

UNIVERSITE DE BATNA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N° d'ordre :

N° de série:

MEMOIRE

Présenté par

M^{me}. KHEZZAR Soumia

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En Electronique

Option : Micro-électronique IC-Design

Thème

Modélisation de cellules solaires par algorithmes génétiques

Mémoire soutenue le : 04 /06/2013 Devant le jury composé de :

Mr. DJEFFAL	Fayçal	Professeur	Univ. BATNA	Président
Mr. DIBI	Zohir	Professeur	Univ. BATNA	Promoteur
Mr. MAHAMDI	Ramdane	Professeur	Univ. BATNA	Examineur
Mr. KERROUR	Fouad	Maître de conférences A	Univ. Constantine	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents

À mon Mari et mon bébé Imed eddine

À toute ma famille

Et à tous ceux que j'aime

Remerciements

Je souhaite remercier ici un certain nombre de personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail de Magister :

*Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, **Dibi Zohir**, professeur à l'Université de **Batna** de m'avoir initié aux activités de recherches, pour sa disponibilité, sa gentillesse et surtout sa confiance tout au long de ce travail.*

*J'exprime ma profonde et respectueuse gratitude à Monsieur **DJEFFAL Fayçal**, professeur à l'Université de **Batna** pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de soutenance.*

Je suis très reconnaissante à :

Monsieur **MAHAMDI Ramdane, professeur à l'Université de **Batna**.*

Monsieur, **KERROUR Fouad maitre de conférences à l'université de **Constantine**.*

De s'être intéressés à mon travail et de faire partie du jury. Qu'ils en soient vivement remerciés.

J'aimerais également exprimer ma gratitude à mon mari qui m'a aidé beaucoup pour réaliser ce mémoire.

Je remercie enfin tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

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

Chapitre I: Etat de l'art des cellules solaires

1. Introduction.....	4
2. Energie solaire.....	4
2.1. Nature du rayonnement solaire	4
2.2. L'absorption du rayonnement solaire	7
2.3. les différentes technologies solaires.....	8
3. Physique de la cellule photovoltaïque.....	10
3.1. L'interaction photon/semi-conducteur.....	11
3.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	12
3.3. Paramètres des cellules photovoltaïques.....	14
4. Les différents types de cellules solaires.....	15
4.1. Les matériaux photovoltaïques	16
4.2. Structure des cellules photovoltaïques.....	19
5. Association des cellules solaires	28
5.1. Association en série.....	28
5.2. Association en parallèle	28
5.3. Association hybride (en série et en parallèle).....	29
6. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	30
7. Conclusion	31

Chapitre II: Les algorithmes génétiques

1. Introduction.....	33
2. Algorithmes génétiques.....	33
3. Les étapes de l'algorithme génétique	34
3.1. Génération de la population initiale et codage.....	35
3.2. Evaluation : fitness.....	36
3.3. Reproduction.....	37
3.4. Insertion.....	40
3.5. Critère d'arrêt.....	41
4. Les paramètres d'un AG	41
4.1. La taille de la population.....	41
4.2. Le taux de croisement	41
4.3. Le taux de mutation.....	41
5. Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques	42
5.1. Avantage des AGs.....	42
5.2. Inconvénients des AGs.....	42
6. Conclusion.....	42

Chapitre III: Modélisation de cellules solaires

1. Introduction.....	44
2. Modélisation d'une cellule solaire	44
2.1. Modèle d'une cellule solaire idéale.....	44
2.2. Modèle d'une cellule solaire réelle	45
3. Influence des paramètres internes et externes sur les deux modèles	47
3.1. Influence des paramètres internes sur le modèle à une diode.....	47
3.2. Influence des paramètres internes sur le Modèle à deux diodes (DEM).....	49
3.3. Influence des paramètres externes sur les cellules photovoltaïques	52
4. Conclusion	53

Chapitre IV: Résultats et discussions

1. Introduction.....	55
2. Extraction des paramètres	55
2.1. Paramètres du modèle d'une cellule solaire à une diode	55
2.2. Paramètres du modèle d'une cellule solaire à deux diodes.....	57
3. Processus d'optimisation.....	57
3.1. Processus d'optimisation pour le modèle à une diode	57
3.2. Processus d'optimisation pour le modèle à deux diodes.....	57
4. Résultats d'optimisation par AG.....	59
4.1. Modèle à une diode	60
4.2. Modèle à deux diodes.....	63
5. Validation des résultats	64
5.1. Modèle à une diode	64
5.2. Modèle à deux diodes.....	68
6. Conclusion	70

Conclusion générale.....	71
---------------------------------	-----------

Bibliographie	71
---------------------	----

Liste des figures

Chapitre I : Caractérisation des cellules solaires

Fig.1.1: Trajet du rayonnement solaire dans l'atmosphère.....	5
Fig.1.2: Composantes du rayonnement solaire.....	5
Fig.1.3: Schéma indiquant le nombre de masse d'air en fonction de la position géographique.....	6
Fig.1.4: Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5.....	7
Fig.1.5: Deux exemples de modules à concentration thermodynamique.....	8
Fig.1.6: Deux exemples de modules thermiques.....	9
Fig.1.7: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....	9
Fig.1.8: Composition d'un panneau solaire thermique.....	10
Fig.1.9: Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur.....	12
Fig.1.10: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque.....	14
Fig.1.11: Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.....	14
Fig.1.12: Une cellule photovoltaïque monocristalline.....	16
Fig.1.13: Une cellule photovoltaïque poly-cristalline.....	17
Fig.1.14: Cellule photovoltaïque amorphe.....	18
Fig.1.15: Cellule solaire tout organique sur substrat souple.....	19
Fig.1.16: Composition d'une cellule photovoltaïque.....	20
Fig.1.17: Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%).....	22
Fig.1.18: Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin.....	23
Fig.1.19: Architecture d'une cellule solaire Multi-jonction.....	25
Fig.1.20: Structure d'une cellule hétérojonction.....	25
Fig.1.21: Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF.....	26
Fig.1.22: Cellule solaire de type Schottky.....	26
Fig.1.23: Cellule solaire de type structure MIS.....	27
Fig.1.24: Caractéristique résultante d'un groupement de NS cellules en série.....	28
Fig.1.25: Caractéristique résultante d'un groupement de NP cellules en parallèle.....	29
Fig.1.26: Caractéristique résultante d'un groupement de (NS + NP) cellules identique.....	29
Fig.1.26: Caractéristique résultante d'un groupement de (NS + NP) cellules identique.....	29
Fig.1.27: Association hybride des cellules.....	30

Chapitre II: Les algorithmes génétiques

Fig. 2.1: Le vocabulaire des algorithmes génétiques.....	34
Fig. 2.2: Fonctionnement général de l'algorithme génétique.....	35
Fig.2.3 : Schéma d'une roulette.....	37
Fig. 2.4: Le tournoi entre deux individus avec rééligibilité.....	38
Fig.2.5 : Croisement en 1-point de deux chromosomes.....	38
Fig.2.6 : Croisement en 2-points de deux chromosomes.....	39
Fig.2.7 : Croisement uniforme.....	39
Fig.2.8 : Mutation : opérateur d'insertion.....	40

Chapitre III: Modélisation de cellules solaires

Fig. 3.1: Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque.....	44
Fig.3.2: Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.....	45
Fig.3.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.....	46
Fig.3.4: Influence de I_{ph} sur le Modèle à une diode.....	47
Fig.3.5: Influence de R_s sur le modèle à une diode.....	48
Fig3.6: Influence de R_{sh} sur le modèle à une diode.....	48
Fig.3.7: Influence de I_{01} sur le rendement et sur V_{co}	49
Fig. 3.8: Influence de n sur le rendement et sur V_{co}	49
Fig.3.9: Influence de I_{01} sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM.....	49
Fig.3.10: Influence de I_{02} sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM.....	50
Fig.3.11: Influence de n sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM.....	50
Fig.3.11: Influence de R_s sur le modèle à deux diodes.....	51
Fig.3.12: Influence de R_{sh} sur le modèle à deux diodes.....	51
Fig.3.13: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I (V).....	52
Fig.3.14: Influence de la température sur la caractéristique I (V).....	53

Chapitre IV: Résultats et discussions

Fig.4.1 : Processus d'optimisation avec AG.....	58
Fig. 4.2: Test AG N°1(critère d'arrêt = 0.0020).....	60
Fig. 4.3: Test AG N° 2(critère d'arrêt = 0.0017).....	61
Fig. 4.4: Test AG N°3(critère d'arrêt = 0.0014).....	61
Fig.4.5: Test AG N°4 (critère d'arrêt = 0.0011).....	62
Fig.4.6: Test AG N°5 (critère d'arrêt = 0.0011).....	62
Fig.4.7: Optimisation par AG (critère d'arrêt = 0.0011) (modèle à deux diodes).....	64
Fig.4.8: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux -Test N°1.....	65
Fig.4.9: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux -Test N°2.....	66
Fig.4.10: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux -Test N°3.....	66
Fig.4.11: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux -Test N° 4.....	66
Fig.4.12: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux -Test N° 5.....	67
Fig.4.13: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux -pour un modèle à deux diodes.....	69

Liste des tableaux

Chapitre IV: Résultats et discussions

Tableau 4.1 : Configuration de la boîte à outils AG de MATLAB (à une diode).....	59
Tableau 4.2 : Configuration de la boîte à outils AG de MATLAB (à deux diodes).....	59
Tableau 4.3 : Résultats du processus d'optimisation pour le modèle à une diode.....	60
Tableau 4.4 : Résultat de processus d'optimisation pour le modèle à deux diodes.....	63
Tableau 4.5 : Erreur individuelle absolue entre les valeurs du courant expérimentales et celles des tests 1, 2, 3, 4 et 5 (Pour Cellule solaire à une diode).....	68
Tableau 4.6 : Erreur individuelle absolue entre les valeurs du courant expérimentales et celles obtenus par AG (Pour Cellule solaire à deux diodes).....	70

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle du 18^{ème} siècle, la consommation mondiale d'énergie n'a cessé de croître exponentiellement en parallèle avec le développement des technologies. Actuellement, sa production provient majoritairement des ressources fossiles (charbon et pétrole). Depuis le début des années 1970, et surtout après les crises successives du pétrole avec un prix du baril qui a été multiplié par trois, les efforts ont été augmentés pour développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La fission nucléaire a d'abord été identifiée puis fortement sponsorisée comme une source d'énergie alternative. Cependant, l'accident de 1979 aux Etats-Unis puis la catastrophe de Tchernobyl en Ukraine, ont montré les risques courus à grande échelle et à long terme par l'humanité. Il s'en est suivi un intérêt majeur pour le développement de sources d'énergies renouvelables non polluantes et sans risques majeurs.

De nombreuses formes d'énergies renouvelables, se sont développées ces dernières années. Parmi eux, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.... Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m². La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de carbone, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire.

Donc l'électricité photovoltaïque est obtenue par la transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules photovoltaïques.

Le fonctionnement de ces composants à semi-conducteurs est décrit généralement par un ensemble de caractéristiques courant-tension (I-V) dont l'analyse permet d'obtenir des informations sur les mécanismes de transport électriques.

La détermination des paramètres fondamentaux de la diode P_N, le facteur d'idéalité, la résistance série et la résistance shunt joue un rôle important dans la conception et la fabrication de ces cellules.

Notre travail consiste à extraire par une des méthodes évolutionnaires ces paramètres modélisant les données expérimentales en utilisant les algorithmes génétiques (AG) qui connaissent actuellement un essor considérable dans le domaine de résolution des problèmes complexes d'optimisation, grâce à leur universalité, fiabilité et robustesse.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres suivi d'une conclusion générale. Le premier chapitre se focalise sur un rappel et une description générale des systèmes photovoltaïques.

Le but fixé dans le deuxième chapitre est la description et l'évolution du processus d'optimisation par les algorithmes génétiques.

Au troisième chapitre, nous nous sommes intéressés aux problèmes de modélisation des cellules solaires. La modélisation a pour but d'établir un modèle mathématique de cellule solaire afin de pouvoir appliquer la technique d'optimisation.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation de résultats de simulation, en se basant sur des valeurs expérimentales. Ces résultats permettent d'illustrer les valeurs adéquates des paramètres du modèle mathématique étudié.

En fin, une conclusion générale couronnant les travaux effectués et incluant les perspectives envisagées dans le futur.

Chapitre I

Etat de l'art des cellules solaires

1. Introduction

La production des énergies reste toujours un des soucis de l'Homme. L'énergie photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables très prometteuse pour avoir un monde propre et non pollué. Elle présente l'intérêt de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique et exploiter tout les spectres lumineux. Plusieurs matériaux à caractère semi-conducteur sont utilisés dans cette conversion. Pour cela, ce premier chapitre est consacré entièrement à un exposé sur les caractérisations des cellules solaires.

2. Energie solaire

2.1. Nature du rayonnement solaire

Le soleil est une source d'énergie naturelle, gratuite et non polluante. L'énergie solaire grâce à ces multiples usages tend à être l'une des ressources énergétiques majeures du 3ème millénaire, avec un grand gisement solaire qui équivaut à 10000 fois la consommation énergétique de l'humanité entière .

Le soleil est un corps chaud constitué principalement de gaz, dont la fusion continue produit une quantité d'énergie phénoménale. Dans chaque seconde 6.10^{11} (Kg) d'hydrogène est convertie en hélium, avec une perte de masse de 4.10^3 (Kg), convertie par la relation d'Einstein ($E= mc^2$) à 4.10^{20} (J). Cette énergie se traduit par l'émission d'un rayonnement composé de longueurs d'ondes majoritairement comprises entre $0.2 \mu\text{m}$ et $3 \mu\text{m}$. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit [1]:

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$).
- 47 % dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$).

A la limite de l'atmosphère terrestre, l'éclairement énergétique reçu par une surface placée perpendiculairement aux rayons solaires est en moyenne de $1367\text{W}/\text{m}^2$ à l'extérieur de l'atmosphère terrestre, et arrive à $\sim 1200 \text{W}/\text{m}^2$ sur la surface de la terre. Cette donnée est appelée constante solaire. [2]

2.1.1. Atténuation du rayonnement solaire

Après la réflexion sur les couches atmosphériques supérieures et les nuages, et lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit plusieurs atténuations que l'on peut classer en deux types [3] [4]:

- Atténuation par absorption, due à l'oxygène O_2 , l'ozone O_3 , le gaz carbonique CO_2 , le vapeur H_2O , etc. Le rayonnement absorbé est transformé en chaleur.

- Atténuation par diffusion, due à la dispersion du rayonnement par les gouttes d'eau, les molécules, les aérosols, etc. Le rayonnement diffusé est rayonné dans l'espace pour être à nouveau diffusé vers le ciel, absorbé ou transmis.

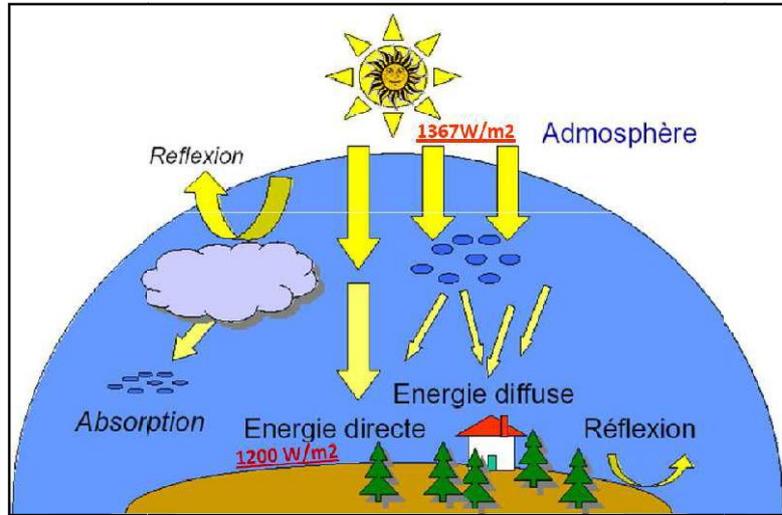


Fig.1.1 Trajet du rayonnement solaire dans l'atmosphère [5].

Le rayonnement reçu au sol se décompose en [6 ; 7]:

- Le rayonnement direct: reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.
- Rayonnement diffus : ce rayonnement provient, de manière anisotrope, de toutes les directions de l'espace et du sol.

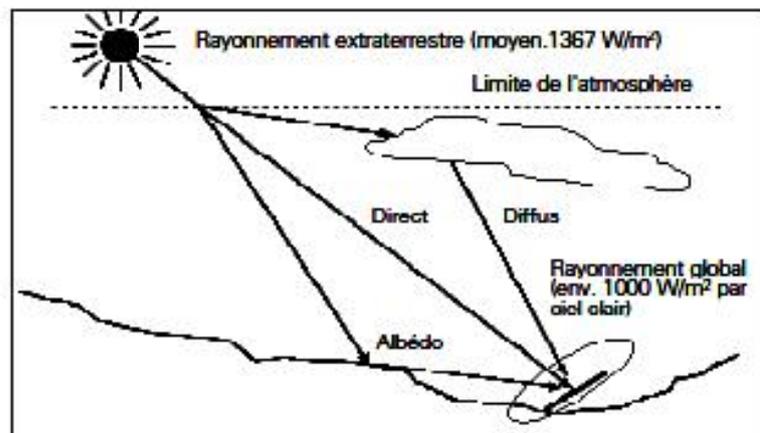


Fig. 1.2 : Composantes du rayonnement solaire [6].

L'albédo est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

La somme du rayonnement (direct + diffus + albédo) qui atteint une surface placée sur la terre s'appelle le rayonnement global.

2.1.2. Trajet optique (ou Masse d'Air) [8,9]

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Le spectre solaire diffère donc entre l'espace et la surface du globe, il diffère également à la surface de la terre en fonction du lieu et de l'heure. On le caractérise d'une façon globale par un coefficient Air Mass, AM ($1/\cos h$) où h correspond à l'angle entre la verticale et le rayonnement solaire (Fig. 1.3).

Ce qui donne ainsi les définitions des conditions AM0, AM1 et AM1.5G comme suit :

- ❖ **Le spectre solaire AM0:** correspond à une masse d'air nulle pour un éclairement solaire au-delà de l'atmosphère à incidence normale (Hors atmosphère). Adapté aux applications spatiales où $P \approx 1367 \text{ W.m}^{-2}$
- ❖ **Le spectre solaire AM1:** Le soleil est au zénith du lieu d'observation (à l'équateur). Il est plus pauvre en UV.
- ❖ **AM1.5G :** G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G donne une irradiance de 970 W/m^2 , mais a été arrondi à 1 kW/m^2 .

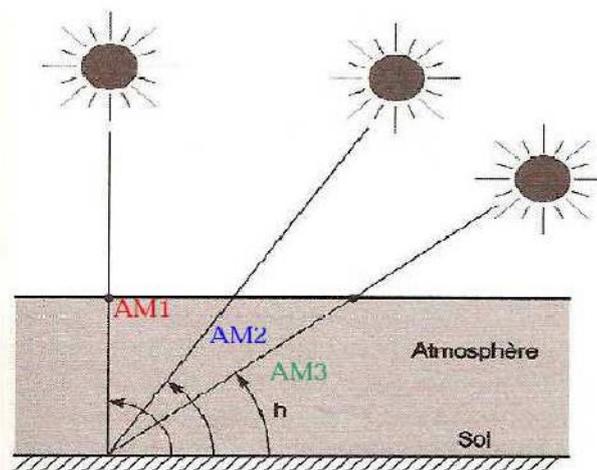


Fig.1.3: Schéma indiquant le nombre de masse d'air en fonction de la position géographique [5].

L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule [10]

$$I_D = 1.353. (0.7^{AM})^{0.678} \quad (1.1)$$

Avec I_D en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure 1.4.

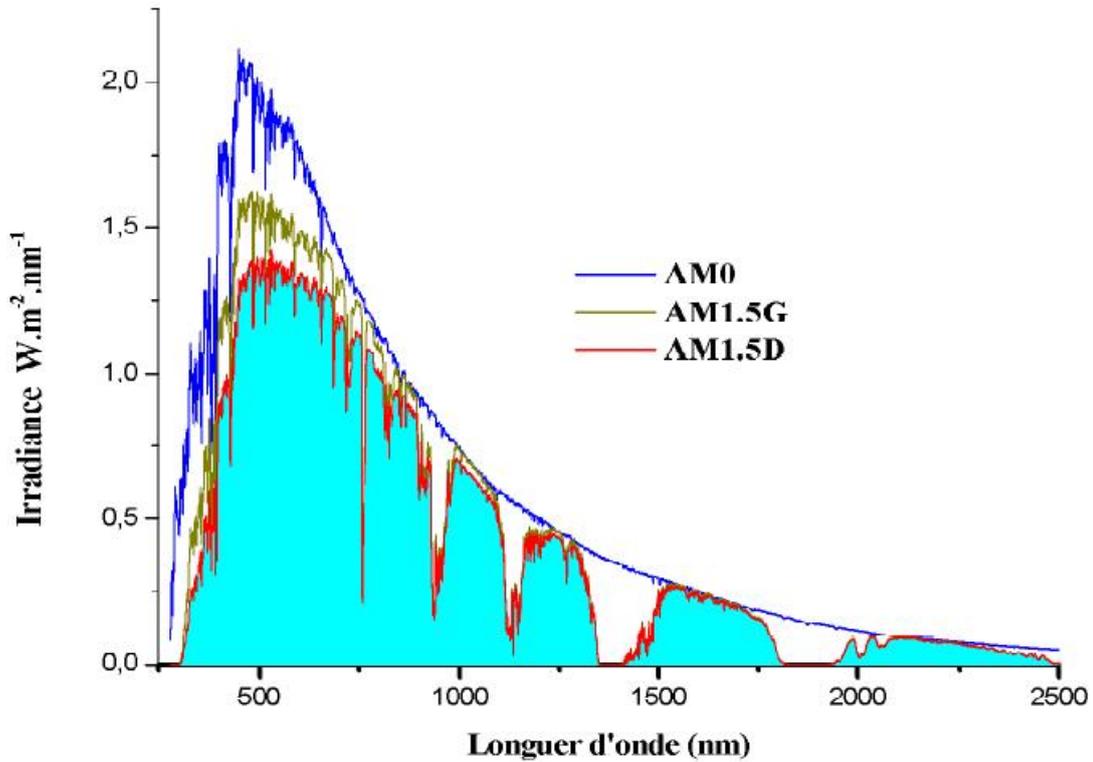


Fig. 1.4 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 [10].

2.2. L'absorption du rayonnement solaire

La lumière peut être considérée sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde λ ou sous forme de photons, corpuscules possédant une énergie E liée à λ par la relation (1.2) [11]

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.2)$$

Où : h : Constante de Planck (J.s) ;

c : Vitesse de la lumière dans le vide ($m.s^{-1}$) ;

ν : Fréquence (s^{-1}) ;

λ : Longueur d'onde (m).

L'absorption d'un rayonnement dans un matériau s'explique en effet simplement par l'échange d'énergie entre les atomes du matériau et les corpuscules de la lumière. Le coefficient d'absorption α (en m^{-1}) dépend de la longueur d'onde des photons incidents, ainsi que du coefficient d'extinction k , selon la relation 1.3

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (1.3)$$

En général les faibles longueurs d'ondes (très énergétiques) sont donc plus facilement absorbées. Cependant, le coefficient d'extinction d'un matériau varie également avec la longueur d'onde. Le phénomène d'absorption est décrit par la loi de Beer-Lambert selon la relation (1.4). [12]

$$I = I_0 \exp(\alpha x) \quad (1.4)$$

Avec

I_0 : Intensité lumineuse incidente ;

I : Intensité lumineuse transmise ;

x : Longueur du trajet optique (m).

2.3 Les différentes technologies solaires

Il existe principalement trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire : la thermodynamique, la thermique et le photovoltaïque.

2.3.1 Technologies solaire à concentration thermodynamique [13]

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit.

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) forment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage.



Capteurs thermodynamique cylindro-paraboliques



Capteurs thermodynamique paraboliques

Fig. 1.5 : Deux exemples de modules à concentration thermodynamique [13].

2.3.2 Technologies solaire thermique [14,15]

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil (fig1.6) Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire. Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).



Fig. 1.6 : Deux exemples de modules thermiques.

Le principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique est montré par la figure 1.7. Pour commencer, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente ; le rayon lumineux sera alors absorbé après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

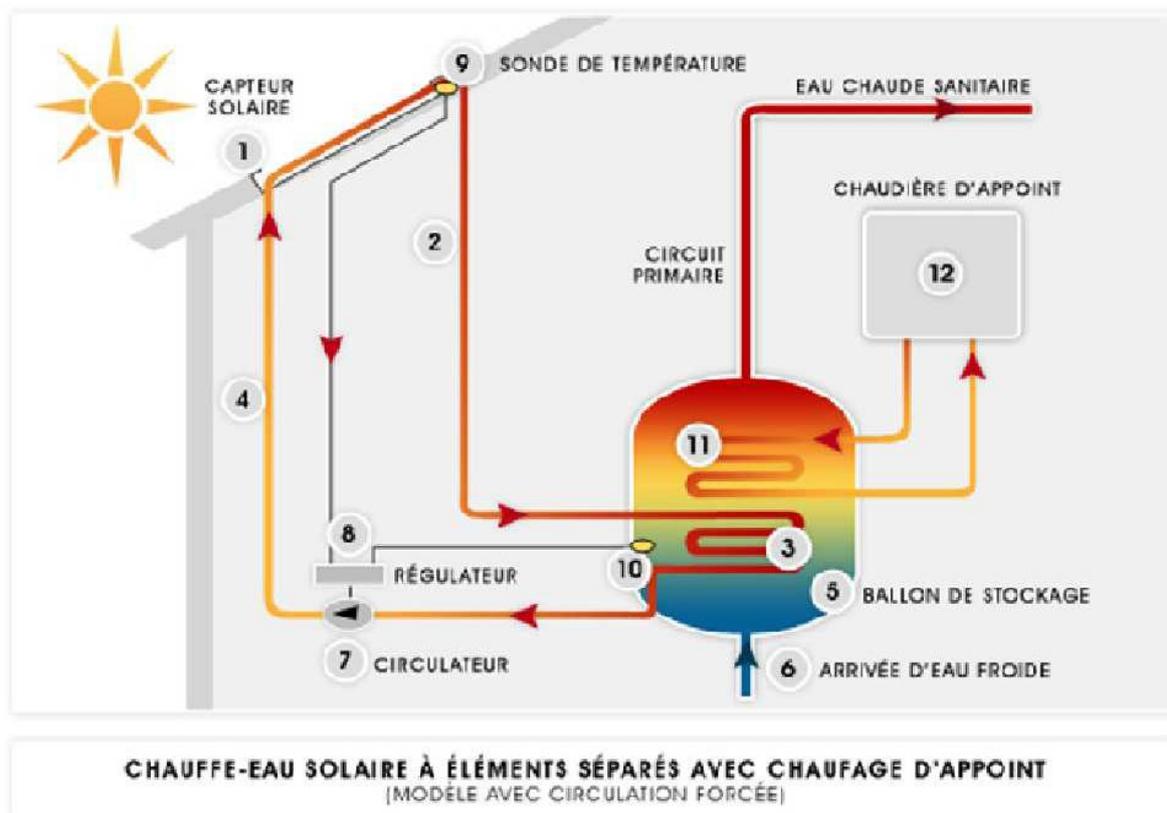


Fig.1.7: Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

La composition d'un panneau solaire thermique est montrée dans la figure 1.8. Il est composé d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant ; un système de refroidissement par le fluide caloporteur; un isolant thermique situé sur les faces non exposées au rayonnement et une couverture transparente sur la face exposée, destinée à assurer l'effet de serre à l'intérieur du capteur.

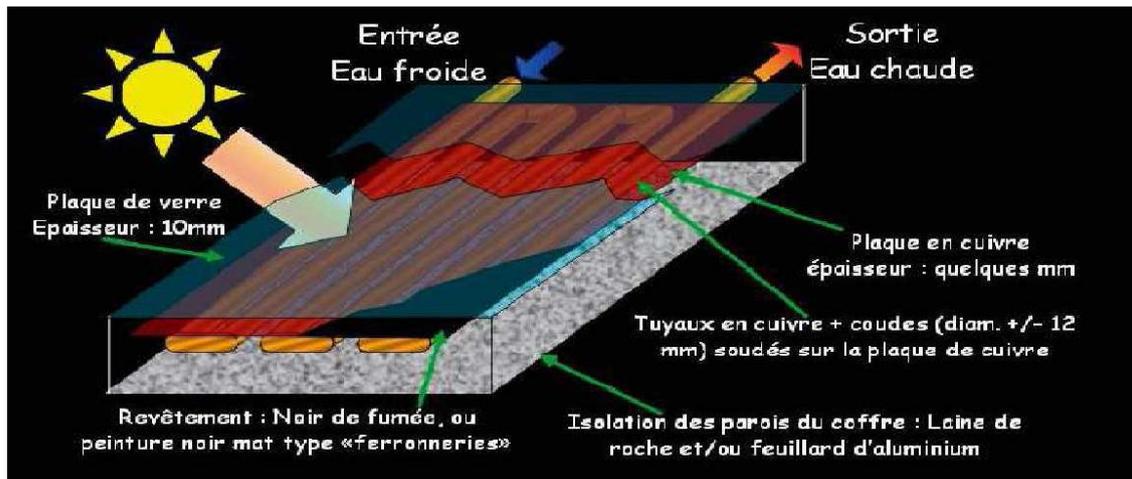


Fig.1.8: Composition d'un panneau solaire thermique.

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou de l'eau sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique.

2.3.3 Technologies solaire Photovoltaïque [16]

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur, l'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la Terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit sans pollution et sans combustible. L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

3. Physique de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque provient de la conversion du rayonnement du soleil en énergie électrique. Cette conversion est effectuée par l'intermédiaire des composants électroniques à base des matériaux semi-conducteurs; dit des cellules solaires ou des cellules photovoltaïques.

Une cellule photovoltaïque peut être définie comme un dispositif qui génère des charges positives et négatives par absorption d'énergie lumineuse. Ce dispositif autorise le transport en son sein (généralement par diffusion) des charges photo générées jusqu'à une

région où existe une barrière de potentiel. Dans cette région, les charges positives et négatives sont séparées par l'action du champ électrique interne. Enfin, le dispositif présente une structure de collecte des charges une fois séparées, pour les conduire à un circuit externe où elles seront utilisées.

3.1. L'interaction photon/semi-conducteur

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué à l'usage de certains matériaux semi-conducteurs qui permettent la réduction de recombinaisons des charges. En effet dans un métal, toutes les longueurs d'onde sont susceptibles d'être absorbées. Cependant, les paires électron-trou générées se recombinent quasi-instantanément (10^{-12} à 10^{-13} s), ce qui ne laisse pas la possibilité de les exploiter et peuvent difficilement être collectées.

On parle de matériau semi-conducteur lorsqu'un matériau possède effectivement une bande interdite (empêchant donc une partie de la lumière d'être absorbée) mais qu'elle est comprise entre 0,6 et 3eV. Le matériau est alors capable d'absorber des photons de longueurs d'onde bien supérieures à 250 nm (exemple du silicium, capable d'absorber des photons jusqu'à 1100 nm avec une bande interdite de 1,12eV). Une grande partie du rayonnement solaire peut être alors absorbée et des paires électrons-trous créées dans le matériau.

L'écart entre les bandes de valence et de conduction, ou gap, représente une caractéristique fondamentale des semi-conducteurs. La figure 1.9 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des k, il s'agit d'un gap direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives (fig.1.9 (a)). Ceci illustre le fonctionnement des semi-conducteurs binaires III-V, tels que le GaAs, beaucoup utilisés en optoélectronique.

Dans le cas du silicium cristallin (c-Si) les photons très énergétiques ($E \geq 1.8\text{eV}$) voient un gap direct. Pour des énergies plus faibles, le gap est indirect car les transitions radiatives entre les extrema des bandes ne peuvent se faire qu'avec la participation d'un phonon (fig.1.9 (b)). Les phonons sont des vibrations du réseau apportant ou absorbant la quantité de mouvement nécessaire. Les transitions faisant appel aux phonons (gap indirect) sont donc moins probables que dans le cas d'un gap direct.

L'effet photoélectrique est donc plus ou moins important en fonction du matériau semi-conducteur utilisé. De plus, pour extraire véritablement l'énergie transmise du rayonnement à la matière, un dispositif de collecte des charges photo générées est nécessaire.

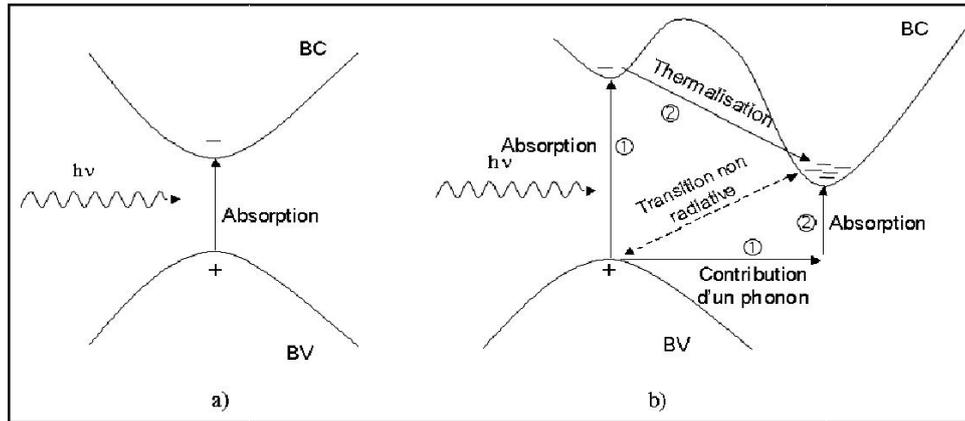


Fig.1.9 Transitions inter-bandes d'électrons dans un semi-conducteur. Le cas a) correspond à un semi-conducteur à gap direct, le cas b) à un gap indirect [17].

3.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants [18]:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

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 / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction p-n. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Alors le fonctionnement d'une cellule solaire est similaire à celle d'une jonction P-N. Le courant dans une telle structure de ce type est appelé courant d'obscurité et il a la forme suivante :

$$I_{\text{obs}} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (1.5)$$

Avec

q : la charge élémentaire ($q = 1.6.10^{-19}$ C),

V : la tension aux bornes de la jonction (V),

k : la constante de Boltzmann ($k = 1.38.10^{-23}$ J.K⁻¹),

T : la température (K).

- Le facteur I_s , appelé courant inverse de la jonction P-N, a deux composantes :
 - le courant de diffusion des porteurs minoritaires, constitué par les électrons de la région P et les trous de la région N qui parviennent à atteindre la zone de charge d'espace par diffusion,
 - le courant de génération thermique dû aux paires électrons-trous créées thermiquement dans la zone de charge d'espace.
- Le facteur n , compris entre 1 et 2, représente le coefficient d'idéalité de la jonction P-N. Il permet de tenir compte des différentes composantes du courant direct circulant dans la jonction :
 - les composantes dues aux recombinaisons dans les régions N et P constituent les courants de diffusion des électrons et des trous ($n= 1$).
 - la composante due aux recombinaisons dans la zone de charge d'espace constitue le courant de recombinaison de la jonction ($n = 2$).

Sous éclairement, les paires électrons-trous photo-générées dans la zone de charge d'espace (ZCE) sont instantanément séparées par le champ électrique y régnant (Fig.1.10). Les trous, charges positives, se voient accélérés vers la zone P, les électrons, charges négatives, vers la zone N. Trous et électrons deviennent alors majoritaires : c'est le photo-courant de génération. Parallèlement, les porteurs minoritaires, trous générés côté N et électrons générés côté P, créent un gradient de concentration et diffusent dans le matériau. S'ils atteignent la ZCE sans se recombiner, le champ électrique leur fait traverser la zone déplétif afin d'atteindre la région où ils deviennent majoritaires : c'est le photo-courant de diffusion.

La présence de contacts ohmiques assure la collecte des porteurs d'où la création d'un courant photo-généré I_{ph} , somme des deux contributions précédentes, et qui participe au courant total selon la relation :

$$I = I_{obs} - I_{ph} = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (1.6)$$

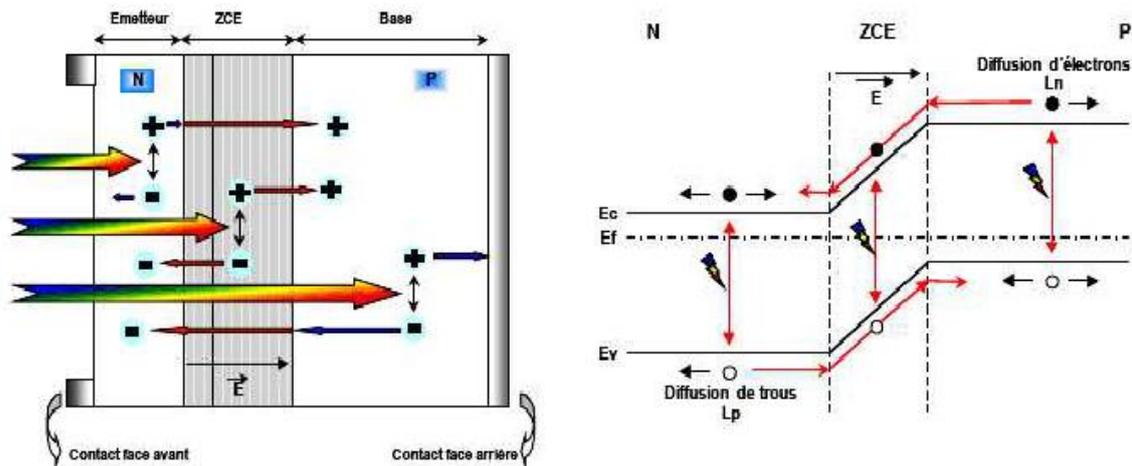


Fig.1.10: Structure (image gauche) et diagramme de bande (image droite) d'une cellule photovoltaïque [12].

3.3. Paramètre des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{oc} , f_f et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques (Fig.1.11)

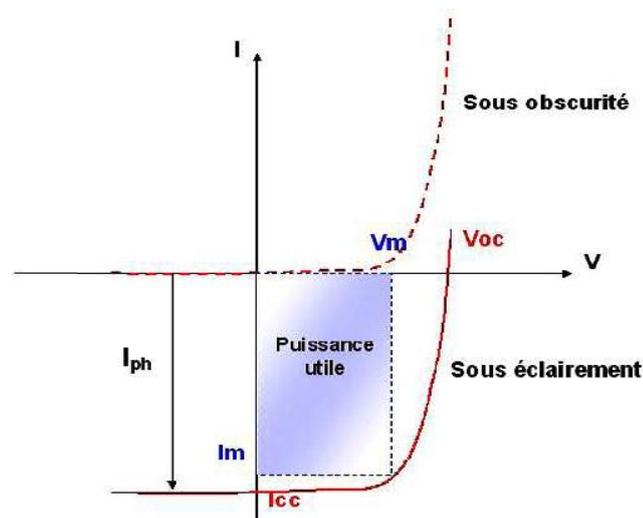


Fig. 1.11 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.

3.3.1. Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

3.3.2 Tension à circuit ouvert, V_{oc}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

3.3.3 Facteur de forme, ff

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_m (I_m, V_m) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{cc} et tension comprise entre 0 et V_{oc}) (Fig.1.11). Ce point P_m est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes O_x, O_y et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum.

Le nom "facteur de forme" (*fill factor*) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (1.7)$$

Il est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} défini en (fig.1.11) sur celle du rectangle dont les côtés mesurent V_{oc} et I_{cc} . Plus ce paramètre est élevé, meilleure est l'efficacité de conversion. En dehors de ce point de fonctionnement P_m particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à V_m et des pertes par chauffage (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > I_m$.

Le rendement, η (*efficiency*) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{ff \times I_{cc} \times V_{oc}}{P_{in}} \quad (1.8)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

4. Les différents types de cellules solaires [19]

Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures

photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et recombinaison (amélioration de qualité cristalline).

Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu ces dernières années plusieurs variantes soit au niveau des matériaux photovoltaïque utilisés soit au niveau des structures solaires, et cela grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique.

4.1 Les matériaux photovoltaïques

4.1.1. La filière silicium

La première filière, celle de la filière historique autour du silicium cristallin, existe depuis plusieurs dizaines d'années. Elle est de loin la plus mature et offre le meilleur rendement pour un coût modéré. Dans cette filière, on distingue deux types principaux des cellules solaires:

a. Filière des cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin

La filière du silicium monocristallin qui regroupe les cellules produites à partir de silicium tiré puis découpé en plaquette circulaire très fine (épaisseur de 200 à 350 μm , pour une surface allant de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ à $15 \times 15 \text{ cm}^2$). Généralement elle est destinée essentiellement pour les applications spatiales et militaires ainsi pour les réseaux de télécommunication...etc, où l'on recherche le rendement et la très haute fiabilité.



Fig. 1.12: Une cellule photovoltaïque monocristalline [20].

b. Filière des cellules photovoltaïques à base de silicium polycristallin

Les cellules sont réalisées à partir des déchets de l'industrie électronique sous forme de lingots carrés refroidis axialement découpés en plaquettes minces et débarrassés de leurs défauts recombinants par diffusion de phosphore ou d'aluminium.

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de

productivité, se sont aujourd'hui imposées. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée: 30 ans.



Fig. 1.13: Une cellule photovoltaïque poly-cristalline [20].

4.1.2. Filière des cellules photovoltaïques aux couches minces

Cette génération de cellule repose sur la déposition de matériaux semi-conducteurs en couches minces (*thin film*). Ces matériaux sont déposés par des procédés tels que PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) sur un substrat. L'épaisseur de la couche varie entre quelques nanomètres à des dizaines de micromètres. Ces technologies qui étaient initialement chères étaient réservées aux applications spatiales. Avec l'augmentation des volumes de production, le prix de revient de ces technologies a baissé pour devenir compétitif avec les technologies cristallines de la première génération. Parmi les technologies en couches minces qui sont exploitées industriellement (production de masse). Dans le domaine des couches minces, Il existe :

a. Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe et nano cristallin [21]

Dans cette technologie, le semi-conducteur est économisé car il n'est pas comme les cellules au silicium cristallin. La fabrication de ces cellules devrait permettre dans l'avenir de réduire significativement les coûts de production des cellules PV. Le silicium amorphe, apparu en 1976, a une forme non cristalline. Sa structure atomique est désordonnée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin [22], ce qui donne à une cellule photovoltaïque en silicium amorphe une couleur grise ou marron très foncée.

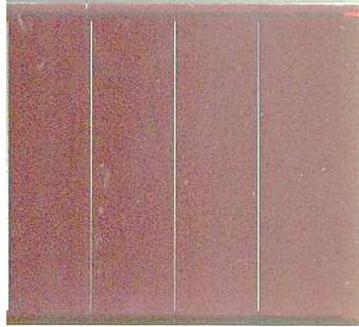


Fig.1. 14: Cellule photovoltaïque amorphe.

b. Les filières non silicium [23]

Les recherches actuelles sur les matériaux PV portent également sur d'autres matériaux que le silicium, mieux adaptés à une utilisation en couches minces et délivrant de hauts rendements à des coûts relativement bas. Deux filières semblent s'imposer progressivement, l'une basée sur le tellure de cadmium (notée CdTe) et l'autre sur les alliages Cuivre-indium/gallium-Sélénium (noté CIGS).

La technologie CIGS exhibe actuellement le meilleur rendement de production pour une cellule et pour des modules par rapport à toutes les technologies couches minces inorganiques avec des cellules pouvant atteindre 19.9% en laboratoire et des modules commerciaux de 12%. Cependant, il reste un grand nombre de points à améliorer afin de réduire le prix de ces cellules. Le principal challenge de la technologie CIGS couche mince est la réduction du prix des matériaux. Diverses pistes existent pour essayer de remplacer les matériaux chers comme l'InGa par de l'Al. De plus, il est nécessaire également de trouver des solutions pour moins gaspiller la matière première active pendant la fabrication. Une dernière piste consiste à réduire tout simplement l'épaisseur de la couche active.

La simplicité chimique du matériau à base de tellure de cadmium - (CdTe) et sa stabilité en font un matériau attractif. Ses propriétés thermo-physiques et ses caractéristiques chimiques permettent de fabriquer des cellules simplement et à faible coût. Le rendement des cellules en CdTe dépend fortement de la manière dont les couches actives sont déposées (température de dépôt, vitesse et nature du substrat). Comparé aux autres technologies couche mince, le CdTe est plus facile à déposer et donc plus approprié à la production de module PV de surface importante. L'inconvénient majeur actuel repose sur la toxicité reconnue du Cadmium.

4.1.3. Les cellules organiques [24]

Comme leurs noms les indiquent, les cellules organiques ; autrement dit, les cellules plastiques, sont composées de semi-conducteurs organiques. Ce type de cellules est apparu dans les années 90. Initialement donnant des valeurs très faibles de rendement de

conversion, cette application particulière des semi-conducteurs organiques commence à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang montre que les rendements proches du pourcent sont atteignables, conformément aux prédictions de Merritt en 1978. La cellule, composée alors d'une bicouche de molécules évaporées sous vide, atteint 0,95% de rendement de conversion. Ces cellules comprennent deux voies : la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).

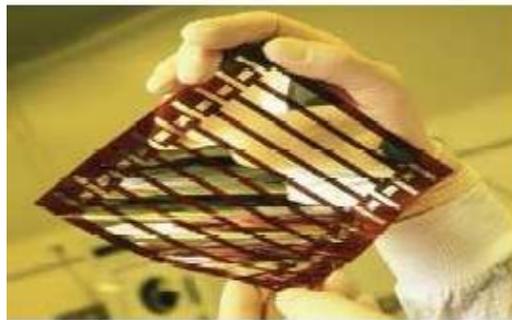


Fig. 1.15 : Cellule solaire tout organique sur substrat souple [25].

4.2. Structure des cellules photovoltaïques

Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et la recombinaison (amélioration de la qualité cristalline). Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu plusieurs variantes au niveau des structures solaires ces dernières années grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique.

4.2.1. Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

Les différentes régions de la cellule standard industrielle sont représentées sur la figure 1.16.

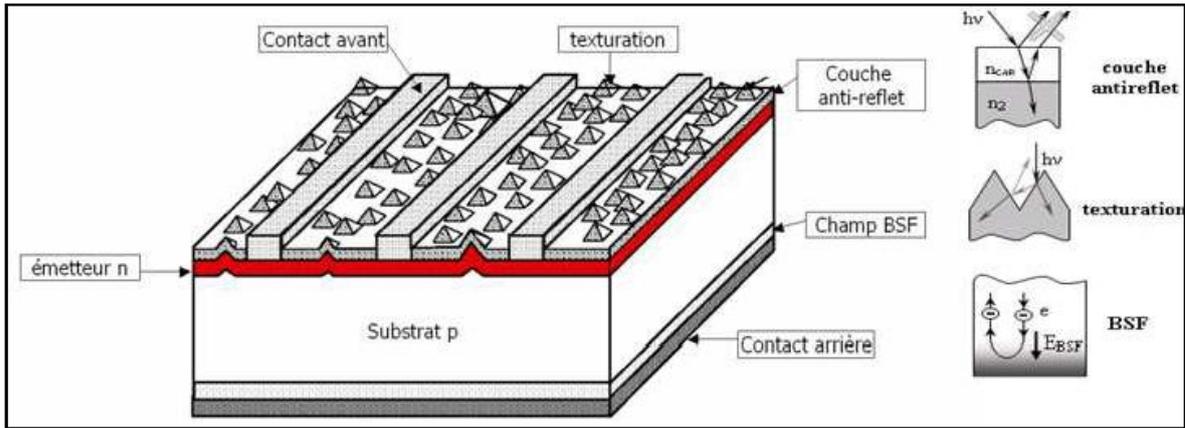


Fig. 1.16 Composition d'une cellule photovoltaïque.

a. Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$).

b. Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure 1.16). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{\text{CAR}} = \frac{(2.N+1)}{4.n_{\text{CAR}}} \lambda, N = 0,1,2,3 \dots \quad (1.9)$$

On obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO_2 , SiO_2 , ZnS , MgF_2 , SiN_x , etc [26].

c. Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique.

L'insertion sur la figure 1.16 présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face.

Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides [27]), texturation mécanique (la minage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser.

d. Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur de forme et le rendement [28].

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

e. Le champ électrique arrière (BSF)

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+-p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure 1.16). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches

car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première et le silicium multicristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées (environ 200 μm pour le Polix).

4.2.2 Structure d'une cellule photovoltaïque à haut rendement (PERL)

La structure de la cellule photovoltaïque à haut rendement en silicium monocristallin est présentée sur la figure 1.17. Cette cellule a été élaborée en laboratoire avec des procédés de la microélectronique en utilisant la technologie PERL (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) [29].

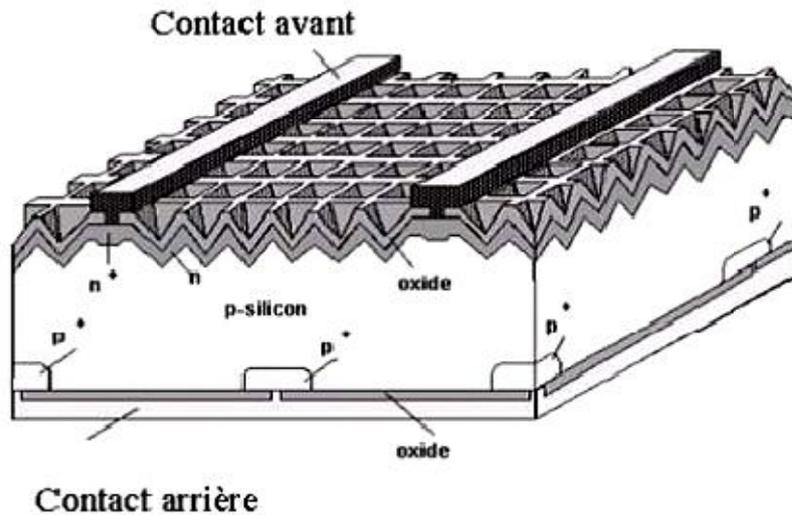


Fig. 1.17: Structure d'une cellule photovoltaïque en Si monocristallin à haut rendement (24.7%)[17].

Cette cellule est réalisée sur un substrat de Si FZ (Float Zone) de type p. La face avant (face éclairée) de la cellule est texturée en « pyramides inversées ». Ce type de texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule.

Une jonction p-n peu profonde est réalisée sur toute la surface avant pour assurer la séparation des porteurs de charge. L'émetteur ainsi réalisé est peu dopé afin de limiter les recombinaisons. Le contact ohmique sur l'émetteur est déposé sous forme de grille. La géométrie de cette grille doit assurer une faible résistance série tout en limitant l'ombragement de la cellule. Pour obtenir un contact ohmique, la région sous le contact avant est sur dopée n+ (émetteur sélectif) [30].

Une fine couche d'oxyde thermique (de haute qualité) est formée sur l'émetteur pour réduire la recombinaison sur la face avant de la cellule. Sur l'oxyde, une double couche anti-réfléchissante est déposée pour réduire les pertes par réflexion.

De même que la face avant, la face arrière de la cellule est passivée par de l'oxyde thermique avec des trous pour prendre le contact. Pour assurer un bon contact arrière, la

région du contact est dopée p+. Néanmoins, le contact entre le métal et le silicium n'est pas continu afin de limiter la recombinaison sur le contact et dans la région fortement dopée p+. Par contre, la métallisation de la face arrière est continue : elle couvre les zones de contact et l'oxyde de passivation servant ainsi de réflecteur arrière.

Actuellement le rendement record obtenu pour une cellule PV à base de silicium est de 24.7% dans les conditions d'illumination AM 1.5G. Cette valeur est à comparer à la limite théorique du rendement de 28.8% pour les cellules PV en silicium d'épaisseur 80 μ m dans les conditions d'illumination AM 1.5G et en l'absence de réflexion de la face avant, de recombinaison en surface et en volume [31].

4.2.3 Structure de cellules photovoltaïques industrielles.

Le rendement des cellules PV industrielles compris entre 15 et 17% pour les cellules conventionnelles en silicium monocristallin et 14 % environ pour les cellules en silicium multicristallin. La différence de rendement entre les cellules PV industrielles et la cellule PERL (élaborée en laboratoire et qui détient le record de rendement) peut être expliquée par l'existence de deux facteurs : le rendement et le prix. En effet, certains matériaux et techniques (lithographie, silicium FZ, double couche antireflet, émetteur sélectif) utilisés pour la cellule PV record ne peuvent pas être adaptés pour l'industrie car ils sont trop chers. La plupart des cellules photovoltaïques en silicium massif industrialisées ont la structure présentée sur la figure 1.18 La structure de la cellule PV industrielle est simplifiée afin de réduire son coût. Par exemple, la texturation de la face avant est réalisée sous forme de «pyramides aléatoires» ou texturation acide et on dépose ensuite une simple couche anti -réfléchissante en SiN. De même, le champ électrique face arrière est obtenu par recuit d'une couche en Al déposée par sérigraphie.

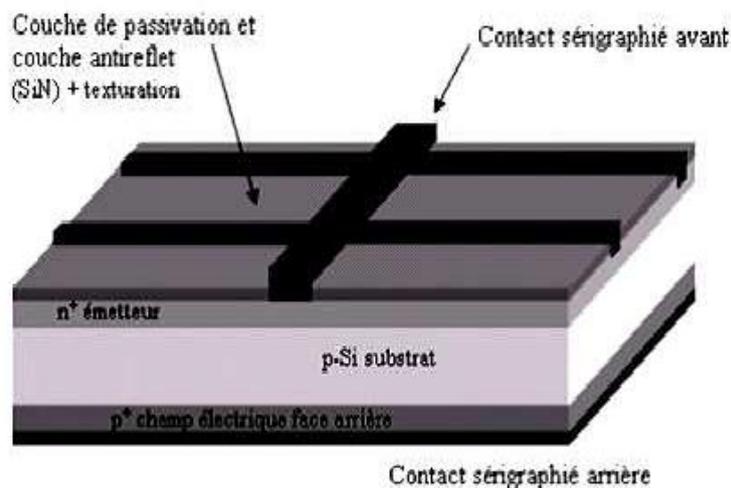


Fig.1.18: Structure d'une cellule photovoltaïque industrielle en silicium cristallin [16].

D'énormes progrès ont été réalisés ces dernières années pour améliorer la passivation du matériau et des surfaces, le piégeage de la lumière, diminuer la résistance série et le coût de la cellule.

En ce qui concerne la passivation, un progrès notable a été réalisé grâce au nitrure de silicium, utilisé comme couche antireflet. Il est particulièrement bien adapté au silicium multicristallin étant donné que le dépôt est accompagné d'une hydrogénation du substrat et il a largement supplanté le TiO_2 dans l'industrie photovoltaïque. Pour passiver la face arrière de la cellule, le BSF est utilisé. L'intérêt d'utiliser le nitrure de silicium et le BSF simultanément dans un procédé est lié à la cuisson commune des contacts avant et arrière. Leur action combinée permet une meilleure passivation du matériau que lorsqu'ils sont appliqués séparément.

Pour les cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, de nombreuses études ont été menées afin de développer une attaque chimique acide du substrat qui soit isotrope (ce qui n'est pas le cas des solutions alcalines) et qui ne détériore pas la tenue mécanique des plaques de silicium. 4% d'augmentation du courant de court-circuit ont pu être obtenus sur du silicium multicristallin grâce à ce procédé.

Afin de diminuer la résistance série et d'augmenter le courant de court-circuit, une approche très intéressante est celle de l'émetteur sélectif. Elle consiste à sur-doper la zone sous les contacts et à diminuer le dopage de la jonction entre les contacts (pour améliorer le courant de court-circuit). Différents procédés permettent d'obtenir une telle structure : la structure avec contacts enterrés déjà industrialisée ou une double sérigraphie (une pour la zone sur dopée de l'émetteur, une pour la métallisation) avec l'alignement de la sérigraphie des contacts sur celle de la zone déjà dopée.

4.2.4 Cellules à multi-jonctions

Il est parfois difficile de trouver un matériau absorbant l'ensemble du spectre solaire avec un fort coefficient d'absorption. Les cellules multi-jonction répondent à cette problématique. En effet, en multipliant le nombre de jonctions avec des matériaux à gap légèrement différent, tout en réduisant l'épaisseur de chacune, les difficultés à surmonter sont :

- Un bon appariement des courants puisque c'est la cellule la plus mauvaise qui va imposer son courant ;
- Des interfaces fortement recombinantes, le plus souvent réalisées avec du silicium microcristallin.

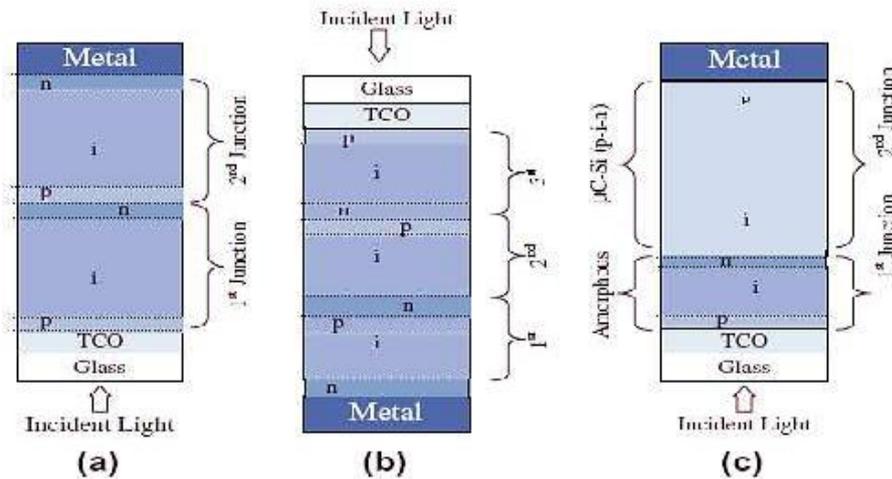


Fig.1.19 : Architecture d'une cellule solaire Multi-jonction qui montre (a) configuration "superstrat" de double-jonction, (b) configuration "substrat" de triple-jonction, et (c) configuration "superstrat de "micro-morphe" jonction [32].

4.2.4 Structure d'une cellule hétérojonction [33, 34]

Il s'agit de déposer sur la face avant et la face arrière du substrat des couches de a-Si:H qui vont créer des hétérojonctions. Une hétérojonction est une jonction entre deux semi-conducteurs ayant des énergies de bande interdite différentes. Il y a donc un aspect jonction p-n comme dans la filière classique à homojonctions. Les notions des jonctions p-n sont indispensables à connaître (zones de charge d'espace, tension de diffusion, distribution des porteurs, polarisation de la jonction). Mais l'aspect hétérojonction (due à la différence de gaps des deux semi-conducteurs) confère des propriétés intéressantes à ces cellules.

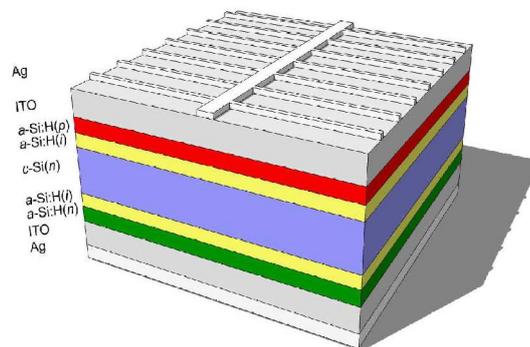


Fig.1.20: Structure d'une cellule hétérojonction [35].

4.2.5 La structure du BSF:

Le BSF (champ de surface arrière), aussi appelé « High-low- Junction » est une zone très dopée sur la totalité de la face arrière des photopiles avec un dopage de même type que celui de la base pour obtenir une structure n-p-p+. Le principal dopant utilisé est le bore

et l'épaisseur de la couche p+ (WBSF) est d'environ 5 à 15 μm . En créant ainsi un gradient d'accepteurs en face arrière de la cellule, il est possible d'obtenir.

- Une augmentation du courant de court-circuit.
- Une augmentation de la réponse spectrale aux grandes longueurs d'onde.
- Une réduction de la résistance des contacts.

L'effet du BSF est compréhensible à partir du diagramme de bandes de la structure illustrée par la figure 1.21 La barrière de potentiel B induite par la différence de niveau de dopage entre la base p et le BSF p+, tend à confiner les électrons (porteurs minoritaires) dans la base, ce qui permet de les tenir à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée.

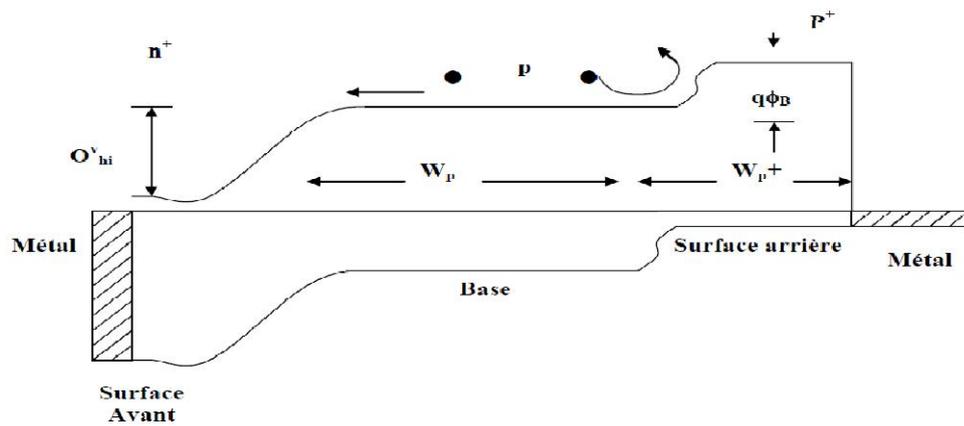


Fig.1.21: Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF.

4.2.6 Cellule solaire de type Schottky:

Le dépôt d'un métal, convenablement choisi, en couche mince sur le silicium permet d'obtenir un autre type de cellules solaires connu sous le nom de «cellule Schottky». Le diagramme énergétique de ce type de cellules sous illumination est montré sur la Fig. 1.22 ci-dessous.

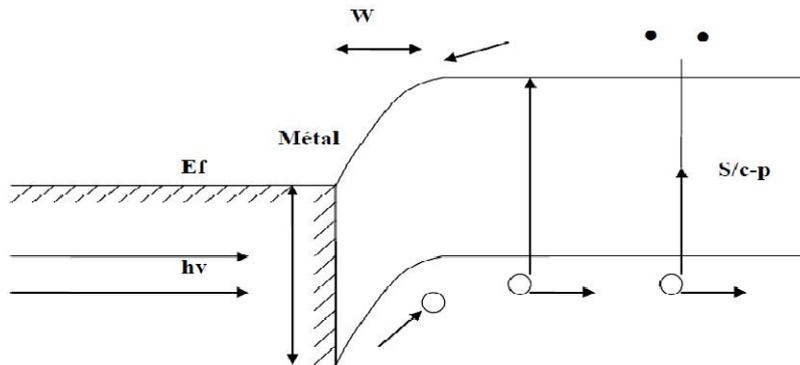


Fig.1.22: Cellule solaire de type Schottky.

La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière d'atteindre le semi-conducteur. Le photo-courant résultant a trois composantes. En effet, la lumière d'énergie $\ll h\nu > q\Phi_B$ peut être absorbée dans le métal et fait passer des trous au-dessus de la barrière dans le semi-conducteur. Les rayonnements de courtes longueurs d'onde sont absorbés dans la région de déplétion dans le semi-conducteur et ceux de grandes longueurs d'onde sont absorbés dans la région neutre, créant des paires électron-trou comme dans la jonction « P-N ». Les avantages de la jonction Schottky sont :

- Traitement à basses températures (aucune diffusion à haute température n'est exigée).
- Adaptation au silicium poly cristallin et une pile solaire en couches minces.
- Résistance élevée aux radiations due au champ électrique dans la ZCE.

4.2.7 Cellule solaire de types structure MIS:

Rappelons, tout d'abord, qu'il est plus judicieux de parler de structures CIS (Conducteur-Isolant-Semi-conducteur), car le conducteur peut être un métal, un oxyde conducteur, un semi-conducteur ou un électrolyte. Cependant, l'appellation MIS est la plus répandue dans la littérature.

Dans ce type de cellules, un film isolant très mince de l'ordre de 0.2 nm est formé entre le métal et le substrat semi conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium (thermiquement ou chimiquement par le (HNO_3)), soit par dépôt de (SiO_2) en atmosphère contrôlée. Puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, on s'attend à ce que cette structure fabriquée sur des substrats poly-cristallins ou amorphes fournisse une solution rentable pour des applications terrestres. Un rendement de 18% est obtenu avec cette structure sous éclaircissement AM1.

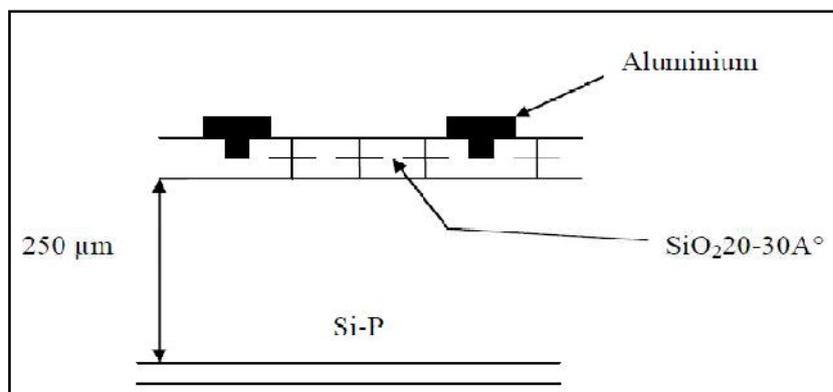


Fig. 1.23: Cellule solaire de type structure MIS.

5. Association des cellules solaires [36]

Dans les conditions standard ($1000\text{W/m}^2, 25^\circ$), la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm^2 serait de l'ordre de $1,25\text{ W}$. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance, insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont en fait réalisés par association, en série et/ou parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires : ces groupements sont appelés modules.

5.1 Association en série

Dans un montage en série, le même courant traverse toutes les cellules, la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La Figure 1.24 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série N_s cellules identiques

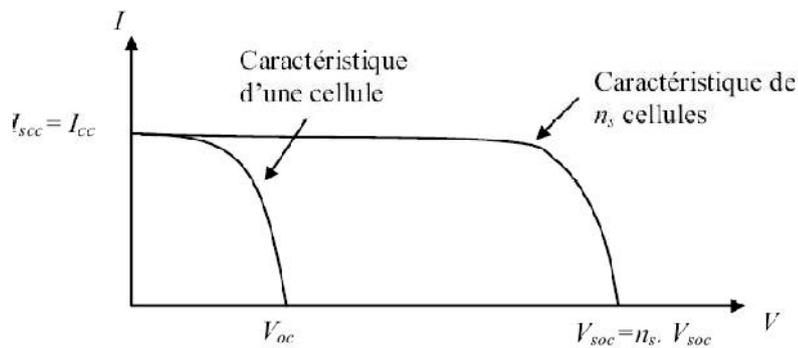


Fig. 1.24: Caractéristique résultante d'un groupement de N_s cellules en série [37].

5.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

La Figure 1.25 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles N_p cellules identiques.

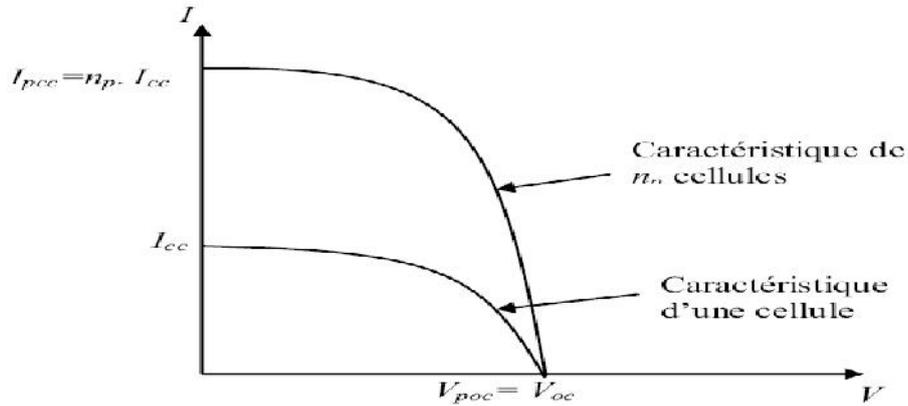


Fig. 1.25: Caractéristique résultante d'un groupement de N_p cellules en parallèle [37].

5.3 Association hybride (en série et en parallèle)

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:

$$I_{cc} (total) = N_p \times I_{cc} \tag{1.10}$$

$$V_{oc} (total) = N_s \times V_{oc} \tag{1.11}$$

N_p : nombre des cellules en parallèle,

N_s : nombre des cellules en série.

La Figure 1.26 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série N_s et en parallèle N_p , cellules identiques.

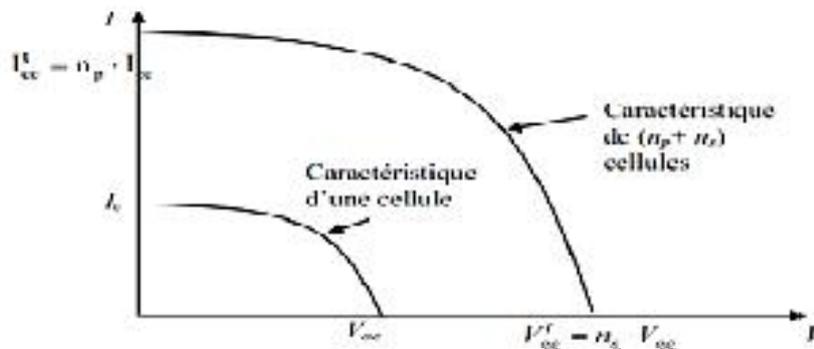


Fig. 1.26: Caractéristique résultante d'un groupement de $(N_s + N_p)$ cellules identique [37].

Les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes, à savoir l'association des cellules (série ou/et parallèle). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

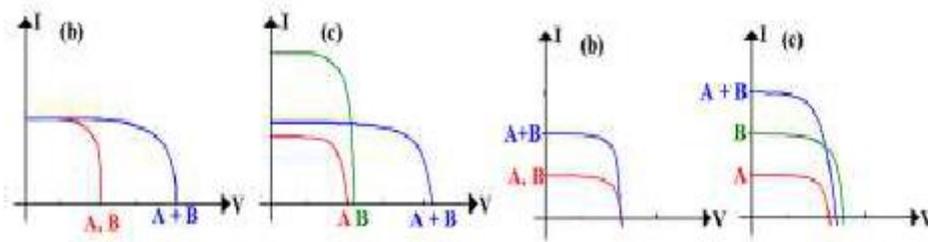


Fig.1.27: Association hybride des cellules : à gauche cellules A et B en série ; à droite A et B en parallèle, (b) cellules identiques et (c) cellules non identique.

Les cellules non identiques génèrent à leur connexion plus de pertes que deux cellules identiques, ce qui impose une contrainte de reproductibilité dans la fabrication des cellules.

6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [38,39]

6.1. Avantage :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages

- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils ont une longue durée de vie.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

6.2. Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,
- L'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage (<30V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et les différentes technologies solaires. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales. Puis nous avons abordé les différents types de ces cellules, ainsi nous avons présenté les méthodes d'association des cellules photovoltaïques et en fin nous avons donné les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Pour l'obtention d'une meilleure configuration de cellule solaire, on a besoin de définir quelques paramètres, ce qui nous oblige à utiliser une des techniques d'optimisation existante dans la littérature, cette technique fait appel aux algorithmes génétiques.

Chapitre II
Les algorithmes génétiques

1. Introduction

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser (ou minimiser) une fonction donnée. Les complexités (en taille ou en structure) relatives de l'espace de recherche et de la fonction à maximiser conduisent à utiliser des méthodes de résolutions radicalement différentes. En première approximation, on peut dire qu'une méthode déterministe est adaptée à un espace de recherche petit et complexe et qu'un espace de recherche grand nécessite plutôt une méthode de recherche stochastique (recuit simulé, algorithme génétique,...). Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc.

2. Algorithme génétique

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils utilisent à la fois les principes de la survie des structures les mieux adaptées, et les échanges d'information pseudo-aléatoires, pour former un algorithme d'exploration qui possède certaines des caractéristiques de l'exploration humaine. Ils sont une transcription directe du processus naturel d'évolution au monde de l'informatique. La première description du processus des algorithmes génétiques a été donnée par Holland en 1975 [54], puis Goldberg (1989) [55]. Ils sont utilisés pour résoudre des problèmes concrets d'optimisation. Le but de ces algorithmes génétiques est de rechercher le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Et avant d'expliquer en détail le fonctionnement d'un algorithme génétique, nous allons présenter quelques mots de vocabulaire relatifs à la génétique :

- **Individu** (Génotype ou chromosome) : correspond au codage sous forme de gènes d'une solution potentielle à un problème d'optimisation.
- **Gène** : un chromosome est composé de gènes. Par exemple dans le codage binaire, un gène vaut soit 0 soit 1.
- **Phénotype** : chaque génotype représente une solution potentielle à un problème d'optimisation. La valeur de cette solution potentielle est appelée le phénotype.

Tout ce vocabulaire est illustré par la figure 2.1

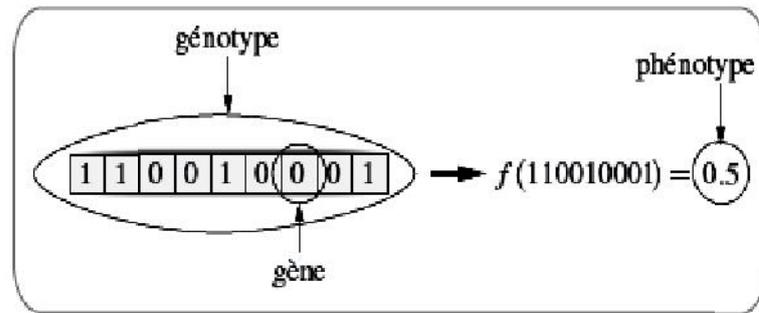


Fig. 2.1: Le vocabulaire des algorithmes génétiques.

3. Les étapes de l'algorithme génétique [40, 41]

Pour optimiser une fonction objectif donnée f dans un espace de recherche Ω , on définit une fonction performance 'fitness' reliée à cette fonction objectif. Les algorithmes génétiques maximisent souvent la fonction performance afin de s'adapter au principe Darwinien. Les étapes principales d'un algorithme génétique sont les suivantes :

La première étape d'optimisation par algorithme génétique consiste à initialiser une population de Taille P avec une méthode complètement aléatoire. La population se compose d'un ensemble d'individus (points dans l'espace de recherche), solutions possible du problème. Un individu est constitué de gènes en chaîne de bits codés souvent en binaire '0-1'. A chaque individu, on attribue une fonction performance évaluant le mérite de cet individu en tant que solution possible du problème. La population évolue en une succession de générations en respectant le principe que les individus les plus adaptés (en termes de valeurs de la fonction performance) survivent et se reproduisent.

La deuxième étape est la reproduction, dont la phase la plus importante est la sélection. Les opérateurs de sélection s'appliquent sur une population pour créer une population intermédiaire. Dans le but d'explorer le domaine de recherche, les opérateurs de croisement et de mutation s'appliquent ensuite sur la population intermédiaire pour créer une nouvelle population. Le croisement est un opérateur de reproduction qui donne naissance à deux nouveaux individus en échangeant des parties de deux individus qualifiés de parents. L'opérateur de mutation consiste pour sa part à perturber les valeurs de quelques gènes du chromosome dans le but d'augmenter les capacités d'exploration du domaine de recherche. Une fois la nouvelle population constituée, a priori plus performante que la précédente, on examine une condition d'arrêt. Si la condition d'arrêt, définie par l'utilisateur, est satisfaite on met fin au processus de calcul. Dans le cas contraire, on retourne à la deuxième étape, c'est-à-dire la reproduction, et le processus se poursuit jusqu'à la satisfaction de la condition d'arrêt. La figure 2.2 présente un schéma de

fonctionnement général de l'algorithme génétique. Les différentes étapes de ce dernier sont présentées, en détail, dans les sections suivantes

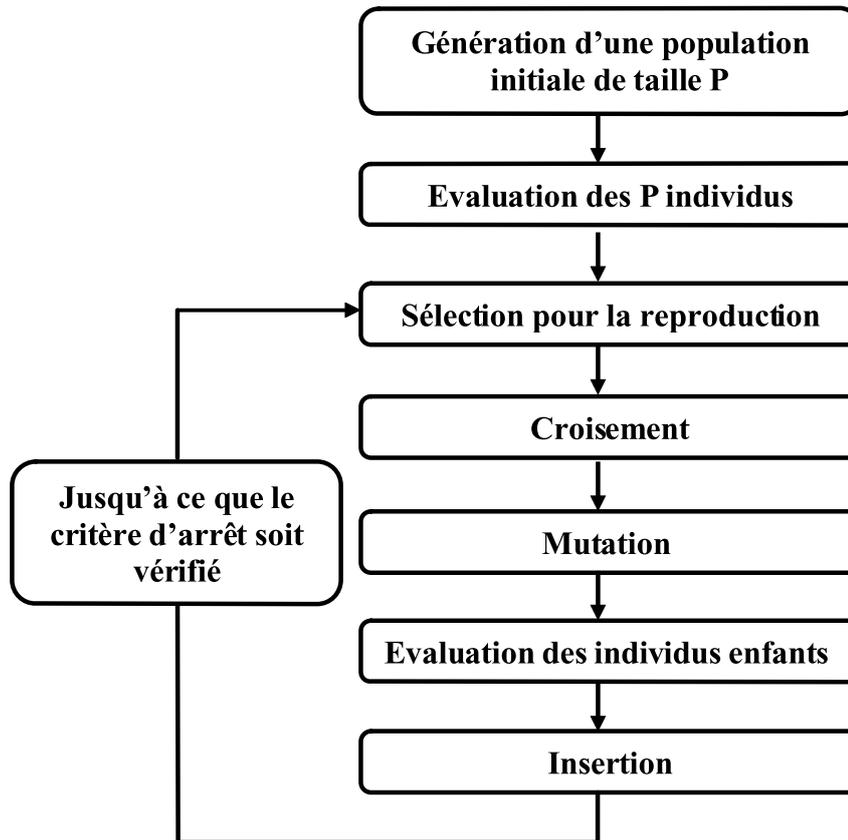


Fig. 2.2: Fonctionnement général de l'algorithme génétique [40].

3.1. Génération de la population initiale et codage

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. Chaque individu de la population est codé par un chromosome.

Plusieurs mécanismes de génération de la population initiale sont utilisés dans la littérature [40]. Le problème principal dans cette étape est le choix de la taille de la population. Si la taille de la population est trop grande, le temps de calcul augmente et demande un espace mémoire important. Par contre, une population de taille très petite, la solution obtenue n'est pas satisfaisante. Il faut donc trouver le bon compromis.

Donc une population est un ensemble de chromosomes. Chaque chromosome code un point de l'espace de recherche. L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome. Cela permet d'établir une connexion entre la valeur de la variable et les individus de la population, de manière à imiter la transcription génotype-phénotype qui existe dans le monde vivant. Il existe principalement trois types de codage [42]: le codage binaire, le codage réel et le codage en base n.

➤ Codage binaire [47]

Ce codage a été le premier à être utilisé dans le domaine des AG. Il présente plusieurs avantages : alphabet minimum $\{0,1\}$, facilité de mise en point d'opérateurs génétiques et existence de fondements théoriques (théorie sur les schémas). Néanmoins ce type de codage présente quelques inconvénients :

- a) Les performances de l'algorithme sont dégradées devant les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision numérique.
- b) La distance de Hamming entre deux nombres voisins (nombre de bits différents) peut être assez grande dans le codage binaire : l'entier 7 correspond à la chaîne 0111 et la chaîne 1000 correspond à l'entier 8. Or la distance de hamming entre ces deux chaînes est de 4, ce qui crée bien souvent une convergence, et non pas l'obtention de la valeur optimale.

➤ Codage réel

Il a le mérite d'être simple. Chaque chromosome est en fait un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome contenant les n variables: Avec ce type de codage, la procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence de l'étape de transcodage (du binaire vers le réel).

➤ Codage de Gray

Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" entre les codages binaires de deux nombres réels proches, comme mesure de la dissimilarité entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. Et c'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites. En effet, deux éléments voisins en terme de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : le codage de Gray est un codage qui a comme propriété que entre un élément n et un élément $n+1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère

3.2. Evaluation : fitness

Une fonction d'évaluation est utilisée pour mesurer les performances de chaque individu, qui correspond à une solution donnée du problème à résoudre. Elle prend en argument l'individu et lui associe un coût de performance. Cette fonction doit guider l'algorithme vers l'optimum en réalisant implicitement une pression de sélection dans cette

direction. De plus, l'efficacité d'un AG s'appuie pour une grande part, sur la qualité de cette fonction. La mise au point d'une bonne fonction d'adaptation doit respecter plusieurs critères qui se rapportent à sa complexité et à la satisfaction des contraintes du problème. Lorsque la fonction d'adaptation apparaît excessivement complexe, consommant une importante puissance de calcul, la recherche d'une approximation plus simple est souhaitable [43,46].

3.3. Reproduction

La reproduction joue un rôle fondamental pour le passage d'une génération à une autre. Elle représente un cycle de l'algorithme génétique. Elle se fait en appliquant des opérations génétiques qui simulent les processus naturels appliqués par la nature aux espèces biologiques vivantes. Ces opérations génétiques sont la sélection, le croisement et la mutation. Elles sont présentées en détail dans les paragraphes qui suivent.

3.3.1. Sélection

La sélection permet d'identifier les individus susceptibles d'être croisés dans une population.

Il existe plusieurs techniques de sélection, nous présentons ici les quatre les plus utilisées parmi elles :

- **Sélection par rang** : consiste à ranger les individus de la population dans un ordre croissant ou décroissant, selon l'objectif (fonction fitness) ;
- **Sélection aléatoire** : cette sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation. Chaque individu a donc une probabilité uniforme $1/P$ d'être sélectionné, où P est le nombre total d'individus dans la population
- **Sélection par roulette** : elle consiste à créer une roue de loterie biaisée pour laquelle chaque individu de la population occupe une sélection de la roue proportionnelle à sa valeur d'évaluation ;

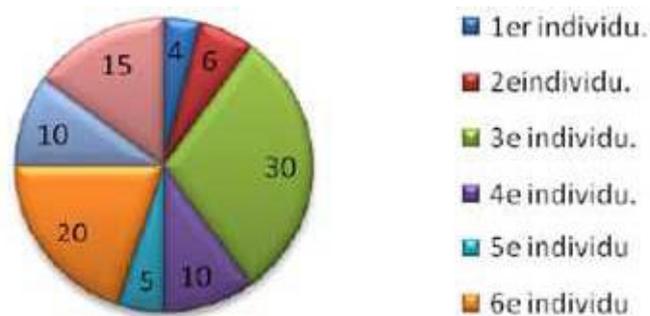


Fig.2.3 : Schéma d'une roulette.

- **Sélection par tournoi** : le tournoi le plus simple consiste à choisir aléatoirement un nombre k d'individus dans la population et à sélectionner celui qui a la meilleure performance. Les individus qui participent à un tournoi sont remis ou sont retirés de la population, selon le choix de l'utilisateur. Avec le tournoi binaire, sur deux individus en compétition, le meilleur gagne avec une probabilité $p \in [0.5 ; 1]$;

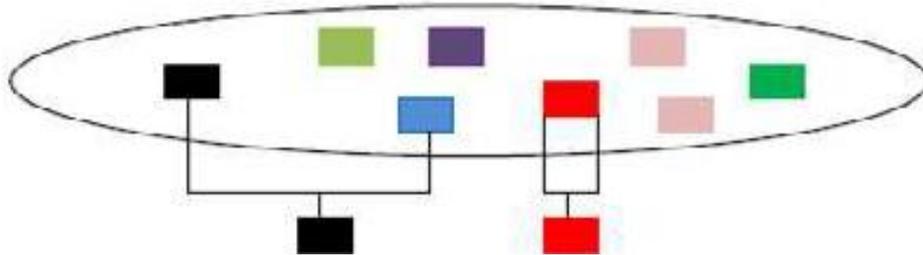


Fig.2.4: Le tournoi entre deux individus avec rééligibilité.

3.3.2. Croisement [45]

Le croisement permet d'enrichir la population en manipulant les composantes des chromosomes.

Un croisement est envisagé avec deux parents et génère un ou deux enfants. Il est appliqué avec une probabilité P_{croi} , appelée probabilité de croisement. Après la sélection de deux individus, nous générons un nombre aléatoire $\alpha \in [0,1]$. Si $\alpha \leq P_{\text{cross}}$, nous appliquons l'opérateur de croisement sur les deux parents. Selon la littérature, plusieurs opérateurs de croisement sont proposés, nous citons ici les plus utilisés :

- ❖ **Croisement en 1-point** : consiste à diviser chacun des deux parents en deux parties à la même position, choisie au hasard et à recopier la partie inférieure du parent à l'enfant et à compléter les gènes manquants de l'enfant à partir de l'autre parent en maintenant l'ordre des gènes. La figure 2.5 présente un exemple illustratif de ce type de croisement.

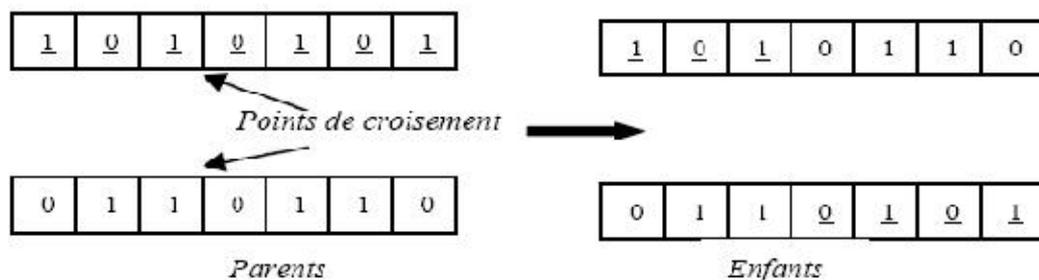


Fig.2.5 : Croisement en 1-point de deux chromosomes [40].

- ❖ **Croisement en 2-points** : Ce type de croisement est utilisé en choisissant aléatoirement 2 points de coupure pour dissocier chaque parent en 3 fragments. Les 2 fragments en extrémités pour le Parent 1 (respectivement Parent 2) sont copiés à

l'Enfant 1 (respectivement Enfant2). On complète la partie restante de l'Enfant 1 par les éléments du Parent 2 et la partie restante de l'Enfant 2 par les éléments du Parent 1 en balayant de gauche à droite et en ne reprenant que les éléments non encore transmis. La figure 2.6 présente un exemple illustratif de ce type de croisement.

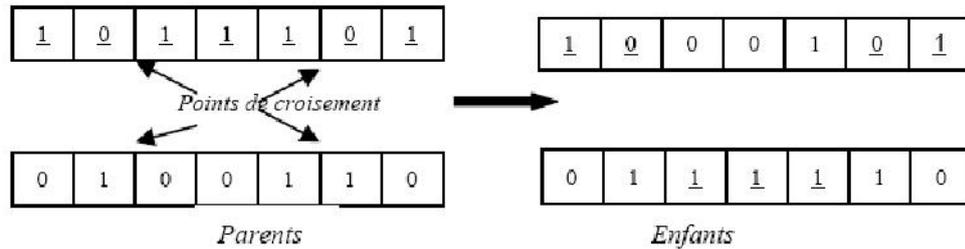


Fig.2.6 : Croisement en 2-points de deux chromosomes [43].

- ❖ **Croisement uniforme** qui utilise une chaîne de bits générée aléatoirement et de même longueur que les individus appelée masque. Les gènes des individus initiaux sont échangés en fonction de cette chaîne aléatoire, lorsque le bit correspondant vaut 1. Le croisement uniforme de permutations a les avantages de la simplicité et d'une bonne efficacité.

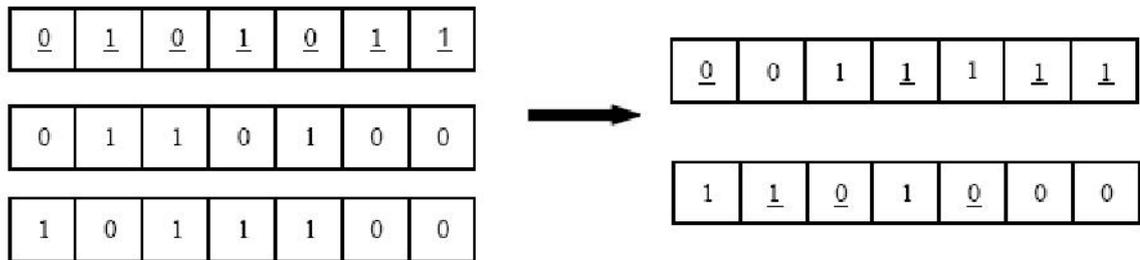


Fig.2.7 : Croisement uniforme [43].

3.3.3. Mutation

Cet opérateur agit sur un individu. Il consiste à choisir d'une manière aléatoire un ou plusieurs gènes (bits) et à modifier leurs valeurs. Chaque bit d'un individu a une probabilité pour qu'il subisse une mutation, notée P_m . La mutation se fait comme suit :

Pour chaque bit de l'individu générer un réel aléatoire r , $r \in [0,1]$.

Si $r < P_m$ alors le bit sera inversé.

De nombreuses méthodes de mutation ont été présentées dans la littérature [40]. Nous citons les plus connues :

- Opérateur d'inversion simple : cet opérateur consiste à choisir aléatoirement deux points de coupure et inverser les positions des gènes situées au milieu ;

- Opérateur d'insertion : cet opérateur consiste à sélectionner au hasard un gène et une position dans le chromosome à muter, puis à insérer le gène sélectionné dans la position choisie. La figure 2.8 présente un exemple illustratif de ce type de mutation.

Plusieurs arguments justifient l'utilisation de la mutation. Ainsi, les actions combinées de la pression de sélection et du croisement peuvent faire disparaître des gènes, aux mêmes positions des génotypes pour tous les individus. La mutation est capable de réintroduire ces gènes dans la population et participe ainsi au maintien de la diversité, utile à une bonne exploration de l'espace de recherche.

D'autre part, elle assure une recherche locale aléatoire autour de chaque individu. Elle peut alors améliorer la qualité des solutions découvertes. En effet, le croisement perd de son importance lorsqu'une grande partie de la population est localisée dans les voisinages des maxima de la fonction d'adaptation. Dans ce cas, les individus situés sur un même pic sont souvent identiques et ne subissent aucune modification, ou alors, si les parents appartiennent à des pics différents, les descendants montreront généralement de faibles performances. En revanche, la recherche aléatoire due aux mutations donne une chance à chaque individu de s'approcher des positions exactes des maxima, autant que le permet la précision du codage.

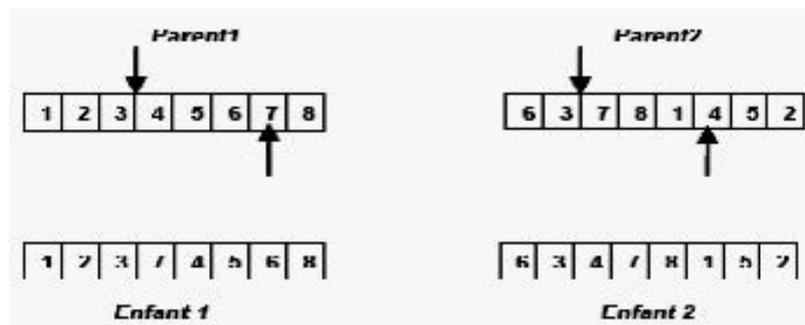


Fig.2.8 : Mutation : opérateur d'insertion [40].

3.4. Insertion

Après l'étape de mutation, on utilise une méthode d'insertion pour générer une nouvelle population. Plusieurs stratégies ont été présentées dans la littérature :

- ✓ première stratégie, consiste à choisir les P individus à partir des P enfants déjà créés par les opérateurs de croisement et mutation. Dans ce cas, les parents sont remplacés par les enfants déplacés.
- ✓ une autre stratégie consiste à choisir les P individus à partir des P parents de la population précédente et de P nouveaux enfants. A chaque itération, les individus ayant les meilleures fitness seront sélectionnés afin de créer des individus fils qui

remplaceront les plus mauvais parents. Le reste survit et sera copié dans la nouvelle génération.

3.5. Critère d'arrêt

Les étapes d'évaluation reproduction/sélection sont appliquées d'une manière itérative sur la population, jusqu'à satisfaction d'une condition Fin ; cette condition est soit un nombre maximum de générations, soit une valeur de fitness minimale, soit une convergence vers la meilleure solution.

Au cours de son évaluation, la population tend à converger, c.-à-d., que les individus tendent à se ressembler de plus en plus. Quand la population s'est uniformisée en grande partie, les individus fournissent une bonne approximation d'un optimum du problème. Si cet optimum n'est pas toujours l'optimum global, c'est généralement un optimum local proche (en qualité) de celui-ci.

4. Les paramètres d'un AG

4.1. La taille de la population

Les conditions de convergence changent avec la taille de la population ; lorsque celle-ci est grande, sa diversité augmente ce qui diminue la convergence vers un optimum local, le temps d'exécution de chaque génération augmente, la recherche risque de s'effectuer d'une façon redondante et l'efficacité de l'algorithme est globalement affectée. Par contre, si la taille de la population est petite, alors la probabilité de s'attarder sur des minima locaux est grande. La taille selon le cas se situe entre 25 et 100.

4.2. Le taux de croisement

Il détermine la proportion des individus qui sont croisés parmi ceux qui remplaceront l'ancienne génération. L'opérateur de croisement est appliqué avec une probabilité P_c , et plus cette valeur est élevée plus de nouvelles structures (individus) sont introduites dans la nouvelle génération, les structures performantes sont trop fréquemment détruites. Par contre, si ce taux est trop bas, la population n'évolue pas assez vite. En général, P_c varie entre 0.25 et 0.70.

4.3. Le taux de mutation

L'opérateur de mutation est appliqué avec une probabilité P_m ; si ce taux est grand alors la recherche devient purement aléatoire, la population est diversifiée et l'AG perd de son efficacité. Si au contraire ce taux est faible, la population est moins diversifiée et en plus il y a risque de stagnation. Des études empiriques conseillent pour l'obtention de bons résultats une fréquence qui se situe autour d'une mutation tous les 1000 bits. A noter que ces paramètres dépendent étroitement du type de problème à résoudre.

5. Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques [44]

5.1. Avantage 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...).
- 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 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.

5.2. 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 ;
- L'utilisation d'un AG ne garantit pas le succès de l'optimisation ;
- 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 le bon paramétrage, il faudra faire plusieurs expériences pour s'en approcher.

6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur la technique évolutionnaire « Algorithme Génétique », où on l'a introduit par une définition, en présentant son utilité pour le processus de l'optimisation d'un problème définie, et ce en utilisant des paramètres bien précis tel que la taille de la population, le nombre de génération, la fonction d'évaluation, le critère d'arrêt. Puis nous avons expliqué les étapes principales de son fonctionnement. En fin, on a prouvé les avantages et les inconvénients de cette technique.

Comme on l'a mentionné précédemment, l'AG est une technique d'optimisation, que nous allons introduire dans notre travail. L'utilisation d'un modèle mathématique pour la cellule solaire est nécessaire afin de l'améliorer par cette technique.

Chapitre III
Modélisation de cellules solaires

1. Introduction

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, en prenant plus ou moins de détails. 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 leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant de la cellule photovoltaïque.

2. Modélisation d'une cellule solaire

2.1. Modèle d'une cellule solaire idéale

La cellule solaire est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la cellule solaire est une jonction p-n).

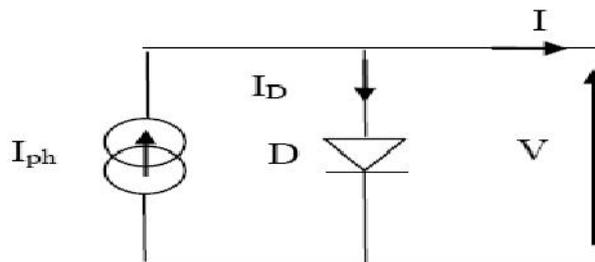


Fig. 3.1 : Schéma idéal d'une cellule photovoltaïque.

$$I = I_{ph} - I_D \quad (3.1)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left[\frac{q(V)}{nKT} \right] - 1 \right] \quad (3.2)$$

2.2. Modèle d'une cellule solaire réel

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui se différencient entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité du courant de sortie.

2.2.1. Modèle à deux diodes (à exponentielles doubles (DEM))

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous. On considère le cas d'une cellule solaire idéal comprenant une source de courant et deux diodes en parallèles. La source de courant I_{ph} modélise le courant photo-généré. Les branches de chacune des diodes représentent respectivement le courant de diffusion dans la base et l'émetteur (I_{d1}). Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion, et le courant de génération-recombinaison (I_{d2}) dans la zone de charge d'espace de la jonction (ZCE).

Pour envisager le cas d'une cellule solaire réelle, le circuit équivalent doit intégrer Une résistance série R_s et une résistance shunt R_{sh} . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule solaire:

- la résistance série R_s , qui modélise les pertes résistives au sein de la cellule solaire et donc les métallisations,
- la résistance shunt R_{sh} , modélisant les courants de fuite qui court-circuitent la jonction (fuites par les bords de la cellule et au niveau de la jonction).

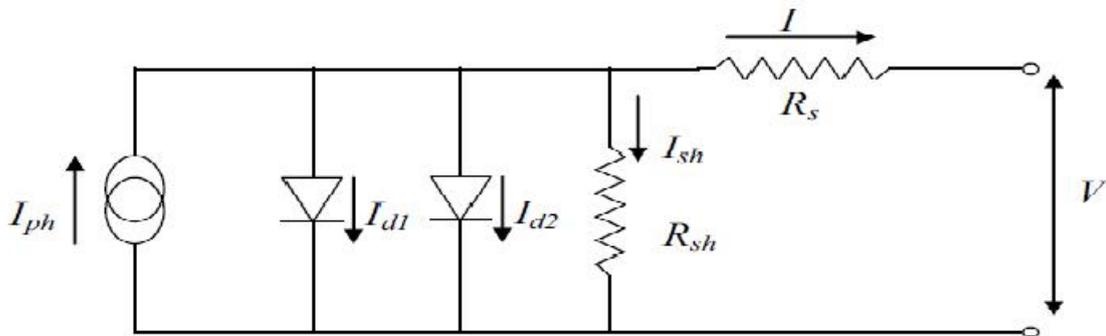


Fig.3.2: Schéma équivalent d'une cellule PV. Modèle à deux diodes.

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{Ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (3.3)$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{s1} \left[\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_1 KT} \right] - 1 \right] \quad (3.4)$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left[\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_2 KT} \right] - 1 \right] \quad (3.5)$$

Avec : I_{s1} (I_{01}), I_{s2} (I_{02}) courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{n_1KT} \right] - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{n_2KT} \right] - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3.6)$$

Le courant résultant I comporte deux exponentielles, d'où son nom. Il est connue aussi par le nom 2M7P, où ce nom spécifie en particulier le nombre 7 des paramètres à déterminer, à savoir: $I_{ph}, I_{s1}, I_{s2}, R_s, R_{sh}, n_1$ et n_2 .

Si la résistance shunt est considérée infinie, le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P. Comme on trouve aussi le modèle à 5 paramètres 2M5P où la résistance série est aussi non considéré.

2.2.2. Modèle à une diode (à exponentielle simple (SEM))

Les propriétés de la jonction PN et la réaction du semi-conducteur au rayonnement mènent au schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque représenté sur la figure 3.3. C'est le modèle le plus cité dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

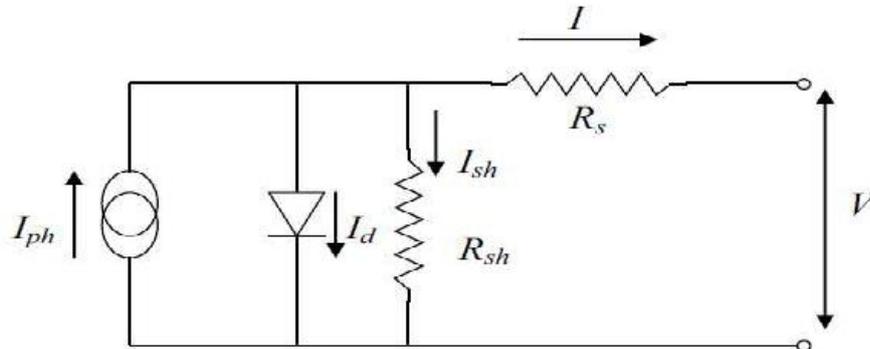


Fig.3.3 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_s \left[\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{nKT} \right] - 1 \right] \quad (3.7)$$

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (3.8)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{nKT} \right] - 1 \right] - \frac{(V+IR_s)}{R_{sh}} \quad (3.9)$$

Le modèle à une diode fait donc intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} , et n et il est connu sous le nom L5P. Comme le modèle précédent, le fait de négliger la résistance parallèle en la considérant comme infinie donne le modèle à 4 paramètres L4P et la non considération d'avantage de la résistance série donne le modèle à 3 paramètres L3P (modèle idéale d'une cellule photovoltaïque).

3. Influence des paramètres internes et externes sur les deux modèles

3.1. Influence des paramètres internes sur le modèle à une diode

a. Influence du photo-courant

Le photo-courant I_{ph} d'une photopile solaire définit la quantité des paires électron-trou créé G (Taux de génération) traversant la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement

$$I_{ph} = q G (L_n + L_p) \quad (3.10)$$

D'après la figure 3.4, nous remarquons que I_{ph} influe surtout sur le courant de court-circuit, et non sur la tension de circuit ouvert.

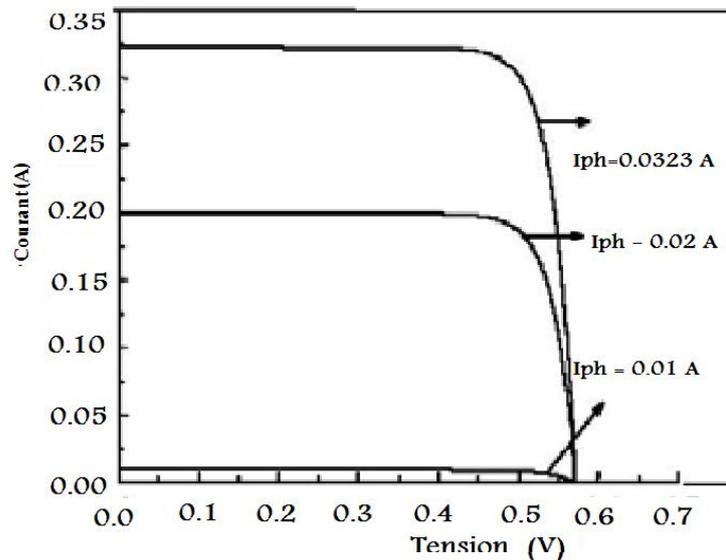
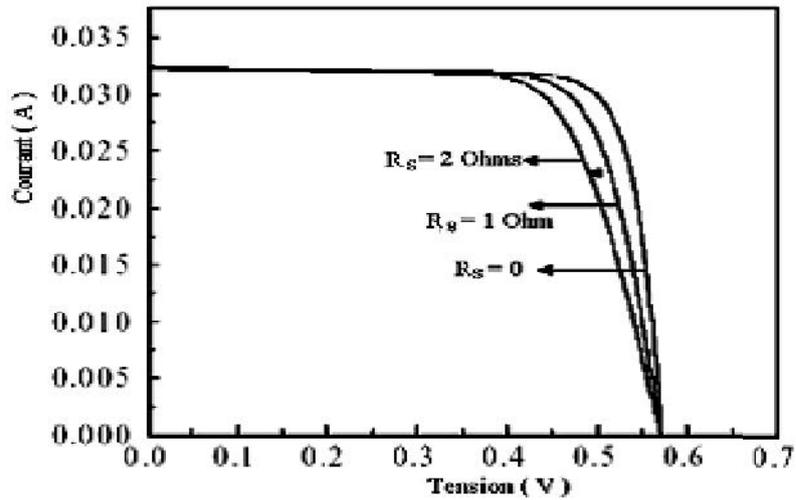


Fig. 3.4: Influence de I_{ph} sur le modèle à une diode [49].

b. Influence de la résistance série R_s

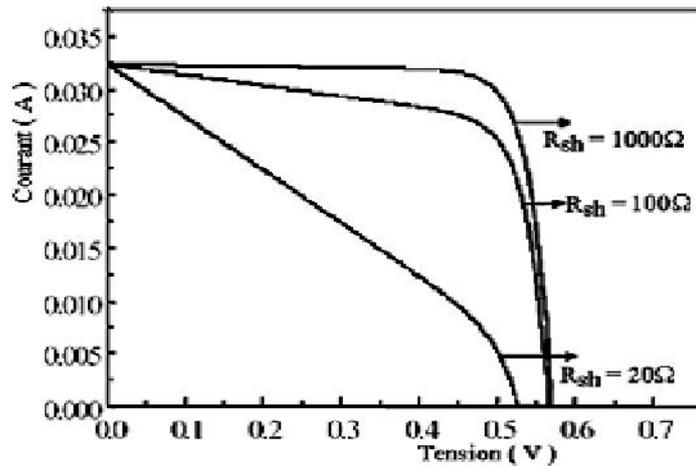
La résistance série R_s influe légèrement sur la tension en circuit ouvert V_{co} qui diminue à partir d'une certaine valeur de R_s


 Fig. 3.5: Influence de R_s sur le modèle à une diode [49].

c. Influence de la résistance shunt R_{sh}

L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance shunt, qui apparaît en parallèle sur le schéma électrique. Cette résistance shunt est liée directement aux processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs. La figure 3.6 montre que cette influence se traduit par une soustraction du photo-courant. Outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire de fuite donné par:

$$I^* = \frac{V + IR_S}{R_{sh}} = \frac{V^*}{R_{sh}} \quad (3.11)$$


 Fig. 3.6: Influence de R_{sh} sur le modèle à une diode [49].

a. Influence I_{01} et n

Les figures 3.7 et 3.8 montrent que la tension en circuit ouvert peut être augmentée par une augmentation du facteur de qualité de la diode. Par ailleurs, il est montré que l'augmentation de n conduit à une dégradation de l'efficacité de la cellule. Le maintien de

la valeur de I_0 conduit à des valeurs du rendement η et de la tension en circuit ouvert V_{oc} bien trop grandes et non réalisables avec le matériau et les structures considérées.

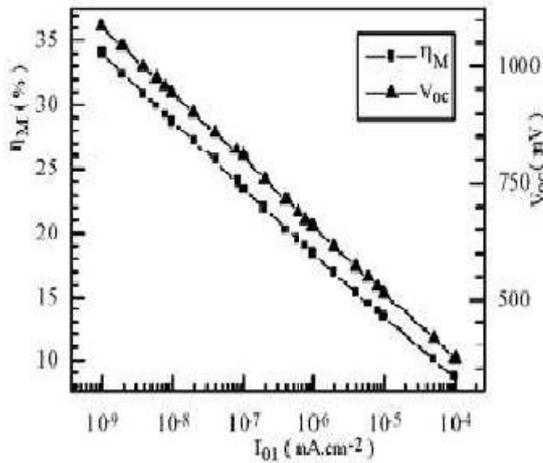


Fig. 3.7: Influence de I_{01} sur le rendement et sur V_{oc}

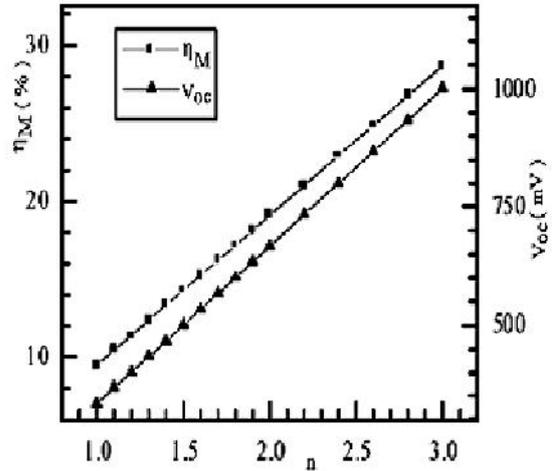


Fig. 3.8: Influence de n sur le rendement et sur V_{oc}

3.2 Influence des paramètres internes sur le modèle à deux diodes (DEM)

b. Influence de I_{01} , I_{02} et n

D'après les figures 3.9 à 3.11, nous remarquons que pour un facteur de qualité n donné, l'influence du courant de diffusion I_{02} est prépondérante devant celle du courant de recombinaison I_{01} . Et pour une grande valeur du facteur de qualité de la diode, de grandes valeurs du rendement η peuvent être obtenues avec une cellule solaire caractérisée par un courant de recombinaison I_{01} important et un courant de diffusion I_{02} faible de l'ordre de 10^{-13} A/cm².

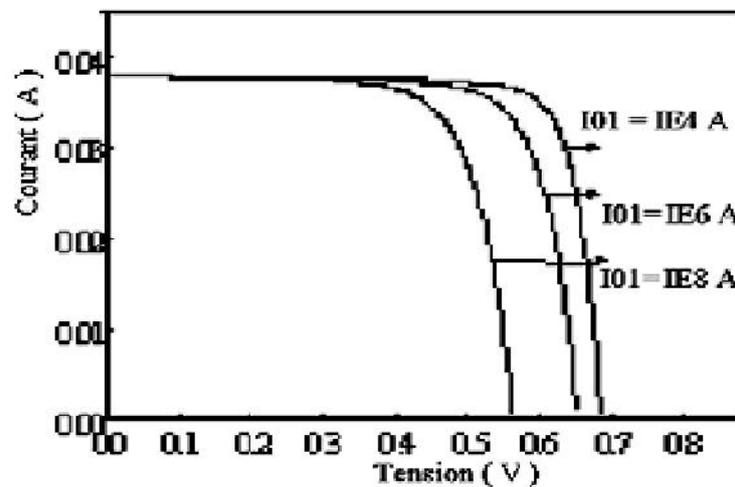


Fig. 3.9: Influence de I_{01} sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM [49].

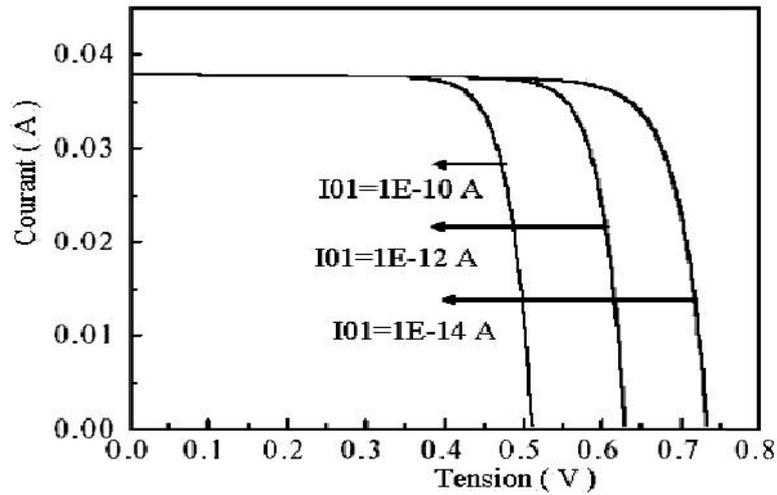


Fig. 3.10: Influence de I_{02} sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM [49].

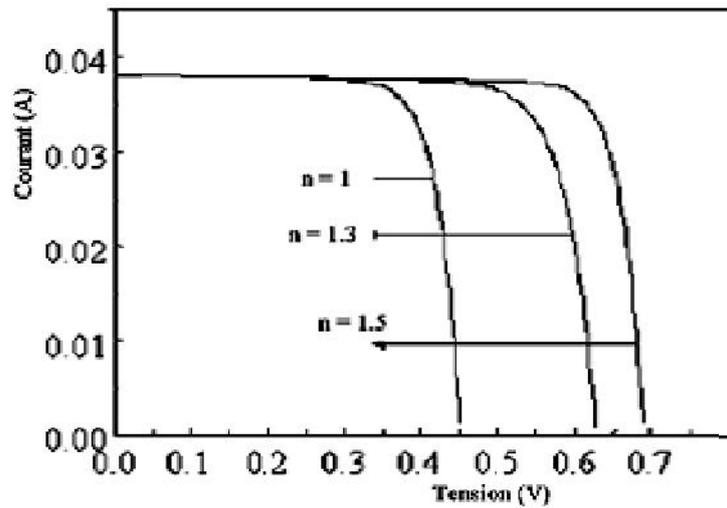


Fig. 3.11: Influence de n sur la caractéristique I-V selon le modèle DEM [49].

c. Influence des résistances série et parallèle R_s et R_{sh}

D'après les figures 3.12 et 3.13 respectivement, nous constatons que lorsque R_s diminue la caractéristique courant - tension augmente, contrairement à la résistance shunt R_{sh} qui augmente lorsque la caractéristique courant - tension augmente.

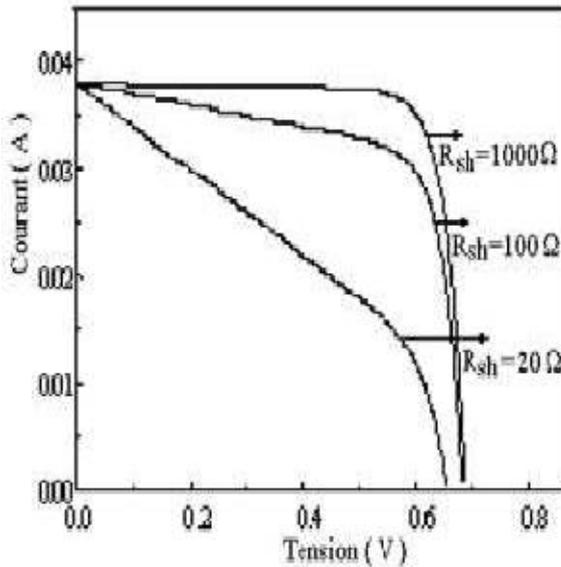


Fig. 3.12: Influence de R_{sh} sur le modèle à deux diodes [49].

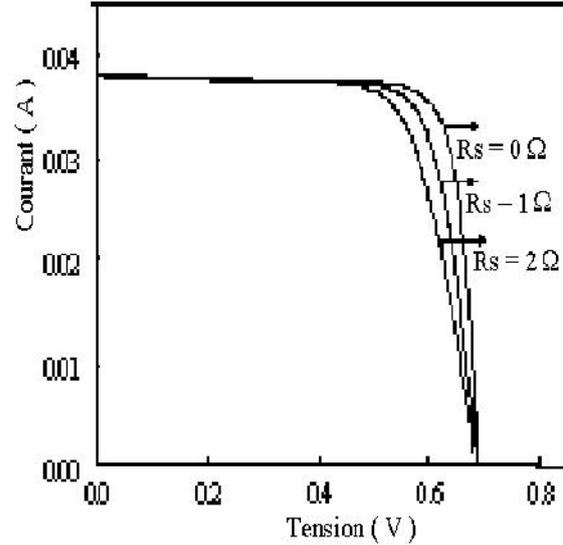


Fig. 3.13: Influence de R_s sur le modèle à deux diodes [49].

L'étude de l'influence des paramètres sur les deux modèles, nous remarquons que :

- les résistances série R_s , shunt R_{sh} et le photo-courant I_{ph} influent de la même façon sur la caractéristique courant – tension pour les deux modèles étudiés.
- les variations du rendement η et de la tension en circuit ouvert V_{oc} sont en corrélation. Les conditions sur n et I_{01} permettant d'atteindre de grandes valeurs du η imposent de grandes valeurs de V_{oc} . Ce modèle prévoit une augmentation de V_{oc} dès que le facteur de qualité augmente ou si le courant de saturation diminue, ceci mène à de grandes valeurs de V_{oc} non réalisables.

De ce fait, une recherche de nouvelles structures ne doit pas porter uniquement sur l'amélioration du courant de saturation I_{01} des cellules solaires idéales mais sur les conditions d'une amélioration de V_{oc} avec des facteurs de qualité supérieurs à l'unité. Aussi, ces résultats prouvent l'existence d'un courant de recombinaison en zone de charge d'espace non négligeable (grandes valeurs de V_{oc}) pour des pièges très profonds (valeurs de n importantes).

Ceci montre l'insuffisance du modèle à une diode et justifie l'intérêt d'utiliser le modèle à deux diodes afin de pouvoir tenir compte des deux phénomènes, la diffusion et la recombinaison en zone de charge d'espace dans l'optimisation du rendement, pour un ensemble de paramètres du modèle donné.

3.3 Influence des paramètres externes sur les cellules photovoltaïques

a. Influence de l'éclairement

L'augmentation d'ensoleillement (flux lumineux) se traduit par un déplacement de la caractéristique $I=f(V)$ suivant l'axe des courants.

Le croisement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert étant donné que le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, alors que celle de la tension à circuit ouvert est logarithmique.

L'influence du flux lumineux sur la caractéristique de la cellule solaire est représentée sur la figure (3.13) à une température constante $T=25^{\circ}\text{C}$.

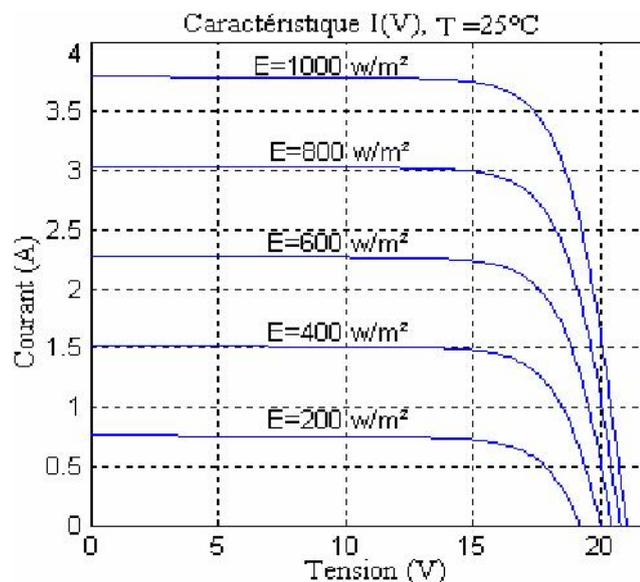


Fig.3.13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I(V)$ [50].

b. Influence de la température

La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La figure 3.14 présente la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à $1000\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

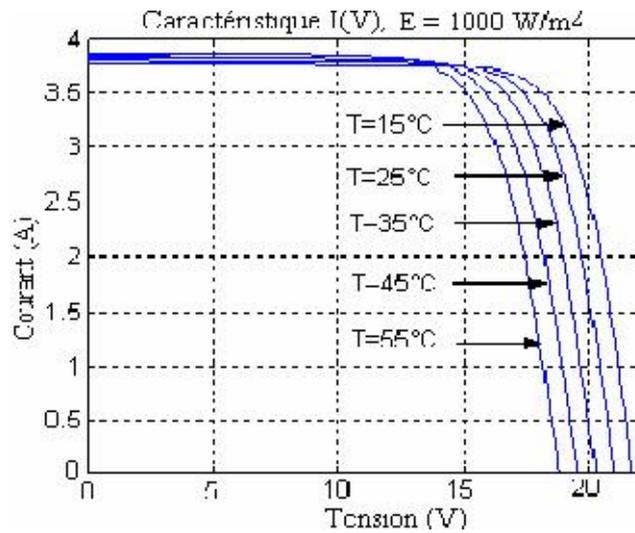


Fig.3.14 : Influence de la température sur la caractéristique I (V)[50].

Si la température croît à irradiation constante, la tension V_{co} décroît avec la température. Plus la température est élevée plus V_{co} est faible et le courant de court-circuit I_{cc} augmente avec la température. Cette hausse est nettement moins importante que la baisse de tension. L'influence de la température sur I_{cc} peut être négligée dans la majorité des cas.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a montré l'importance des modèles mathématiques de cellule solaire (à une diode et à deux diodes). Ce modèle est formulé par des paramètres électriques tels que : I_{ph} , I_s , R_s , R_{sh} et n .

Pour extraire ces paramètres d'une manière exacte, nous allons faire appel aux algorithmes génétiques au chapitre IV.

Chapitre IV
Résultats et discussions

1. Introduction

Pour mieux comprendre les mécanismes physiques agissant à l'intérieur de la cellule solaire, et par conséquent les différents paramètres qui affectent ses caractéristiques, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'identification de ses paramètres, non seulement pour l'augmentation du rendement de la cellule photovoltaïque. Mais aussi pour pouvoir simuler son comportement, et optimiser ses différentes caractéristiques.

Deux modèles sont utilisés habituellement dans ce domaine d'étude: le modèle à une diode, et le modèle à deux diodes.

- Les paramètres du modèle à une seule diode sont: le photo-courant, le courant de saturation, la résistance série, la résistance shunt, et le facteur d'idéalité.

- Les paramètres du modèle à deux diodes à extraire sont: le photo-courant, les deux courants de saturation, la résistance série, la résistance shunt, et les deux facteurs d'idéalité.

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations non linéaire I-V plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction de ces paramètres comme par exemple (Newton-Raphson, point fixe, Levenberg-Marquardt, Bisection, technique évolutionnaire...etc) [51]. Dans notre cas, L'identification des paramètres a été effectuée par un algorithme génétique (AG). La base de données utilisée pour l'optimisation de nos modèles analytiques est basée sur des modèles expérimentaux [52, 53].

2. Extraction des paramètres

Les algorithmes génétiques fournissent une voie puissante pour l'extraction des différents paramètres de la cellule solaire. La combinaison entre l'analyse physique et l'utilisation ultérieure de la technique d'optimisation est nécessaire pour trouver un positionnement de paramètres valide. Alor le principe de l'AG est basé sur les points suivants :

- Dans une première étape on définit une fonction objective, appelée un critère d'arrêt, ce critère I dépend d'un ensemble de paramètres groupés en vecteur P.
- Un algorithme adapté est employé pour trouver la valeur de P qui réduit au minimum I(P).

2.1. Paramètres du modèle d'une cellule solaire à une diode

Dans le modèle à une diode, le courant fourni par la cellule est calculé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (4.1)$$

Avec

I : le courant fourni par la cellule,

I_{ph} : Photo-courant généré de cellule,

I_D : courant de diode,

I_{sh} : Courant de shunt.

Avec :

$$I_D = I_s \left[\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{nKT} \right] - 1 \right] \quad (4.2)$$

$$I_{sh} = \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (4.3)$$

$$I_{sh} = (V + IR_s) G_{sh} \quad (4.4)$$

Où

$$G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}} \quad (4.5)$$

Donc l'équation (4.1) devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left[\frac{q(V+IR_s)}{nKT} \right] - 1 \right] - (V + IR_s) G_{sh} \quad (4.6)$$

Avec

V : Tension à la borne de la cellule [V],

I_s : Courant de saturation de la diode [A],

R_s : Résistance série [Ω],

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω],

q : Charge de l'électron = $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb,

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K,

n : Facteur d'idéalité de la diode,

T : Température effective de la cellule [Kelvin] est égale à 303 K selon [52].

Dans notre application, on a cinq paramètres, les composantes I_{ph} , I_s , R_s , G_{sh} et n qui sont regroupés dans un vecteur appelé chromosome. Afin de calculer les valeurs de ces paramètres, il faut minimiser la fonction fitness (f) par la technique d'optimisation d'AG, cette fonction est définie par l'utilisation de l'RMSE (Root mean square error)[48] :

$$f = RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (I_{exp} - I_{cal})^2} \quad (4.7)$$

Où N représente la taille de la base des données expérimentales tandis que exp et cal représente respectivement les données expérimentales et les données calculées par la technique AG. Où I_{cal} est donnée comme suit :

$$I_{cal} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q(V_{exp} + I_{exp}R_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - (V_{exp} + I_{exp}R_s)G_{sh} \quad (4.8)$$

2.2. Paramètres de modèle d'une cellule solaire à deux diodes

Dans le modèle à deux diodes, le courant fourni par la cellule est calculé comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (4.9)$$

Avec

$$I_{D1} = I_{s1} \left[\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_1KT} \right] - 1 \right] \quad (4.10)$$

$$I_{D2} = I_{s2} \left[\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_2KT} \right] - 1 \right] \quad (4.11)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4.12)$$

$$G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}} \quad (4.13)$$

Donc l'équation (4.9) devient :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_1KT} \right] - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{n_2KT} \right] - 1 \right] - (V + IR_s) G_{sh} \quad (4.14)$$

Dans le cas de deux diodes, on a sept paramètres, les composantes I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , R_s , G_{sh} et n_1 et n_2 qui sont regroupés dans un vecteur appelé chromosome. Ces paramètres sont à optimiser par la minimisation de la fonction fitness (f) mentionné précédemment (expression 4.7)

Avec

$$I_{cal} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V_{exp} + I_{exp}R_s)}{n_1kT} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V_{exp} + I_{exp}R_s)}{n_2kT} \right) - 1 \right] - (V_{exp} + I_{exp}R_s)G_{sh} \quad (4.15)$$

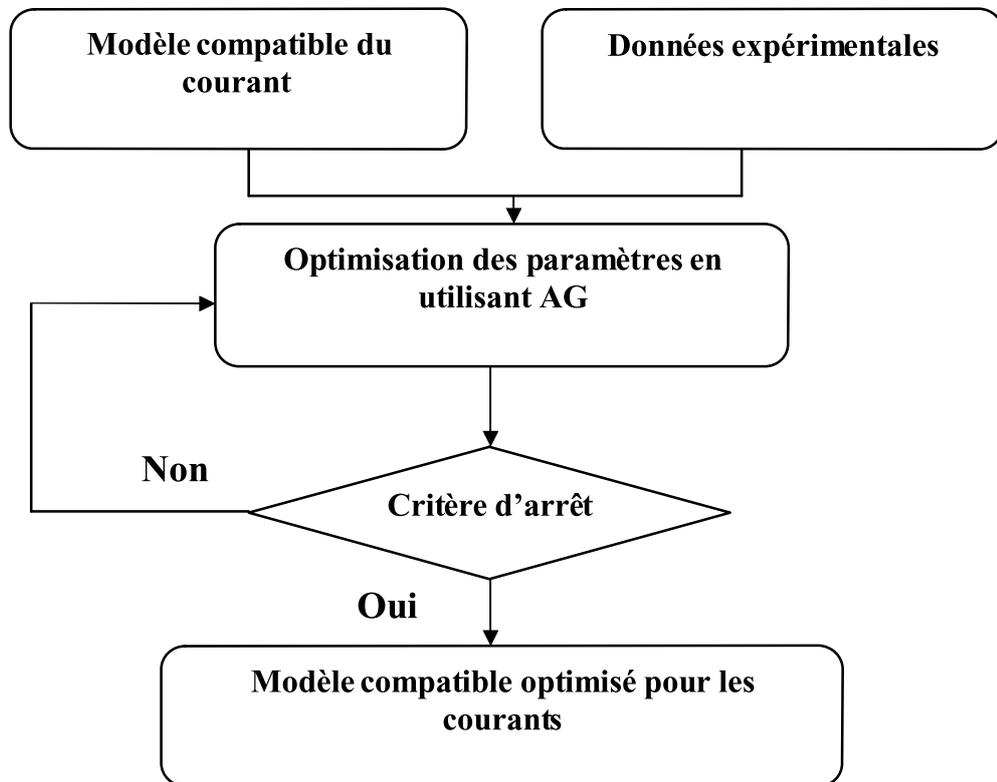
3. Processus d'optimisation

Notre processus d'optimisation par les algorithmes génétiques pour minimiser la fonction fitness (l'expression 4.7), nécessite l'utilisation des règles de la boîte d'outil, sous MATLAB, qui sont cités ce qui suit :

- la population: le type, et la taille de la population, la population initiale (utilisée dans l'algorithme génétique)...
- Définition des opérateurs génétiques: sélection, reproduction, mutation, croisement...

- Critères d'arrêt: génération (spécifie le nombre maximal d'itération), délai (spécifie la durée maximale en secondes du fonctionnement de l'algorithme génétique avant de s'arrêter.).

Le processus d'optimisation est présenté dans la figure 4.1.



3.1. Processus d'optimisation pour le modèle à une diode

Le tableau 4.1 résume les paramètres utilisés dans le modèle à une diode, où on a fait cinq tests de configurations différentes.

Paramètre AG	Valeur				
N° de tests	1	2	3	4	5
Fonction de création	Uniforme stochastique				
Taux de croisement	0.8	0.8	0.85	0.85	0.5
Fonction de croisement	Dispersé				
Fonction d'évaluation	proportionnelle				
Fonction de mutation	Adaptative adéquate			Uniforme	Adaptative adéquate
Taux de mutation	/	/	/	0.01	/
Taille de la population	10	20	20	20	20
Fonction de sélection	Tournoie	Tournoie	Tournoie	Tournoie	Tournoie
Nombre maximum de génération	200000	200000	200000	200000	200000
Critère d'arrêt	0.0020	0.0017	0.0014	0.0011	0.0011

Tableau 4.1 : Configuration de la boîte à outils AG de MATLAB (à une diode).

3.2. Processus d'optimisation pour le modèle à deux diodes

Pour le modèle à deux diodes on a utilisé les paramètres suivant:

Paramètre AG	Valeur
Fonction de création	Uniforme stochastique
Taux de croisement	0.8
Fonction de croisement	Dispersé
Fonction d'évaluation	proportionnelle
Fonction de mutation	Adaptative adéquate
Taux de mutation	/
Taille de la population	20
Fonction de sélection	Tournoie
Nombre maximum de génération	200000
Critère d'arrêt	0.0011

Tableau 4.2 : Configuration de la boîte à outils AG de MATLAB (à deux diodes).

4. Résultats d'optimisation par AG

Pour les configurations prédéfinies dans les tableaux 4.1 et 4.2, nos résultats après le processus d'optimisation sont résumés comme suit:

4.1. Modèle à une diode

Le tableau 4.3 résume les résultats obtenus en appliquant différentes valeurs pour le critère d'arrêt qui sont indiqués par les figures 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 et 4.6 pour les Test 1, 2, 3, 4, et 5.

N° test	Test (AG)					Résultats d'après [51]		
	1	2	3	4	5	Alrachidi et al (2011)	Easw. et al (1986)	Bouzidi et al (2007)
critère d'arrêt	0.0020	0.0017	0.0014	0.0011	0.0011			
Valeur de la Fonction dévaluation	0.00199	0.00168	0.00138	0.00104	0.00103	/	/	/
Nombre de génération	98	759	459	2119	14429	/	/	/
I_{ph} (A)	0.76	0.762	0.762	0.761	0.761	0.7617	0.7608	0.7607
I_s (μ A)	0.768	0.488	0.353	0.381	0.376	0.9980	0.3223	0.3267
R_s (Ω)	0.033	0.034	0.036	0.036	0.036	0.0313	0.0364	0.0364
G_{sh} (S)	0.008	0.021	0.024	0.017	0.017	0.0156	0.0186	0.0166
n	1.589	1.54	1.505	1.513	1.512	1.600	1.4816	1.4816

Tableau 4.3 : Résultats du processus d'optimisation pour le modèle à une diode.

Pour le premier test d'AG, on a obtenu les meilleures valeurs de cinq paramètres indiqués dans le tableau 4.3 pour un critère d'arrêt égal à 0.0020 après 98 générations par les AG et la valeur minimum de la fonction d'évaluation (RMSE) égale à 0.0019 (Fig. 4.2)

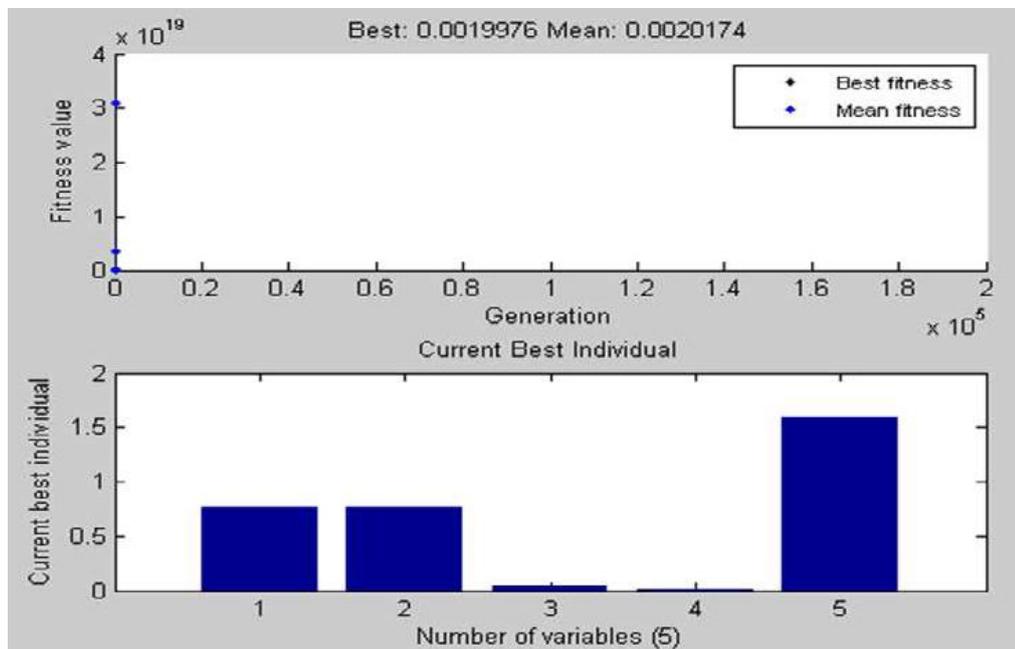


Fig. 4.2: Test AG N°1(critère d'arrêt = 0.0020).

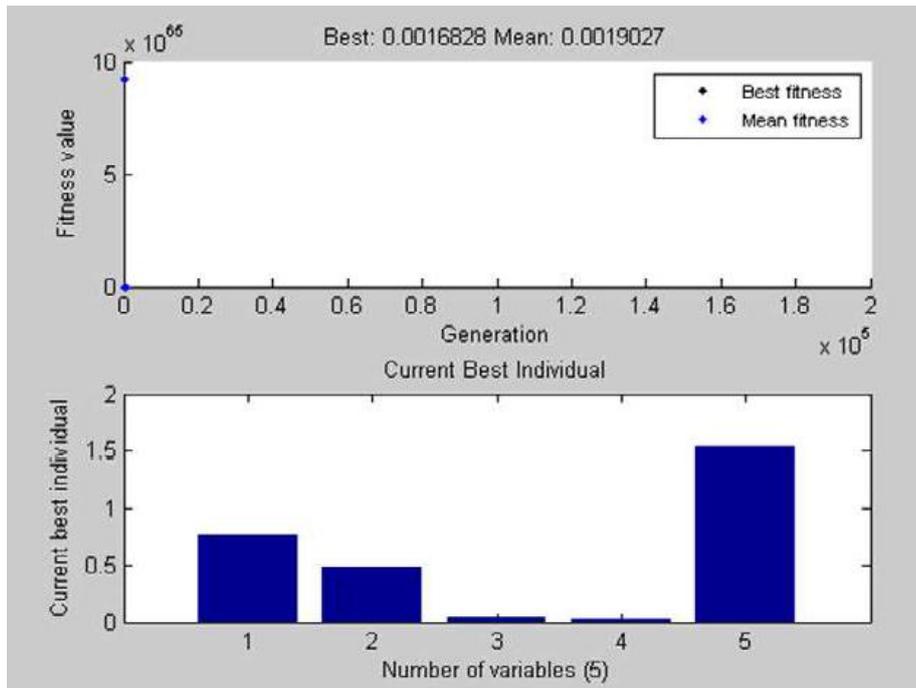


Fig. 4.3: Test AG N° 2(critère d'arrêt = 0.0017).

La figure 4.3 indique les meilleures valeurs de paramètres obtenus par le deuxième test pour un critère d'arrêt égal à 0.0020 après 759 générations par les AG et la valeur minimum de la fonction d'évaluation (RMSE) égale à 0.0016.

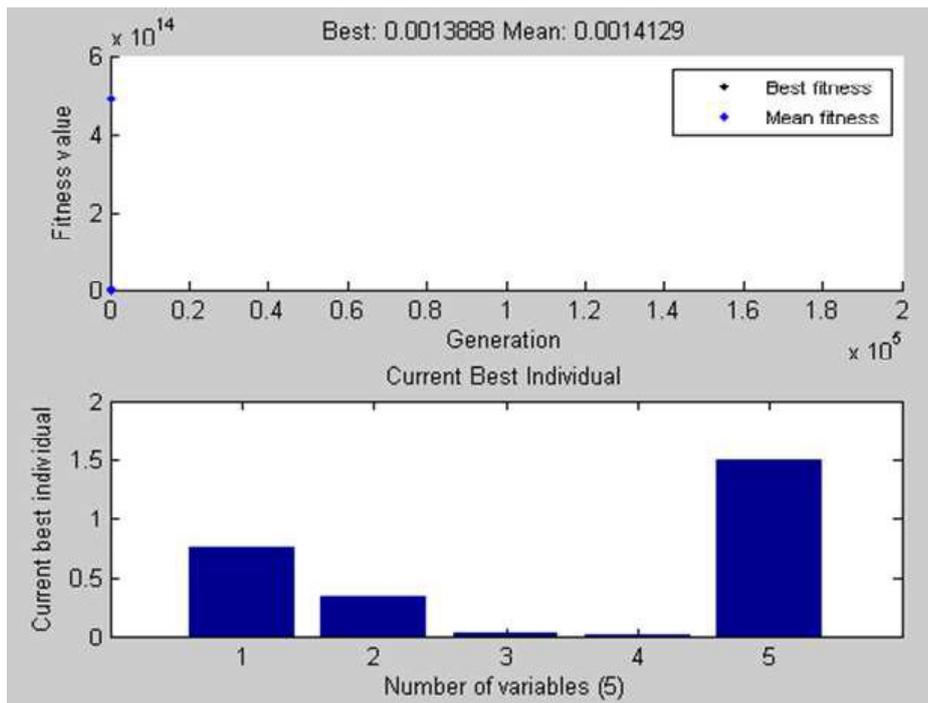


Fig. 4.4: Test AG N°3(critère d'arrêt = 0.0014)

La figure 4.4 indique les meilleures valeurs de paramètres obtenus par le troisième test pour un critère d'arrêt égal à 0.0014 après 459 générations par les AG et la valeur minimum de la fonction d'évaluation (RMSE) égale à 0.0013.

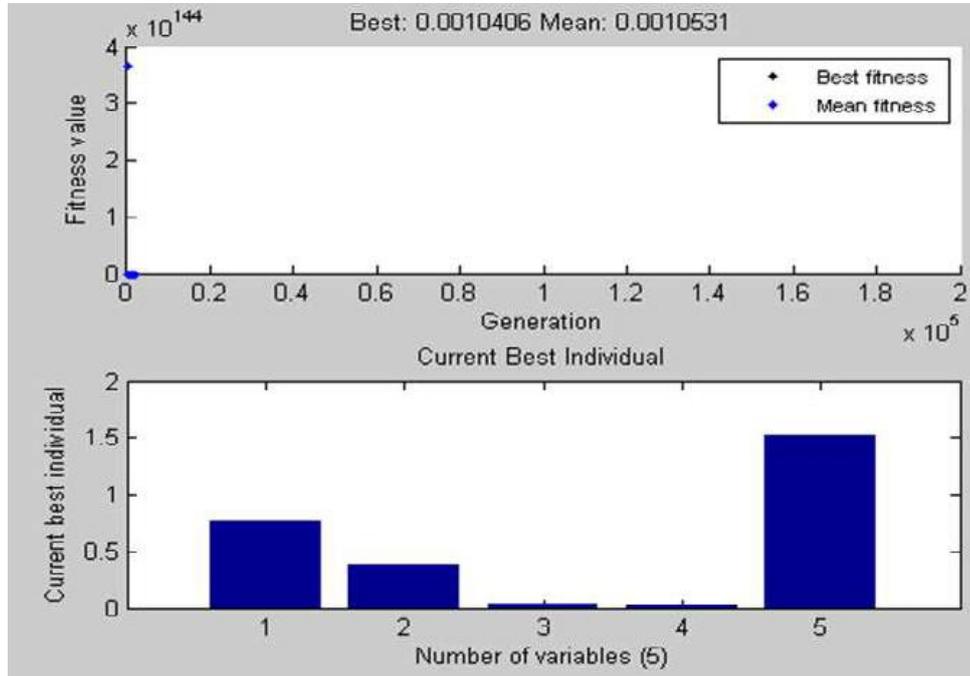


Fig.4.5: Test AG N°4 (critère d'arrêt = 0.0011)

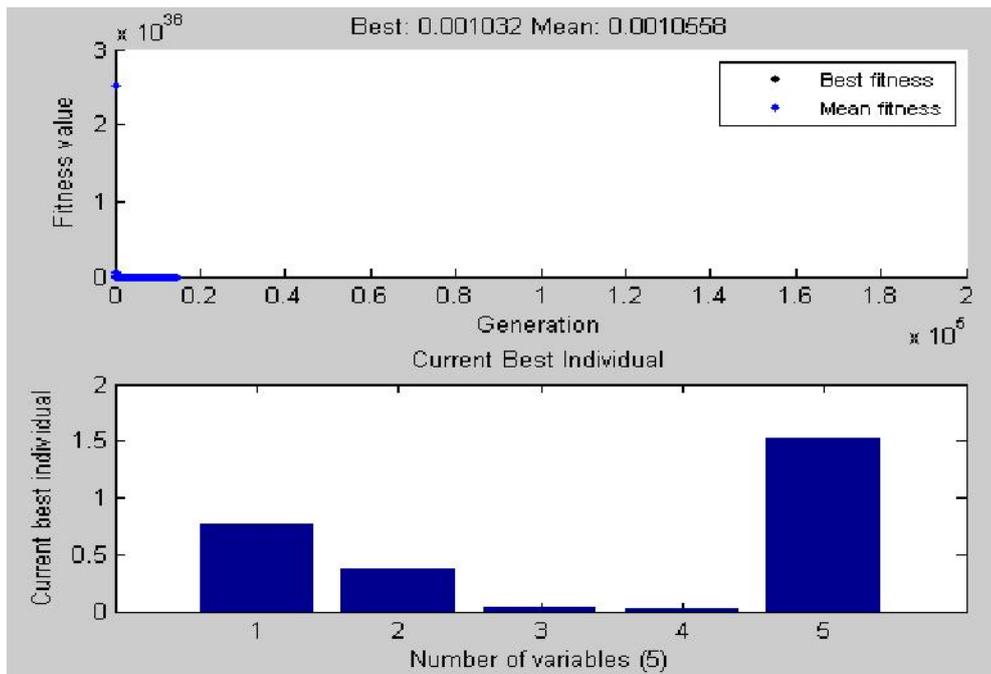


Fig.4.6: Test AG N°5 (critère d'arrêt = 0.0011)

Les figures 4.5 et 4.6 indiquent les meilleures valeurs de paramètres obtenus par le quatrième et les cinquièmes tests pour de différents paramètres d'AG et un critère d'arrêt égal à 0.0011 (tableau 4.3), le nombre de générations égal à 2119 pour le Test 4 et 14429 pour le Test 5. La valeur minimum de la fonction d'évaluation (RMSE) égale à 0.0010.

D'après ce qui précède, on remarque que le nombre de génération pour les Tests 1, 2, 3, 4, et 5, pour lequel le critère d'arrêt soit atteint est divers d'un test à un autre (98, 759, 459, 2119 et 14429).

On remarque aussi qu'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 le bon paramétrage, il faudra faire plusieurs expériences pour s'en approcher. Dans notre cas on a procédé à cinq tests pour différents paramètres.

4.2. Modèle à deux diodes

Les différents paramètres obtenus par le calcul AG sont résumés dans le tableau 4.4. En les comparants à des travaux récents ([52]).

	Test (AG)	Résultats d'après [52]
critère d'arrêt	0.00110	/
Valeur de Fonction	0.00109	/
I_{ph} (A)	0.761	0.762
I_{s1} (μ A)	0.201	0.476
R_s (Ω)	0.038	0.345
G_{sh} (S)	0.021	0.023
n_1	1.455	1.517
I_{s2} (μ A)	0.12	0.01
n_2	1.707	2.000

Tableau 4.4 : Résultats du processus d'optimisation pour le modèle à deux diodes.

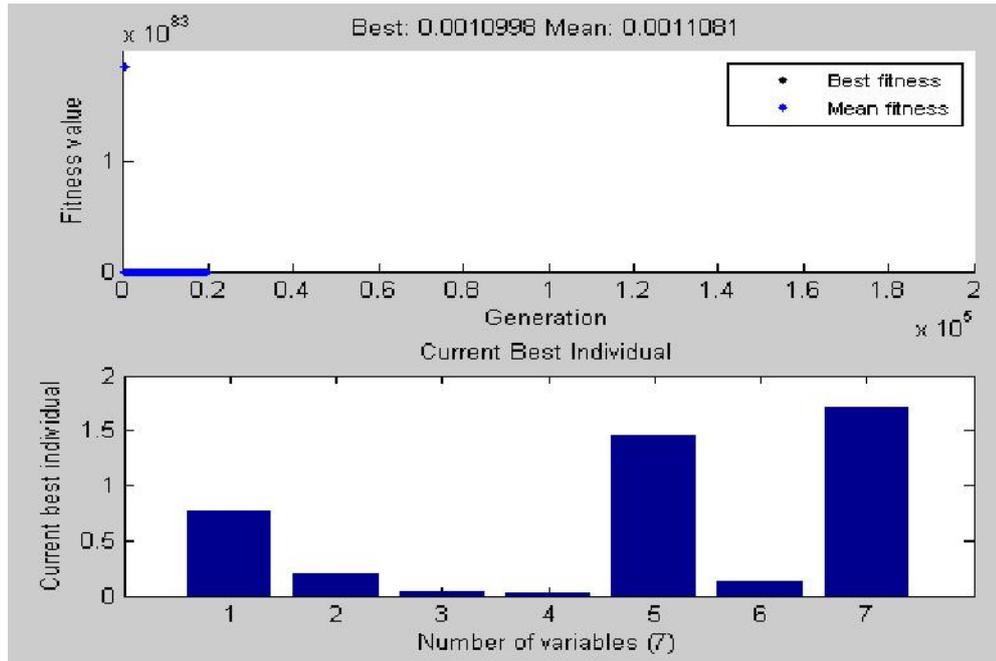


Fig.4.7: Optimisation par AG (critère d'arrêt = 0.0011) (modèle à deux diodes).

D'après la figure 4.7, on remarque dans le premier graphe, que le nombre de génération pour lequel le critère d'arrêt soit égal à 19648 générations, tandis que le deuxième graphe de la figure représente les valeurs des sept paramètres obtenus par l'AG, qui sont mentionnés dans le tableau 4.4. La moindre valeur de la fonction d'évaluation (Best Fitness value) est indiquée au dessus du graphe

5. Validation des résultats

Les résultats obtenus précédemment nécessitent une validation afin qu'ils soient valables et exploitables pour une utilisation ultérieure. Pour cela on a fait des comparaisons entre les résultats des courants obtenus par l'AG et celles expérimentaux (obtenus sous les conditions suivantes: diamètre de la cellule solaire en silicium égale à 57 mm, une température $T = 33^{\circ}\text{C}$ et un éclairement $E = 1000\text{W/m}^2$ [52]). De plus on a calculé les erreurs individuelles absolues (IAE) qui donnent la différence entre le courant expérimentale et le courant calculé dans chaque point de la courbe.

5.1. Modèle à une diode

Les résultats obtenus par simulation du modèle à une diode sont représentés sur les figures 4.8, à 4.12. Nous remarquons bien un très bon accord entre les valeurs expérimentales et celles simulées par l'AG où l'erreur individuelle absolue(IAE) semble très petite, ($IAE = |I_{exp} - I_{cal}|$), le tableau 4.5 montre bien que les paramètres trouvés par l'AG sont plus adéquates pour former un modèle plus proche du réel.

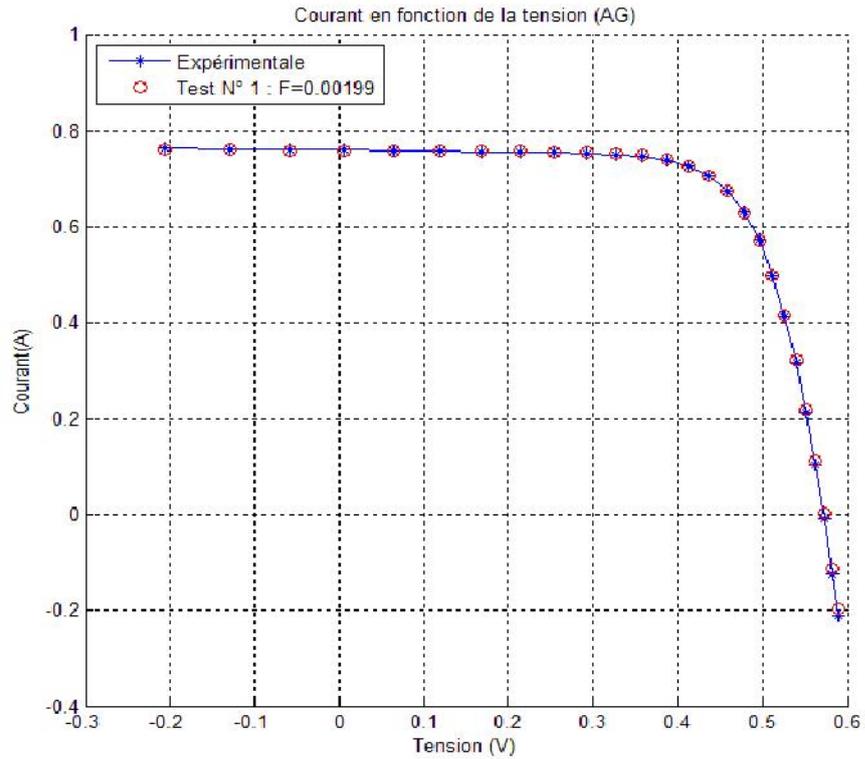


Fig.4.8: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux - Test N°1

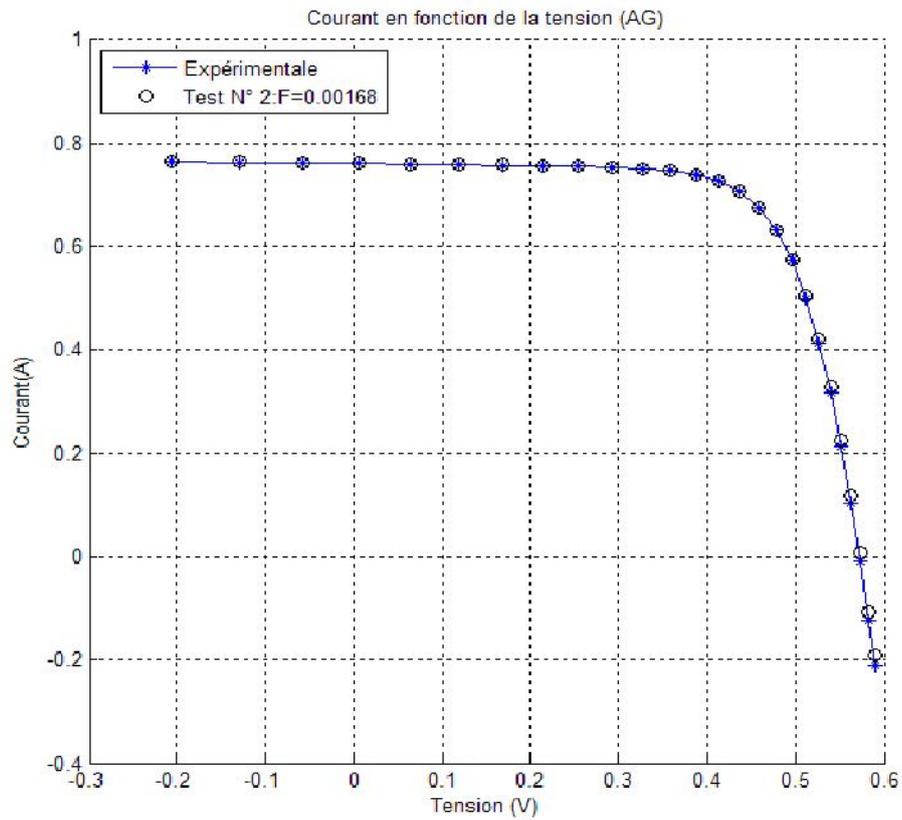


Fig.4.9: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux - Test N°2

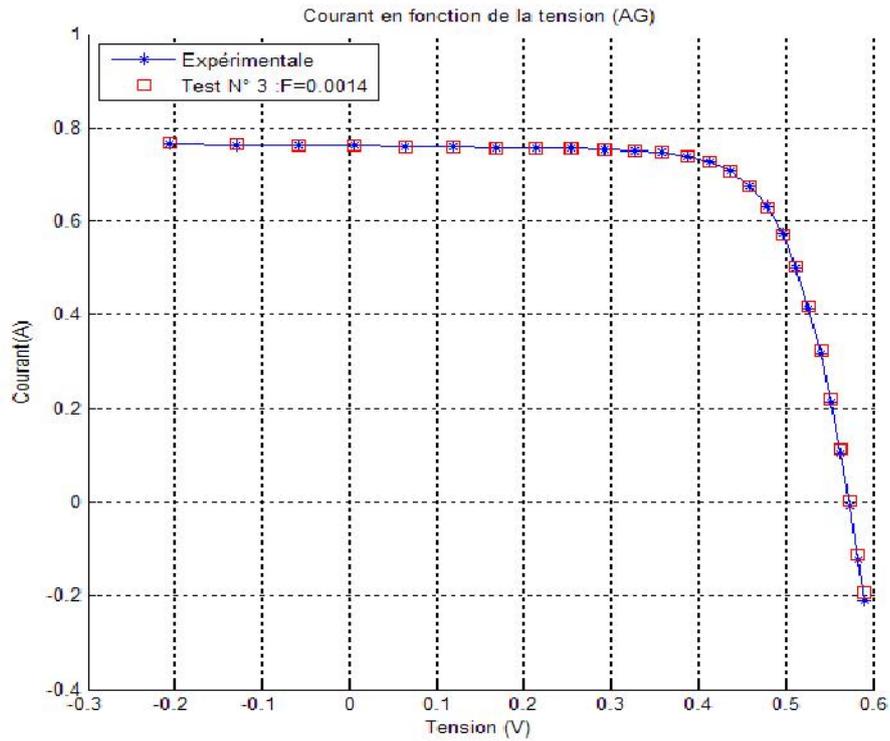


Fig.4.10: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux - Test N°3.

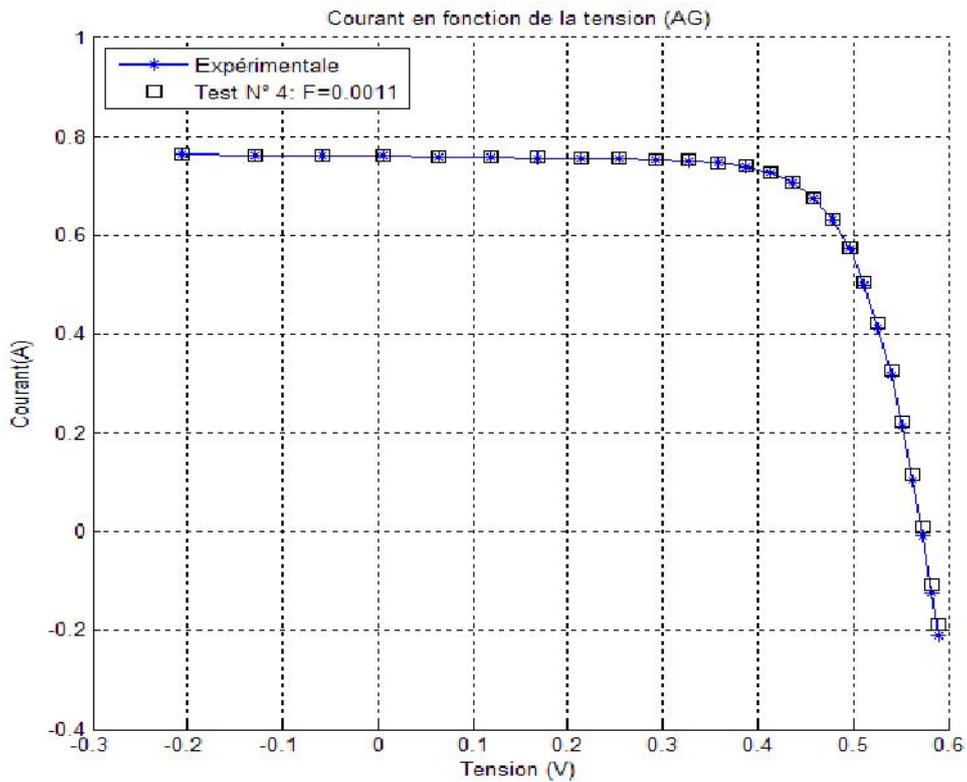


Fig.4.11: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux - Test N° 4.

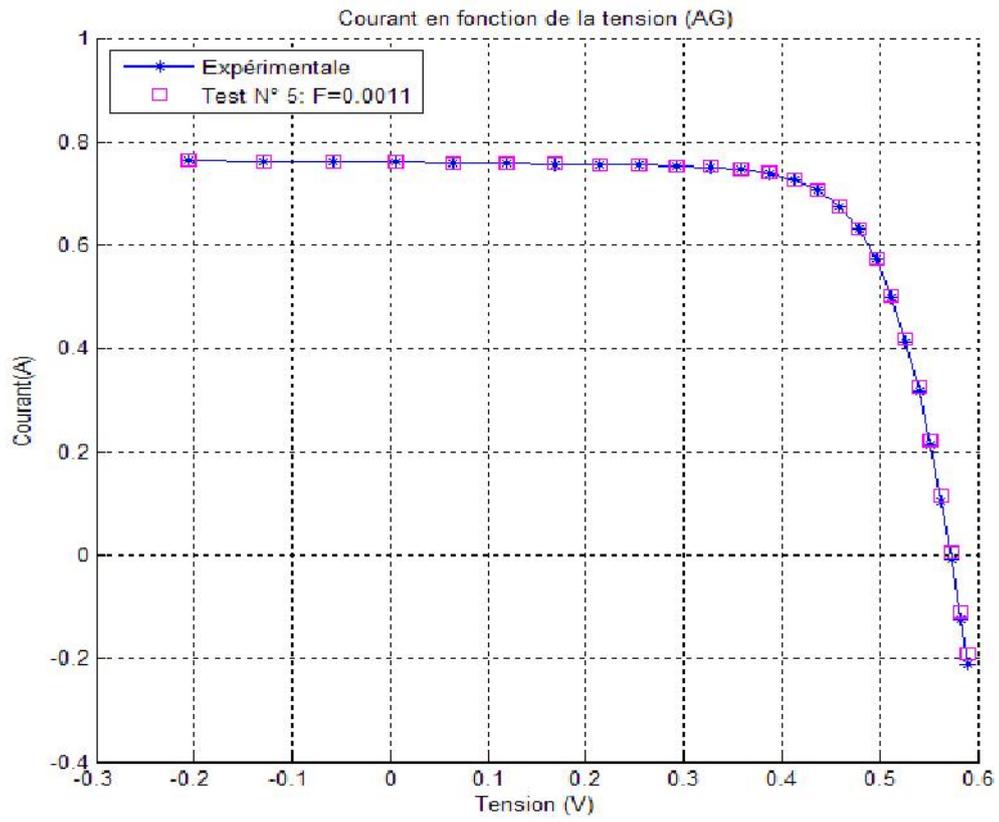


Fig.4.12: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux - Test N° 5.

V (V)	I (A)	Test1 (A)	IAE1	Test2 (A)	IAE2	Test 3 (A)	IAE3
-0.2057	0.7640	0.7614	0.0026	0.7658	0.0018	0.7663	0.0023
-0.1291	0.7620	0.7608	0.0012	0.7642	0.0022	0.7644	0.0024
-0.0588	0.7605	0.7603	0.0002	0.7627	0.0022	0.7628	0.0023
0.0057	0.7605	0.7598	0.0007	0.7613	0.0008	0.7612	0.0007
0.0646	0.7600	0.7593	0.0007	0.7601	0.0001	0.7598	0.0002
0.1185	0.7590	0.7588	0.0002	0.7590	0.0000	0.7585	0.0005
0.1678	0.7570	0.7584	0.0014	0.7579	0.0009	0.7573	0.0003
0.2132	0.7570	0.7579	0.0009	0.7568	0.0002	0.7561	0.0009
0.2545	0.7555	0.7571	0.0016	0.7556	0.0001	0.7548	0.0007
0.2924	0.7540	0.7559	0.0019	0.7540	0.0000	0.7531	0.0009
0.3269	0.7505	0.7536	0.0031	0.7515	0.0010	0.7507	0.0002
0.3585	0.7465	0.7492	0.0027	0.7472	0.0007	0.7464	0.0001
0.3873	0.7385	0.7413	0.0028	0.7397	0.0012	0.7390	0.0005
0.4137	0.7280	0.7277	0.0003	0.7267	0.0013	0.7262	0.0018
0.4373	0.7065	0.7063	0.0002	0.7063	0.0002	0.7059	0.0006
0.4590	0.6755	0.6739	0.0016	0.6750	0.0005	0.6744	0.0011
0.4784	0.6320	0.6293	0.0027	0.6316	0.0004	0.6304	0.0016
0.4960	0.5730	0.5712	0.0018	0.5746	0.0016	0.5725	0.0005
0.5119	0.4990	0.5004	0.0014	0.5047	0.0057	0.5014	0.0024
0.5265	0.4130	0.4168	0.0038	0.4217	0.0087	0.4170	0.0040
0.5398	0.3165	0.3234	0.0069	0.3286	0.0121	0.3227	0.0062
0.5521	0.2120	0.2206	0.0086	0.2260	0.0140	0.2191	0.0071
0.5633	0.1035	0.1129	0.0094	0.1184	0.0149	0.1111	0.0076
0.5736	-0.0100	0.0031	0.0131	0.0087	0.0187	0.0020	0.0120
0.5833	-0.1230	-0.1132	0.0098	-0.1075	0.0155	-0.1129	0.0101
0.5900	-0.2100	-0.1971	0.0129	-0.1911	0.0189	-0.1947	0.0153

V (V)	I (A)	Test4 (A)	IAE4	Test5 (A)	IAE5
-0.2057	0.7640	0.7640	0.0000	0.7640	0.0000
-0.1291	0.7620	0.7627	0.0007	0.7627	0.0007
-0.0588	0.7605	0.7615	0.0010	0.7615	0.0010
0.0057	0.7605	0.7604	0.0001	0.7604	0.0001
0.0646	0.7600	0.7594	0.0006	0.7594	0.0006
0.1185	0.7590	0.7585	0.0005	0.7585	0.0005
0.1678	0.7570	0.7576	0.0006	0.7576	0.0006
0.2132	0.7570	0.7567	0.0003	0.7567	0.0003
0.2545	0.7555	0.7557	0.0002	0.7557	0.0002
0.2924	0.7540	0.7544	0.0004	0.7543	0.0003
0.3269	0.7505	0.7521	0.0016	0.7521	0.0016
0.3585	0.7465	0.7480	0.0015	0.7480	0.0015
0.3873	0.7385	0.7408	0.0023	0.7407	0.0022
0.4137	0.7280	0.7280	0.0000	0.7279	0.0001
0.4373	0.7065	0.7077	0.0012	0.7075	0.0010
0.4590	0.6755	0.6763	0.0008	0.6759	0.0004
0.4784	0.6320	0.6325	0.0005	0.6319	0.0001
0.4960	0.5730	0.5747	0.0017	0.5739	0.0009
0.5119	0.4990	0.5039	0.0049	0.5028	0.0038
0.5265	0.4130	0.4199	0.0069	0.4185	0.0055
0.5398	0.3165	0.3263	0.0098	0.3245	0.0080
0.5521	0.2120	0.2235	0.0115	0.2214	0.0094
0.5633	0.1035	0.1164	0.0129	0.1140	0.0105
0.5736	-0.0100	0.0082	0.0182	0.0055	0.0155
0.5833	-0.1230	-0.1056	0.0174	-0.1087	0.0143
0.5900	-0.2100	-0.1866	0.0234	-0.1898	0.0202

Tableau 4.5 : Erreur individuelle absolue entre les valeurs du courant expérimentales et celles de tests 1, 2, 3, 4 et 5 (Pour Cellule solaire à une diode).

5.2. Modèle à deux diodes

Les résultats obtenus par simulation du modèle à deux diodes, comme le montre la figure 4.13, prouvent qu'il y a un très bon accord entre les valeurs expérimentales et celles simulées par l'AG où l'erreur individuelle absolue (IAE) semble très petite (de l'ordre de 10^{-3}).

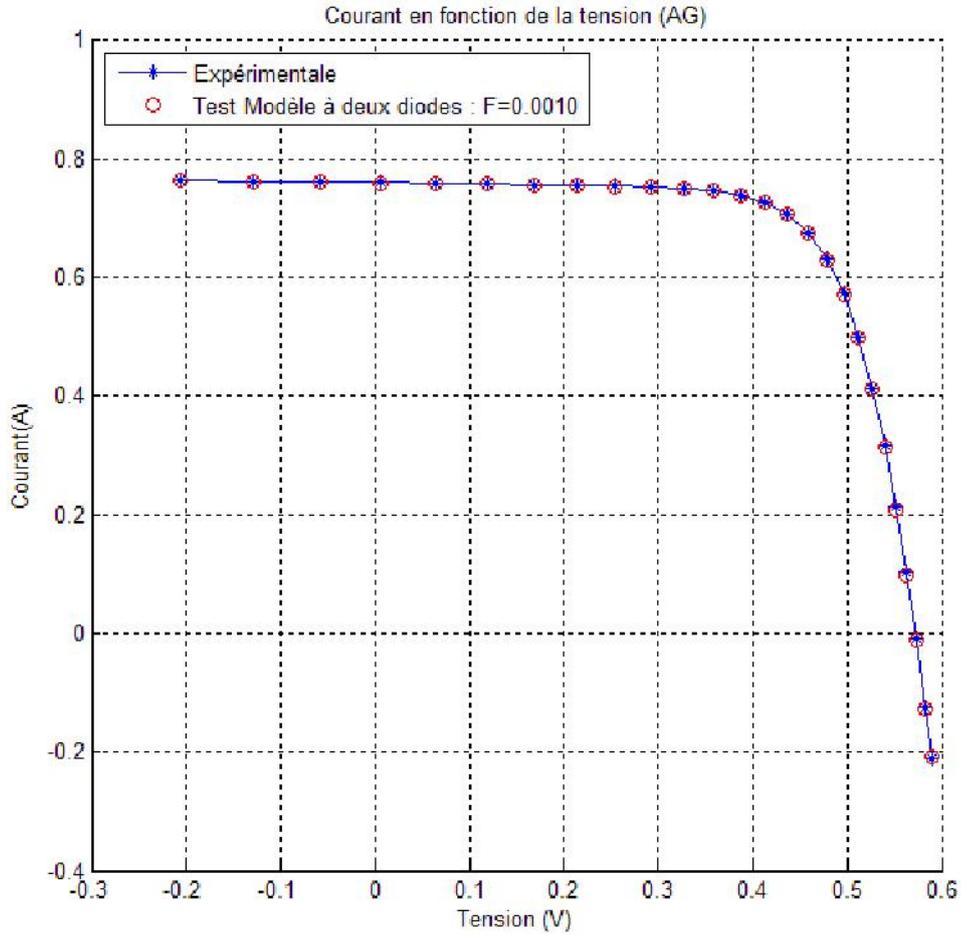


Fig.4.13: Comparaison des résultats d'AG avec ceux expérimentaux pour un modèle à deux diodes.

Le tableau 4.6 montre bien que les paramètres trouvés par l'AG sont plus adéquates pour former un modèle à deux diodes plus proche du comportement réel.

V (V)	I (A)	I (A) (AG)	IAE
- 0.2057	0.7640	0.7647	0.0007
- 0.1291	0.7620	0.7631	0.0011
-0.0588	0.7605	0.7616	0.0011
0.0057	0.7605	0.7603	0.0002
0.0646	0.7600	0.7590	0.0010
0.1185	0.7590	0.7579	0.0011
0.1678	0.7570	0.7568	0.0002
0.2132	0.7570	0.7558	0.0012
0.2545	0.7555	0.7546	0.0009
0.2924	0.7540	0.7532	0.0008
0.3269	0.7505	0.7509	0.0004
0.3585	0.7465	0.7469	0.0004
0.3873	0.7385	0.7397	0.0012
0.4137	0.7280	0.7271	0.0009
0.4373	0.7065	0.7068	0.0003
0.4590	0.6755	0.6751	0.0004
0.4784	0.6320	0.6303	0.0017
0.4960	0.5730	0.5709	0.0021
0.5119	0.4990	0.4979	0.0011
0.5265	0.4130	0.4111	0.0019
0.5398	0.3165	0.3145	0.0020
0.5521	0.2120	0.2087	0.0033
0.5633	0.1035	0.0991	0.0044
0.5736	- 0.0100	- 0.0109	0.0009
0.5833	- 0.1230	- 0.1260	0.0030
0.5900	- 0.2100	- 0.2071	0.0029

Tableau 4.6 : Erreur individuelle absolue entre les valeurs du courant expérimentales et celles obtenus par AG (Pour Cellule solaire à deux diodes).

6. Conclusion

Dans ce chapitre, on appliqué la technique d'optimisation (AG) sur les deux modèles de cellule solaire présentés dans le chapitre trois (à une diode et à deux diodes), où on a fait des simulations en utilisant la boîte à outils d'optimisation par AG sous l'environnement MATLAB.

Les résultats obtenus nous ont montré que la technique d'AG présente une meilleure stratégie conventionnelle d'extraction des paramètres en termes de convergence. Elle fournit des solutions optimales globales.

Les caractéristiques I-V obtenues ont validées la propriété prédictive de nos modèles (à une diode et à deux diodes) compact optimisé. Cette technique peut être utilisé pour prédire d'autres combinaisons des variable d'entrée.

Conclusion générale

L'intérêt scientifique aussi bien que le potentiel commercial ont conduit à une recherche accrue dans le domaine du photovoltaïque qui s'est considérablement développé durant ces vingt dernières années. La recherche que nous avons menée avait pour but de développer des nouvelles approches analytiques en utilisant les algorithmes génétiques permettant d'optimiser les paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

Dans le premier chapitre, nous avons tout d'abord rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire et son application dans le domaine photovoltaïque.

La technique d'optimisation reposant sur les Algorithmes génétique a fait l'objet du deuxième chapitre. Nous avons exposé les principes de base tout en mettant un accent particulier sur les avantages et les inconvénients de cette méthode évolutionnaire. Nous avons montré que le choix est motivé par la nature du problème à traiter et par l'efficacité de ces algorithmes pour la recherche d'une solution très proche de l'optimum ou presque optimale.

Lors du troisième chapitre nous avons expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales, puis nous avons abordé leurs représentations électriques: la représentation à une diode et la représentation à deux diodes ainsi que les paramètres intervenant dans la caractéristique $I(V)$.

Le dernier chapitre du mémoire a été consacré à la présentation et l'interprétation des résultats ou nous nous sommes particulièrement concentrés sur le développement d'un modèle analytique optimisé de la caractéristiques $I-V$ en utilisant la technique évolutionnaire AG. Le bon accord entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par notre approche a montré l'applicabilité des AGs pour donner de bons résultats et ouvre la voie à prendre en considération d'autres paramètres qui sont restés jusqu'à ce jour absents dans la modélisation.

Les résultats obtenus à travers ce mémoire nous encouragent également à procéder à des réflexions supplémentaires dans ce domaine. En appliquons, par exemple, ces travaux à des modules photovoltaïques.

Bibliographie

- [1] P. Bessemoulin, J.Olivieri ; «Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette», Magazine, La Météorologie 8e série - n° 31 - septembre 2000.
- [2] A. Ricaud, «Gisement solaire et transferts énergétiques», Master Energies Renouvelables, Université de CERGY-PONTOISE, Jan 2011.
- [3] A. Mefti ,M.Y.Bouroubi et A.Khellaf; «Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie», Revue, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Energ. Ren. Vol. 2 (1999) 69-85.
- [4] C. Lavoie , «Etude de l'atténuation solaire par le couvert de neige en Dronning Maud Land, Antarctique», thèse de Maitre de science, Spécialité : géographie, Université de sherbrooke Aout 2004.
- [5] R. El Mokni, N. AMAIMIA «Le Gisement Solaire», Formation sur les Systèmes Photovoltaïques, 2011.
- [6] J. Graf, J.MarcCottier, A.Mermoud, M.Villoz,«Centrales photovoltaïques», Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs,Office fédéral des questions conjoncturelles, 3003 Berne, juin 1996.
- [7] S.Benkaciali, «Le Gisement Solaire à Ghardaïa», Bulletin des Energies Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, Algérie, Juin 2007.
- [8] B Beckers , P. Beckers ,«Calcul du rayonnement solaire atténué par l'atmosphère», rapport de recherche, Février 2011.
- [9] H. Derbal , «Cellules solaires photovoltaïques plastiques nanostructurées», thèse de Doctorat, Spécialité : Physique, Université D' ANGERS, N° 929, 03 Juillet 2009.
- [10] M. Ouddah, «Étude du silicium poreux destiné aux cellules solaires», Mémoire magister, Université de Mentouri Constantine, mai 2009.
- [11] T. Desrues «Développement de cellules photovoltaïques à hétérojonctions silicium et contacts en face arrière», thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, N 2009ISAL0084, 30/11/2009.
- [12] Z. Benmohamed, «Caractérisation et analyse des cellules solaires a base de silicium multicristallin», thèse de Doctorat, UniversitéMentouri - Constantine, 03/02/2009
- [13] Syndicat des énergies renouvelables «Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique», Document, Paris, juin 2012.
- [14] S. Khalfallaoui, D. Seguin, M-A-A. Idrissi «Étude d'un système solaire thermique : Effet de l'orientation des panneaux solaires», Université de Rouen–Mont Saint Aignan Cedex- 2008.
- [15] P. Jourde «Les trois voies de l'énergie solaire», Document, Direction de la recherche technologique, CEA centres de Grenoble et de Cadarache - N° 50/51 - HIVER 2004-2005.

- [16] B.Flèche, D.Delagnes, «Production d'énergie électrique: Energie Solaire Photovoltaïque», Support de cours, juin 07.
- [17] N. Oleksiy «Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités», thèse de Doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, N 2005ISAL0028, 03 mai 2005.
- [18] M. Benaïcha «Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque», thèse de Magister, Spécialité : Physique, Université colonel Hadj Lakhdar Batna (Algerie), 31 /10/2007.
- [19] R.Miles,G.Zoppi, and I.Forbes, «Inorganic photovoltaic cells», Northumbria Photovoltaics Applications Centre, Northumbria University, Ellison Building, Newcastle upon Tyne, NE1 8ST, UK , NOVEMBER 2007.
- [20] Cellule photovoltaïque – Wikipédia.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque
- [21] M.Python «Microcrystalline Silicon Solar Cells:Growth And Defects», Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 5 mars 2009.
- [22] F.Bessahraoui, J.D.Sib, A.Kebab, A.bouheka. Y. Bouizem and L.Chahed «Déconvolution du spectre d'absorption optique du silicium nanocristallin hydrogéné (nc-Si : H)», rapport de recherche, Université d'Oran, 2002.
- [23] D- T. Morgan «An investigation into degradation of cdte solar cells».
- [24] L.Bailly «Cellules photovoltaïques organiques souples a grande surface», Thèse de doctorat, université bordeaux,03septembre 2010.
- [25] S. Petibon «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université Toulouse, 20 Janvier 2009.
- [26] M. J. Stocks, A. J. Carr and A. W. Blakers. « Texturing of polycrystalline silicon. Solar En.Mat.&Sol.Cells ».article,1996.
- [27] M. Bashahu ,A. Habyarimana. « Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance ». article,1995.
- [28] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, S.R. Wenham. « Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells. Solar En.Mat.&Sol.Cells »,article ,2001.
- [29] A. Rohatgi, V. Yelundur et al. « Aluminum-enhanced PECVD Si Hydrogenation in silicon ribbons ». 16th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference., pp.1120-1123. Glasgow (UK), 2000.
- [30] M. A. Vonchen . « III-V epitaxial lift-off investigated by multi-release layers ». 17thEuropean photovoltaic conference .2001.
- [31] J. Horzel et al. « Optimization results for an industrially applicable selective emitter process». 2nd IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vienna (Autriche), 1998.

- [32] T.M. Razykov ,C.S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H.S. Ullal,H.M. Upadhyaya «Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects», article S.D 2011.
- [33] R. Bilyalov, A. Ulyashin, M. Scherf, K Meusinge, J. Poortmansl, W. Fahrn «P-type silicon heterojunction solar cells with different interfaces and surface structures»,university of hagen, haldener str. 182, d-58084 hagen, germany , 3rd world conference on photovoltaic energy conversion may 11-18, 2003 Osaka, Japan.
- [34] J-D.Lacoste «Vers une ingénierie de bandes des cellules solaires à hétérojonctions a-Si:H/c-Si. Rôle prépondérant de l'hydrogène.», Thèse de doctorat, 05/07/2007.
- [35] Z.Holman, A. Descoedres, L. Barraud, J. Seif,F.Zicarelli, S. Wolf, and C.Ballif «Increasing short-circuit current in silicon heterojunction solar cells», article IEEE, 2011.
- [36] S. Brigand, «Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque», complément technique, mars/avril 2008.
- [37] Z.Bendjellouli «Contribution à la modélisation d'une cellule solaire», mémoire de magister, Université de Bechar, 28 / 06 / 2009.
- [38] Y.Jautard et T. boudol, «L'électricité photovoltaïque», document, 25/05/2000.
- [39] A.Bouraiou, «Élaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe₂ par Électrodéposition», thèse de Doctorat, Spécialité: Physique, Université Mentouri - Constantine, 08 /10 /2009.
- [40] T. Chaari, «Un algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste : application au problème du flow shop hybride», thèse de Doctorat, 2010.
- [41] M.Melanie, «An Introduction to Genetic Algorithms », First MIT Press paperback edition, 1998.
- [42] O. Guenounou, «Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé», Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 22 avril 2009.
- [43] N. Lassouaoui , L. Hamami , N. Nouali, «Les algorithmes génétiques application a la segmentation des images»,RIST Vol.14 N°02 Année 2004.
- [44] B. Sid, «Optimisation topologique de structures par algorithmes genetiques», Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 05 décembre 2006.
- [45] J.Alliot, N. Durand, «Algorithmes génétiques», March, 2005.
- [46] F. Girard, «Optimisation de stratifiés en utilisant un algorithme génétique», mémoire de maitre en sciences, Faculté des sciences et de génie université Laval Quebec, 2006.
- [47] N. Durand, «Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion de trafic aérien», 5 octobre 2004.
- [48] Joseph L. Hellerstein, Yixin Diao, Sujay Parekh, Dawn M. Tilbury ; «Feedback Control of Computing Systems» IEEE Press- John Wiley & Sons Inc. P53-54, 2004

- [49] W.C. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga «Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin)», Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen (2007) 301 – 306.
- [50] F. Zouache, «Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïques», Mémoire magister, Université Mentouri - Constantine, 2009.
- [51] A. Nouar, «Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales», Mémoire magister, Université Mentouri - Constantine, 2010.
- [52] K.M. El-Naggar, M.R. Alrashidi, M.F. Alhajri, A.K. Al-Othman «Simulated Annealing algorithm for photovoltaic parameters identification» article S.D, 21 octobre 2011.
- [53] M.R. Alrashidi, M.F. Alhajri, K.M. El-Naggar, A.K. Al-Othman «A new estimation approach for determining the I–V characteristics of solar cells», article S.D, 07 mai 2011.
- [54] J.H Holland. «Adaptation in Natural and Artificial Systems». University of Michigan press, 1975.
- [55] D.E Goldberg. «Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning». Reading MA Addison Wesley, 1989.