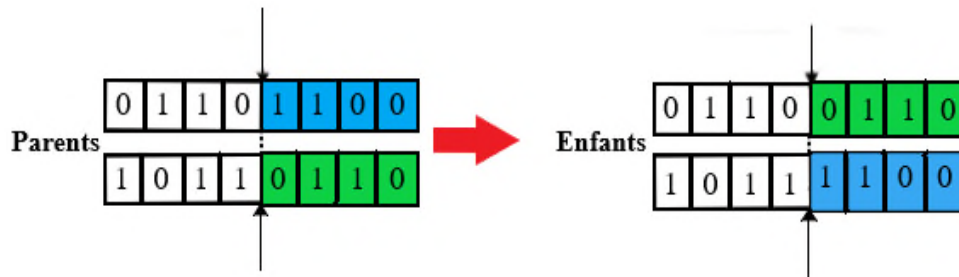


Figure II-8 : Exemple de croisement en un point.

### II.6.4.2 Croisement multipoint

Consiste à sélectionner deux ou plusieurs sites de croisement (la figure II-9) présente le croisement en plusieurs sites). Il est généralement considéré le plus efficace que le précédent. [48].

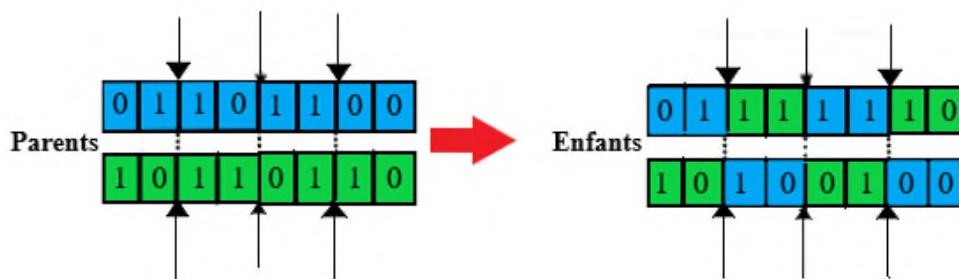


Figure II-9 : Exemple de croisement en multipoint.

### II.6.5 Mutation

Cette étape dans le cas binaire consiste à changer aléatoirement la valeur d'un ou plusieurs bits de l'individu de la population parent d'une valeur 1 à la valeur 0 ou contrairement avec une probabilité de mutation  $P_m$  fixée.

Il existe plusieurs types de mutation telle que la mutation uni point, voir la figure II-10 multipoint et polynomiale [49].



**Figure II-10** : Exemple de mutation

### II.6.6 Insertion

La population issue des opérations génétiques sera insérée dans l'ancienne population d'une manière à garder les individus ayant la fonction fitness la plus grande [41].

### II.6.7 Critère d'arrêt :

Les opérations génétiques précédentes seront exécutées plusieurs fois et à chaque fois on obtient une nouvelle population ayant des individus plus en plus adaptés.

Le critère d'arrêt peut être choisi de plusieurs façons parmi lesquelles on peut citer [50] :

- Si le résultat atteint une solution satisfaisante (optimale  $S_m$ ).
- Si le nombre d'itération atteint le nombre de génération  $N_{gen}$  fixé.
- S'il n'y a pas d'amélioration pendant un certain nombre de générations.

## II.7 Influence des paramètres de l'AG

Les opérations de l'algorithme génétique dépendent de plusieurs paramètres fixés à l'avance. La valeur de ces paramètres influe sur la réussite de l'algorithme. Ces paramètres sont les suivant [50] :

### ➤ La taille de population $N$

Si  $N$  est trop grand le temps de calcul de l'algorithme devient important. Si  $N$  est trop petit la population peut converger vers un mauvais individu.

### ➤ La longueur des individus $S$

La précision des solutions dépend de la longueur de chaque individu, donc plus  $S$  est grand plus on gagne de la précision.

### ➤ **La probabilité de croisement $P_c$**

La population subit de changements importants lorsque  $P_c$  est élevé. Généralement les valeurs admises sont comprises entre 0,5 et 0,9.

### ➤ **La probabilité de mutation $P_m$**

Ce taux est généralement faible, car un taux élevé risque de conduire à une solution sous optimale, et à la perte de la population originale.

## II.8 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

### II.8.1 Avantages des AGs

- Les AGs opèrent au niveau du codage des paramètres sans se soucier de leur nature, donc ils s'appliquent à de nombreuses classes de problèmes, qui dépendent éventuellement de plusieurs paramètres de natures différentes (booléens, entiers, réels, fonctions...).
- Pour les mêmes raisons un AG est dans l'idéal totalement indépendant de la nature du problème et de la fonction à optimiser, car il ne se sert que des valeurs d'adaptation, qui peuvent être très différentes des valeurs de la fonction à optimiser, même si elles sont calculées à partir de cette dernière.
- Potentiellement les AGs explorent tous l'espace des points en même temps, ce qui limite les risques de tomber dans des optimums locaux.
- Les AGs ne se servent que des valeurs de la fonctionnelle pour optimiser cette dernière, il n'y a pas besoin d'effectuer de coûteux et parfois très complexes calculs.
- Les AGs présentent une grande robustesse c'est-à-dire une grande capacité à trouver les optimums globaux des problèmes d'optimisation.

### II.8.2 Inconvénients des AGs

- Les AGs ne sont encore actuellement pas très efficaces en coût (ou vitesse de convergence), vis-à-vis de méthodes d'optimisation plus classiques.
- Parfois les AGs convergent très vite vers un individu particulier de la population dont la valeur d'adaptation est très élevée.
- Le respect de la contrainte de domaine par la solution codée sous forme de chaîne de bits pose parfois problème. Il faut bien choisir le codage, voir modifier les opérateurs.

- En pratique l'efficacité d'un AG dépend souvent de la nature du problème d'optimisation. Selon les cas de choix des opérateurs et des paramètres seront souvent critiques, mais aucune théorie générale ne permet de connaître avec certitude la bonne paramétrisation, il faudra faire plusieurs expériences pour s'en approcher.

### II.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons établi les modèles mathématiques à une diode et à deux diodes d'une cellule photovoltaïque. Aussi, nous avons présenté un aperçu sur les concepts de base et le principe de fonctionnement des algorithmes génétiques.

Ces algorithmes seront appliqués dans le chapitre suivant pour la résolution d'un problème d'extraction des paramètres d'un module photovoltaïque.

### III.1 Introduction

Les performances de la cellule PV peuvent être améliorées par l'optimisation des paramètres physiques pour assurer un bon rendement.

Notre travail consiste à identifier les paramètres d'un module PV à partir de la caractéristique expérimentale courant - tension (I-V) par les algorithmes génétiques (AGs).

Dans ce présent chapitre, nous décrivons en premier lieu la méthode que nous utilisons pour optimiser les paramètres des modèles à une diode et à deux diodes cités au chapitre précédent. Puis, nous discutons les résultats obtenus et nous déterminons le modèle le plus correspondant à la caractéristique réelle du module PV.

## III.2 Optimisation des paramètres électriques d'un module PV

L'optimisation des paramètres des cellules PV et des panneaux solaires sont très importants pour l'amélioration de la qualité du dispositif lors de la fabrication, de la modélisation et de simulation. Les paramètres de la cellule PV sont conventionnellement extraits de données courant-tension (I-V) mesurée soit sous un éclairage ou dans l'obscurité.

### III.2.1 Méthodologie de calcul

La méthode d'extraction des paramètres par les AGs fournit des solutions optimales globales de la caractéristique I-V du module photovoltaïque étudié. Cette dernière sera exploitée pour extraire les paramètres électriques d'une cellule PV pour modèle à exponentielle pratiquement définit par cinq paramètres et double exponentielles définit par sept paramètres, qui sont regroupés dans un vecteur appelé chromosome.

Dans notre travail, le problème posé est de chercher les valeurs optimales des paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_S$  ou  $(I_{S1}, I_{S2})$ ,  $R_S$ ,  $R_P$  et  $n$  ou  $(n1, n2)$  qui minimisent l'erreur quadratique moyenne *MSE* présentée par l'Eq. III-1. Cette erreur est générée entre les mesures réelles du courant  $I_{mes}$  et les valeurs prédites  $I_{cal}$  [17]. Le problème d'optimisation sous contrainte qui permet de fournir les paramètres du modèle PV souhaité peut être donné comme suit :

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (I_{mes}(V_i) - I_{cal}(V_i))^2} \quad \text{(III-1)}$$

Avec :

$I_{mes}$  : est le courant expérimental à  $V_i$ .

$I_{cal}$  : est le courant prédit à  $V_i$ .

$L$  : est le nombre de point de la caractéristique I-V.

L'organigramme de la figure III-1 donne le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique pour optimiser les paramètres d'un module PV.

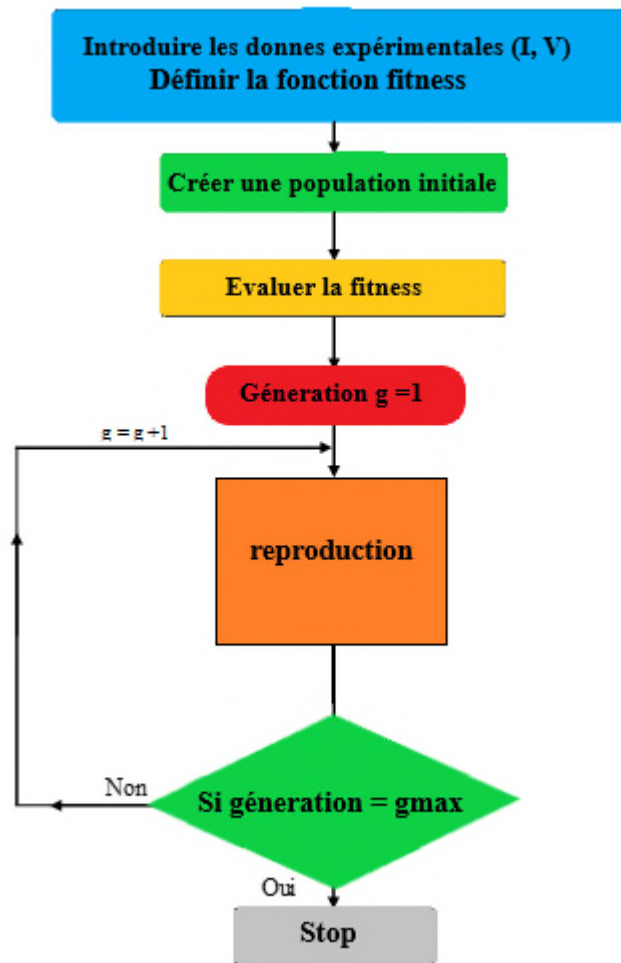


Figure III-1 : Organigramme de l'algorithme génétique.

La population initiale ( $I_{ni\_pop}$ ) des chromosomes est une matrice décrite comme suit :

$$I_{ni\_pop} = (B_{max} - B_{min}) \cdot random. [N, M] + B_{min} \quad (\text{III-2})$$

Où :

$N$  : est le nombre de chromosome de la matrice  $I_{ni\_pop}$  (taille de la matrice),

$M$  : est le nombre de variables dans le chromosome ( $M = 5$  et  $M = 7$ ),

$B_{min}$  et  $B_{max}$  : sont respectivement les bornes maximales et minimales des valeurs des paramètres à déterminer.

Nous avons défini pour chaque paramètre un intervalle de variation [ $B_{\min}$   $B_{\max}$ ]. Les tableaux III-1 et III-2 contiennent les valeurs  $B_{\min}$  et  $B_{\max}$  des différents paramètres à optimiser respectivement pour modèle à cinq paramètres et à celui de sept paramètres.

Pour la sélection nous avons utilisé la sélection par tournoi binaire dont le principe est comme suit : on tire deux chromosomes aléatoirement de la population et on reproduit le meilleur dans la nouvelle population.

Paramètres	I <sub>ph</sub>	I <sub>s</sub>	R <sub>s</sub>	R <sub>p</sub>	n
$B_{\min}$	0	10 <sup>-6</sup>	0.01	100	1
$B_{\max}$	5.5	10 <sup>-5</sup>	1	500	2

**Tableau III-1 :** Bornes maximales et minimales des différents paramètres du modèle à une diode.

Paramètres	I <sub>ph</sub>	I <sub>s1</sub>	I <sub>s2</sub>	R <sub>s</sub>	R <sub>p</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>
$B_{\min}$	0	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-9</sup>	0.1	100	0.8	1.8
$B_{\max}$	6	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	1	500	1.8	3

**Tableau III-2 :** Bornes maximales et minimales des différents paramètres du modèle à deux diodes.

Notre processus d'optimisation est assuré par une population de 100 individus pour chaque génération et 100 générations. Les paramètres utilisés dans cette étude sont résumés dans le tableau III-3.

Paramètres d'AG	Valeur
La taille de la population	100
Le nombre Maximum de générations	100
Fitness	10 <sup>-4</sup>
la probabilité de mutation	0.09
la probabilité de croisement	0.8
Le taux de mutation	1% - 2%

**Tableau III-3 :** Paramètres de AG utilisés dans cette application.



### III.3 Données expérimentales

La base de données expérimentales utilisée dans notre travail est obtenue par un module photovoltaïque de type CEM100M composé de 36 cellules solaires monocristalline montées en série qui sont considérées de même type. Le tableau **III-4** présente les caractéristiques électriques de ce panneau mesurées à des conditions STC (condition de test standard).

Grandeurs	Valeur
Eclairement standard	1000W/m <sup>2</sup>
Température standard	25°C
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	100W
Courant à $P_{max}$ ( $I_{opt}$ )	5.41A
Tension a $P_{max}$ ( $V_{opt}$ )	18.5V
Courant en court-circuit ( $I_{cc}$ )	5.84A
Tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ )	22.3V
Rendement	7.68
Facteur de forme	76.79%
Nombre de cellules en séries	36 Monocristalline

**Tableau III-4** : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque de type CEM100M-36.

Les données manipulées sont obtenues à partir de la caractéristique pratique courant-tension de ce panneau sous un éclairement de 669W/m<sup>2</sup> et à une température de 41°C (Les mesures ont été effectué au matin d'une journée peu ensoleillée (04/07/2019)).

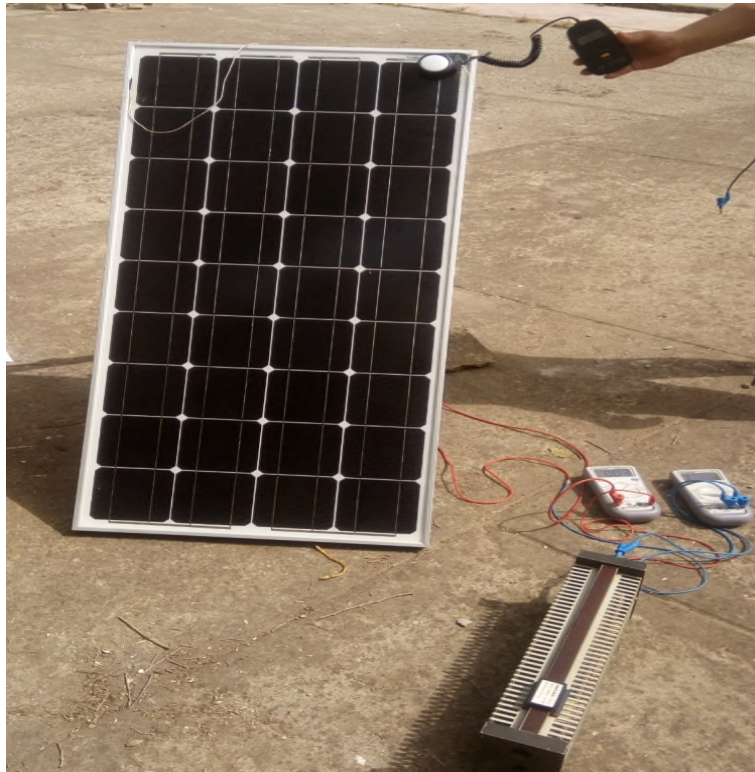


Figure III-2 : Montage réalisé.

La figure III-3 représente les courbes de courant - tension (I-V) et puissance - tension (P-V) du module CEM100M-36 sous un éclairement de  $669\text{W/m}^2$  et à une température de  $41^\circ\text{C}$ .

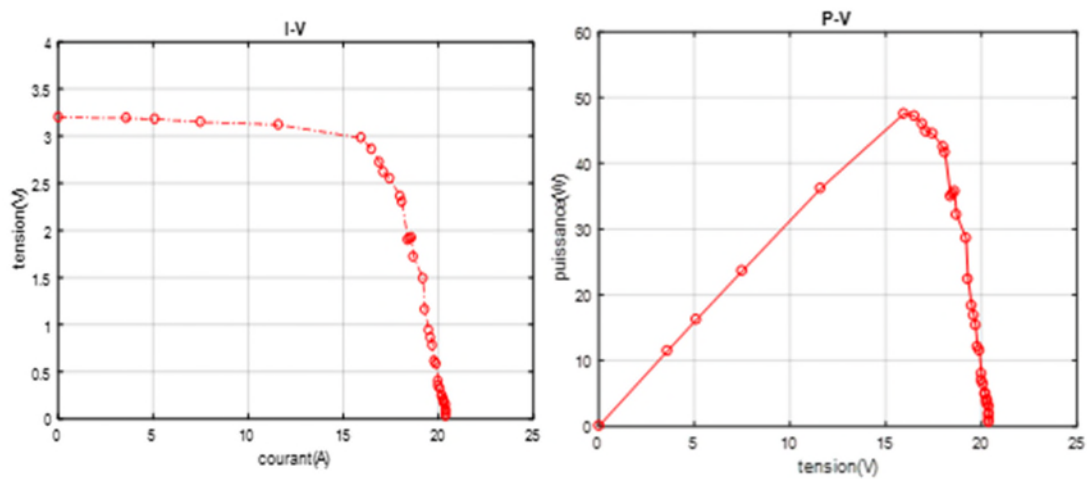


Figure III-3 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) du panneau PV.

Le courant  $I_{cc}$  et la tension  $V_{co}$  sont différents des valeurs standard du module et cela revient à l'éclairement et la température dans lesquels les mesures ont été effectuées.

Dans ce qui suit, nous utilisons un programme d'AGs développé sous MATLAB script file pour optimiser les paramètres du module PV à partir de la caractéristique I-V mesurée. Puis, pour résoudre l'équation non linéaire de la caractéristique I-V nous utilisons la méthode Newton Raphson. Cette méthode est décrite comme :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \quad \text{(III-3)}$$

Où :

- $f'(I_n)$  : représente l'évaluation de la dérivée de la fonction objective  $f(I)=0$  ;
- $f(I_n)$  : représente l'évaluation de la fonction objective  $f(I)$  à la valeur actuelle  $I_n$  ;
- $I_{n+1}$  : représente la mise à jour de la solution actuelle  $I_n$ .

### III.4 Résultats et discussion

#### III.4.1 Optimisation des paramètres

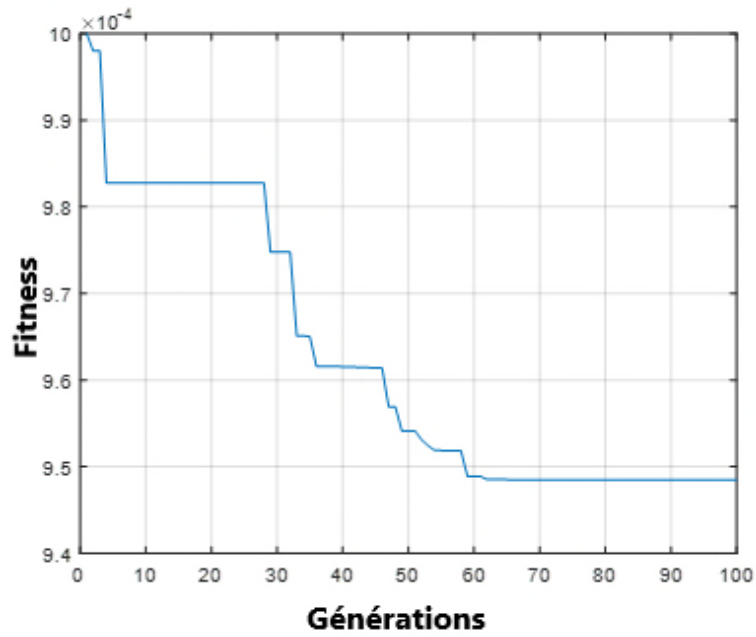
##### III.4. 1. 1 Modèle à une diode (Cinq paramètres)

Le tableau III-5 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec l'AG :

Paramètres	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ (A)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	n	MES (A)
Valeurs	3.2041	$3.0137 \times 10^{-6}$	0.3218	254.8157	1.5713	$9.4850 \times 10^{-4}$

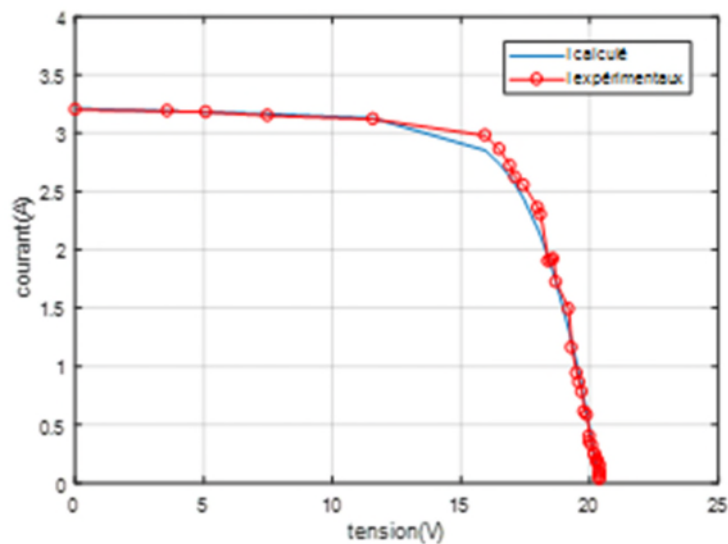
**Tableau III-5** : Valeurs des paramètres obtenues par les AGs pour le modèle à une diode.

L'évolution des valeurs minimales de la fitness des meilleurs individus de génération en génération est donnée sur la figure III-4. Nous constatons qu'à partir de la génération 62, la fitness devient stable et elle correspond à sa valeur minimale ( $9.4850 \times 10^{-4}$  A).



**Figure III-4 :** Evolution des valeurs minimales de la fitness en fonction de nombre de générations.

Les caractéristiques I-V et P-V calculées à partir de ces paramètres sont représentées respectivement, sur la figure **III-5** et figure **III-6** avec celles de l'expérimentales.



**Figure III-5 :** Caractéristique I-V expérimentale et celle calculée.

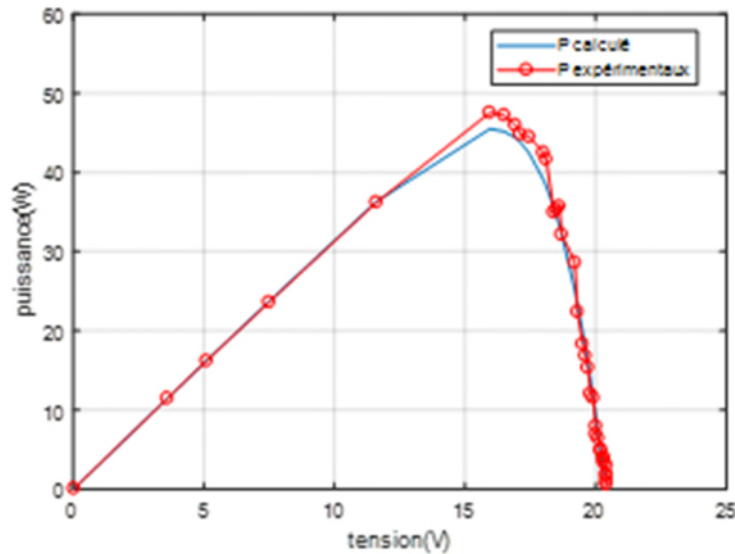


Figure III-6 : Caractéristique P-V expérimentale et celle calculée.

A partir des figures III-5, III-6, il est clair de constater que la distance entre la mesure réelle est étroitement rapprochée à celle calculé par le modèle à cinq paramètres .La seule différence est le faible décalage qui se situe au niveau de point de puissance maximale P<sub>pm</sub>.

L'erreur en pourcent (%) de la puissance maximale, calculée à partir des résultats de la figure III-6, en utilisant la relation (III-4), est de l'ordre de **4.31 %**. D'où nous pouvons dire que l'erreur est acceptable.

L'équation suivante donne l'erreur relative de la puissance maximale entre :

$$\Delta_{er} = \frac{|P_{cal} - P_{mes}|}{P_{mes}} \quad (III-4)$$

Avec :

**P<sub>cal</sub>** : Puissance calculée à partir des paramètres obtenus par l'AG.

**P<sub>mes</sub>** : Puissance mesurée à partir de l'expérimentale.

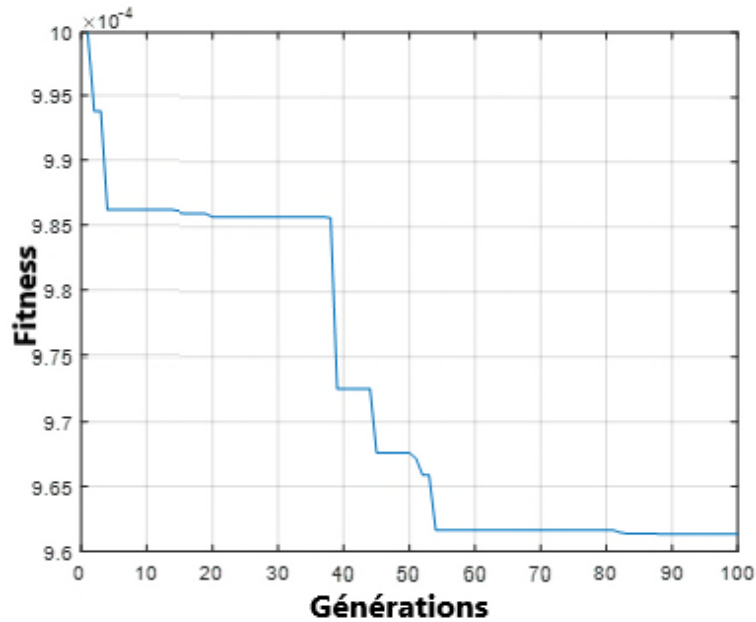
#### III.4. 1. 2 Modèle à deux diodes (Sept paramètres)

Les paramètres obtenus par les AGs pour le modèle à deux diodes sont présentés dans le tableau III-6.

Paramètre	$I_{ph}$ (A)	$I_{s1}$ (A)	$I_{s2}$ (A)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_p$ ( $\Omega$ )	n1	n2
Valeur	3.2051	$2.0772 \times 10^{-7}$	$9.9046 \times 10^{-9}$	0.3297	241.9416	1.2698	2.6833

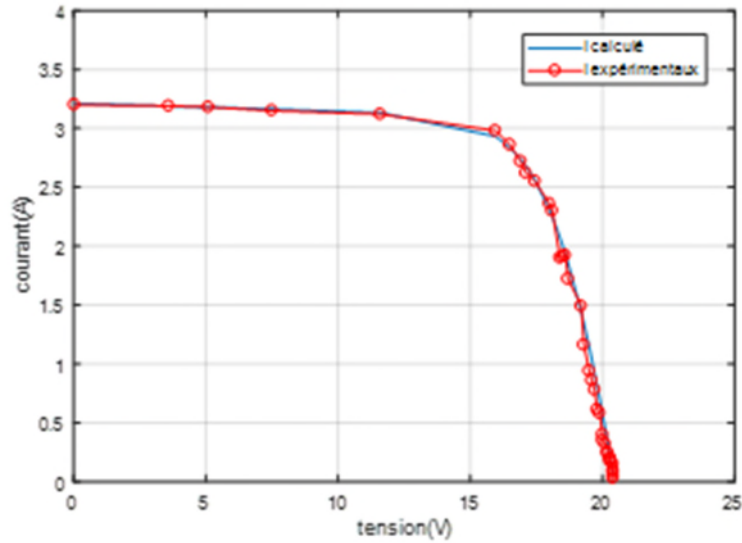
**Tableau III-6** : Valeurs des paramètres obtenues par les AGs pour le modèle à deux diodes.

La figure III-7 montre l'évolution de la fitness en fonction du nombre de génération. Nous remarquons que la fonction objective prend une valeur minimale et constante à partir de la génération 83. Cette valeur minimale est  $9.6135 \times 10^{-4}$  A.

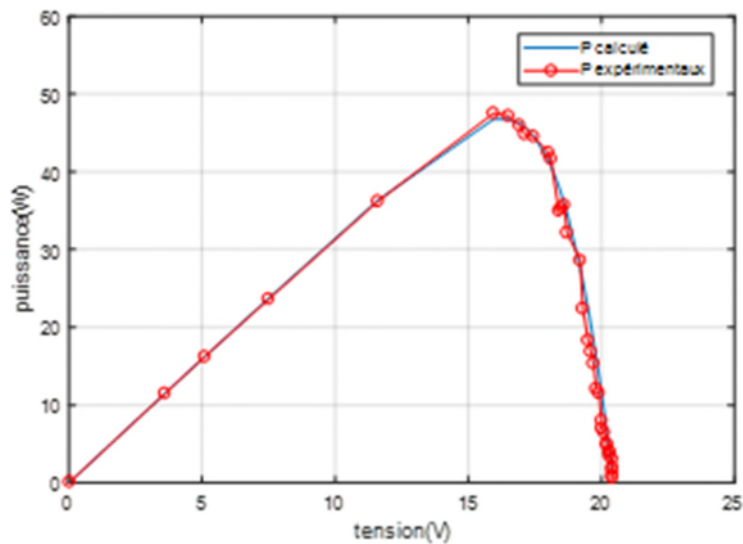


**Figure III-7** : Evolution des valeurs minimales de la fitness en fonction de nombre de générations.

Les figures III-8 et III-9 illustrent respectivement les courbes I-V et P-V calculées en fonction des paramètres obtenus par les AGs et celles de l'expérimentales.



**Figure 8 :** Caractéristique I – V expérimentale et celle calculée.



**Figure III-9 :** Caractéristique P – V expérimentale et celle calculée.

D'après ces représentations graphiques, nous remarquons que les caractéristiques calculées soit pour le courant ou de la puissance en fonction de la tension se coïncident avec celles de l'expérimentales. L'erreur commise sur la puissance maximale est de l'ordre de **1,59 %**. Donc, les paramètres obtenus pour ce modèle permettent d'avoir une caractéristique de très bon accord avec celle de l'expérimentale.

D'après la comparaison entre les deux modèles, on conclut que le modèle à deux diodes (sept paramètres) est le plus proche du comportement réel du module PV.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons décrit une méthode pour extraire les paramètres de la caractéristique (courant - tension) d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin. Nous avons pris comme modèles mathématiques, celui à une diode avec cinq paramètres et celui à deux diodes avec sept paramètres. Cette méthode est basée sur les algorithmes génétiques AGs implémentée sous l'environnement MATLAB nous a permet d'avoir de bons résultats.



## **Conclusion générale**

Dans le contexte énergétique et environnemental mondial actuel, l'objectif visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et les substances polluants, en exploitant les énergies renouvelables et en réduisant l'utilisation de combustibles fossiles.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables les plus utilisées, en vue de son abondance, sa disponibilité en tout point du globe terrestre de plus elle n'est pas polluante.

L'objectif de notre travail est la modélisation et l'optimisation des paramètres d'un panneau PV de type CEM100M-36.

La première partie de ce mémoire est destinée à donner un rappel sur les généralités du photovoltaïques plus précisément sur le principe des cellules PV, leurs différentes technologies ainsi que les paramètres caractérisant la cellule, ensuite nous avons décrit l'architecture des panneaux PV.

En deuxième partie, nous avons présenté les différents modèles électriques de la cellule existants dans la littérature et le principe de base des AGs.

Dans la dernière partie nous avons déterminé les paramètres électriques du modèle à une diode et le modèle à deux diodes du panneau PV, en utilisant la méthode des algorithmes génétiques. La comparaison des caractéristiques I-V et P-V calculées en fonction de ces paramètres pour les deux modèles et celles obtenues expérimentalement, nous a permis de déduire que :

- Les algorithmes génétiques ont la capacité de fournir de meilleurs résultats en extrayant les paramètres inconnus pour les deux modèles PV.
- Le modèle PV à double diodes, qui comporte sept paramètres, est le plus proche au comportement réel du panneau suscitée en comparaison avec le module à une seule diode.

## *Références bibliographiques*

- [1] « International Energy Agency ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.iea.org/>. [Consulté le : 01-juil-2020].
- [2] Histoire de photovoltaïque, [http://www.terresolaire.com/comprendre-le\\_solaire/photovoltaique/histoire-du-photovoltaique/page.htm](http://www.terresolaire.com/comprendre-le_solaire/photovoltaique/histoire-du-photovoltaique/page.htm), consulté le 01/08/2020.
- [3] Roshanak Radbeh « Réalisation et caractérisation des cellules solaires organiques à couches composites polymères incluant des nanotubes de carbones ».Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2008.
- [4] J.M.Roman, "State-of-the-art of II-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications", Advanced photovoltaic cell Dsign, 2004
- [5] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ».Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [6] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays ». IEEE Transaction on powr electronics, Vol.24, No 5, 1198-1208, May 2009.
- [7] Thibaut Desrues « Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [8] Rémi Bettignies « Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués ». Thèse de doctorat, Ecole Doctorale d'Angers ,2003.
- [9] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [10] BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA « Commande d'un système photovoltaïque d'un satellite ». Mémoire de Master. Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN, 2013
- [11] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [12] Henry. Mathieu, « Physique des semiconducteurs et des composants électroniques », 2<sup>ème</sup>Edition, Masson, France, 1990.

- [13] N. Kehoul et K. Khentache « Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2012.
- [14] A. Daoud « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire. ». Thèse de Doctorat. Université d'Oran 2013.
- [15] S. AOUIFI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Thèse de Magister. Université de Sétif 1 2014.
- [16] Souici Fatma-Zohra, "Modélisation d'une cellule solaire en couche mince à base de Cuivre Indium Sélénium(CuInSe<sub>2</sub>)", thème de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009,p2223.
- [17] BEZZIOU FATMA, "Etude par simulation numérique d'une cellule solaire à homojonction (GaAs) et à hétérojonction (Ga<sub>0.3</sub>Al<sub>0.7</sub>As/GaAs) par le logiciel TCADSILVACO », Thème De Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015, p 24
- [18] Théories photovoltaïque, [http:// www.energieplus-le site.be/energieplus/page .htm](http://www.energieplus-le-site.be/energieplus/page.htm), consulté le 14/08/2020.
- [19] Y. Sayade, " Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charges minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière", Thèse de Doctorat, INSA Lyon, 2009.
- [20] Huan-liang tsai Insolation-oriented model of photovoltaïque module using Matlab/Simulink.Solar Energy 84 (2010) 1318-1326.
- [21] Mme.BELAID « cours énergie solaire photovoltaïque UEF 31», Université Abdrrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [22] I.Kemmouche ; modèle de fonctionnement d'une station solaire PV en prévision de pannes ; Thèse de magistère.Constantine, 2002.
- [23] S. PETIBON ' Nouvell architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009
- [24] L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tiziouzzo, 2011.
- [25] Corinne Alonso, "Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie," Thèse Doctorat de l'Université de Paul Sabatier, Toulouse III, 2003.

- [26] A.LABOURET, M.VILLOZ, « Energie solaire photovoltaïque », 3ème édition DUNOD, Paris (France), 2006.
- [27] <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/photovoltaique-avantages.html>.  
Consulte le 01/07/2020
- [28] N.SAADA et A.OUAZAR « Méthodes d'identification des Panneaux photovoltaïques.». Thème De Master. Université de Béjaia, 2015.
- [29] G. Notton et al. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables.
- [30] A. Woyte, J. Nijs, and R. Belmans, "Partial shadowing of photovoltaic arrays with different system configurations : literature review and field test results," Sol. Energy, vol. 74, no. 3, pp. 217–233, 2003.
- [31] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in Proceedings of the world congress on Engineering and computer science, 2008, vol. 2008, pp. 1–6.
- [32] AkihKiro Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system," Thèse de Master de l'Université de California, Septembre 2005.
- [33] Bellala Djamel, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques," Thèse Doctorat de l'Université de Batna, 2009.
- [34] J.A. Gow and C.D. Manning « Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies ». IEE Proceedings on Electric Power Applications, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
- [35] Petibon Stéphane « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ». Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [36] D.E. Goldeberg, "Genetic Algorithms in search, Optimization and Machine learning", Addison-Wesley, 1989
- [37] J.H. Holland, "Adaptation in natural and artificial system. Ann Arbor", university of Michigan Press, 1975
- [38] C. Bontemps, "Principes Mathématique et Utilisations des Algorithmes Génétiques", 18 Novembre 1995 .

- [39] Khezzar Soumia. « Modélisation de cellule solaire par algorithmes génétique ». Mémoire de Magister université Hadj lakhdar Batna .2013
- [40] *L. Davis*, "Handbook of genetic algorithm", Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [41] T. Vallé et M. Yıldızoğlu, « Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie », Université de Nantes et Université Montesquieu Bordeaux IV 2001.
- [42] HADJI Slimane «Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque», Thèse Doctorat de l'Université de ferhat abbas sétif1,2018
- [43] Gen. M. and Cheng. R., « Genetic Algorithms and Engineering Design », John Wiley & Sons, 1997.
- [44] N. Benahmed, « Optimisation de réseaux de neurones pour la reconnaissance de chiffres manuscrits isolés: sélection et pondération des primitives par algorithme génétique », Université du Québec ,2002.
- [45] BARKA Nour-Eddine, «Amélioration des Performances de Contrôle D'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Métaheuristiques». Mémoire Master de l'Université de Université d'El-oued, 2013.
- [46] Toufic bendib . « Modélisation et simulation du transistor DGMOSFET en utilisation les algorithmes génétique ». mémoire magister université Hadj lakhdar Batna.2008.
- [47] J.L. Dessales, "L'ordinateur génétique", Paris Henrés,1996.
- [48] R.L.Haupt, S. E. Haupt, "Practical genetic algorithms" , 2<sup>ème</sup> édition, New jersey, 2004
- [49] D. Beasley, D. R. Bull, R. R. Matrin, "An overview of genetic algorithms. Part 2, Research Topics", University computing, Vol 15, N° 4, 1993, P. 170
- [50] K. K, Deb, « Multi-Objective Optimisation using Evolutionary Algorithms », Edited by John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- [51] Mr.BouABDALLAH AMARA. « Application des algorithmes génétique au dispartcling économique et environnemental ». mémoire Master université Mohamed Khider Biskra.2012.



